

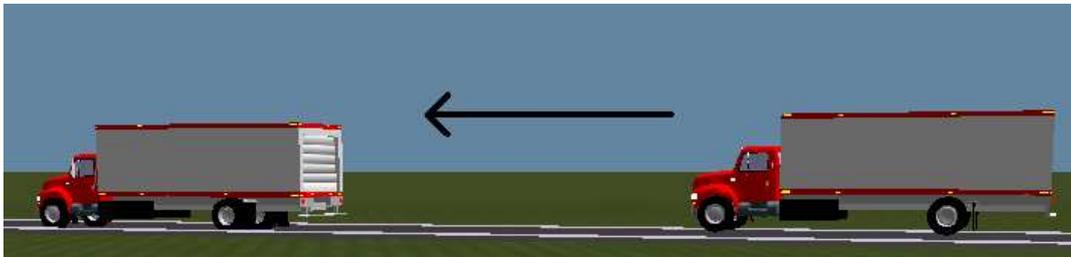


LIVIC



ROUTE AUTOMATISEE POIDS LOURDS

Rapport final



PARTIE 1 : RESUME, SYNTHESE, INTRODUCTION ET SCENARIOS D'ETUDE

Juin 2004

TABLE DES MATIERES

PARTIE 1 : RESUME, SYNTHÈSE, INTRODUCTION ET SCENARIOS D'ETUDE

RESUME DES TRAVAUX	11
SYNTHÈSE.....	17
1 Quelle forme pour la Route Automatisée PL ?	20
2 Les scénarios d'étude	21
3 Capacité et sécurité d'une Route Automatisée Poids Lourds ?	22
4 Fiabilité et fonctions critiques.....	23
5 Exemples de systèmes proches	25
6 Régulation des réseaux.....	27
7 L'économie du projet	30
8 Etude qualitative exploratoire des attitudes des chauffeurs « grands routiers ».....	33
9 Route automatisée aux USA	36
INTRODUCTION	38
L'AUTOROUTE AUTOMATIQUE POIDS LOURDS ET LE TRANSPORT ROUTIER EN FRANCE	39
1 Un scénario volontariste pour un « double dividende »	39
2 Le transport routier de marchandises : quel trafic ?.....	40
3 Quels véhicules ?	42
4 L'essor du transport routier et de sa productivité.....	43
5 Le secteur : concentration et mode de production.....	46
6 L'autoroute automatique poids lourds : éléments pour une analyse et une évaluation... 53	
CHOIX DE L'INFRASTRUCTURE POUR DES SCENARIOS DE DEPLOIEMENT DE LA ROUTE AUTOMATISEE POUR POIDS LOURDS	55
1 Résumé	55
2 Le choix de l'infrastructure.....	57

3	L'exploitation de la Route Automatisée.....	61
4	L'infrastructure.....	64
5	Coûts.....	65
	SCENARIOS DE DEPLOIEMENT DU CONCEPT RAPL.....	69
1	Résumé.....	69
2	Introduction.....	70
3	Scénario d'attelage électronique de poids lourds en statique.....	71
4	Scénario d'attelage électronique de poids lourds en dynamique.....	81
5	Scénario de route automatisée.....	91
6	Déploiement dans le temps des scénarios.....	94
7	L'axe pris en compte.....	95
8	Conclusion.....	98
9	Références bibliographiques.....	98

PARTIE 2 : MODELISATION ET EVALUATION DES CIRCULATIONS

INTRODUCTION**ANALYSE CAPACITE-SECURITE DE SCENARIOS DE ROUTE AUTOMATISEE POIDS LOURDS**

1	Résumé
2	Introduction
3	Modélisation et choix des paramètres
4	Route actuelle et évolutions
5	Poids lourds automatisés en trafic mixte
6	Voie dédiée, scénario de référence.....
7	Voie dédiée, 3 scénarios d'automatisation des PL
8	Conclusion.....
9	Bibliographie

ETUDE DE FAISABILITE : ETUDE PRELIMINAIRE DE SECURITE DE CONVOIS DE POIDS LOURDS

1	Résumé
2	Introduction
3	Contexte de l'étude.....
4	Méthodologie d'évaluation de la sécurité.....
5	Architecture fonctionnelle du système d'un PL en conduite automatique sur route automatisée
6	Analyse préliminaire des risques d'un PL sur route automatisée [20]
7	Conclusions

ETUDE DE FIABILITE DE LA FONCTION "GESTION DE L'INTERDISTANCE" DANS LE CADRE DE LA RAPL

1	Résumé
2	Introduction générale.....
3	La sûreté de fonctionnement
4	La fonction "estimation d'interdistance"

5	Fiabilité de la fonction d'Asservissement de l'interdistance
6	Amélioration de la sécurité.....
7	Conclusions
8	Bibliographie

SYSTEME DE PREDICTION DE PANNES DE CAPTEURS DE CAMIONS EN CONVOIS

1	Résumé
2	Introduction
3	Environnement et objectif du système de prédiction.....
4	Le système de prédiction
5	Simulation
6	Conclusion.....
7	Bibliographie

ETUDE DE PROCEDURES D'INSERTION SUR UNE VOIE AUTOMATISEE POIDS LOURDS

1	résumé
2	Introduction et hypotheses
3	Criteres de choix d'une politique d'insertion
4	Creation d'un espace d'insertion.....
5	Scenario de base : insertion d'un vehicule parmi n
6	Generalisation : insertion de k parmi n
7	Quelques exemples numeriques
8	Procedures de controle du vehicule entrant
9	Conclusion et perspectives.....

FAISABILITE D'UNE ROUTE AUTOMATISEE A UNE VOIE DE CIRCULATION : QUELQUES SIMULATEURS

1	Résumé
2	Introduction
3	Scénario 1 : conduite manuelle, référence de base.....

- 4 Scénario 2 : plate forme de concentration
- 5 Scénario 3 : pelotons statiques de type « Chauffeur »
- 6 Scénario 4 : pelotons dynamiques.....
- 7 Scénario 5 : route totalement automatisée.....
- 8 Annexe : Quelques résultats de simulation de trafic avec les simulateurs

AUTOMATISATION DES POIDS LOURDS : DEBAT SUR LE CONTEXTE ET LES POSSIBILITES DES USA

- 1 Résumé
- 2 Rapport intermédiaire

ANNEXES : EXEMPLES DE SYSTEMES PROCHES

- 1 Etat de l'art sur les projets européen sur les poids lourds : rojets CHAUFFEUR2 et SAFETUNNEL
- 2 Note explicative du système européen de gestion et de commande du trafic ferroviaire : ERTMS, European Rail Traffic Management System.....

PARTIE 3 : ECONOMIE DU PROJET RAPL

INTRODUCTION

EVALUATION ECONOMIQUE DE L'AUTOROUTE AUTOMATIQUE POIDS LOURDS : SYNTHESE

- 1 Resumé
- 2 L'étude économique du scénario autoroute automatique poids lourds, étude d'un scénario crédible.....
- 3 La méthode d'étude.....
- 4 Le réalisme social des scénarios.....
- 5 Conclusion.....

SEGMENTATION ET PROSPECTIVE DE LA DEMANDE EN TRANSPORT DE MARCHANDISES

- 1 Résumé
- 2 Introduction
- 3 Analyse descriptive de la demande.....

- 4 Impacts sur la demande d'une innovation technologique d'importance.....
- 5 Quantification de la demande
- 6 Conclusion.....
- 7 Références bibliographiques

L'ENTREPRISE DE TRANSPORT ET SES CHAUFFEURS FACE A LA ROUTE AUTOMATISEE

- 1 Résumé
- 2 Introduction
- 3 Les transporteurs
- 4 Les chauffeurs.....
- 5 Conclusion.....
- 6 Références bibliographiques

EVALUATION ECONOMIQUE ET FINANCIERE D'UN SCENARIO DE ROUTE AUTOMATISEE ET D'UN SCENARIO D'ATELAGE ELECTRONIQUE DE POIDS LOURDS : PREMIERE APPROCHE

- 1 Résumé
- 2 Introduction
- 3 Conclusion.....
- 4 Références bibliographiques

EVALUATION ECONOMIQUE ET FINANCIERE D'UN SCENARIO DE ROUTE AUTOMATISEE ET D'UN SCENARIO D'ATELAGE ELECTRONIQUE DE POIDS LOURDS : SECONDE APPROCHE

- 1 Résumé
- 2 L'étude économique du scénario autoroute automatique poids lourds, étude d'un scénario crédible.....
- 3 La méthode d'étude.....
- 4 Les résultats
- 5 L'incidence du projet sur la rentabilité des entreprises de transport routier, et les différents coûts externes
- 6 Le réalisme social des scénarios.....

7 Conclusion.....

ANNEXE : R-SHIFT-R, COMBINE CLASSIQUE ET RAPL : CAPACITE, COUTS - NOTE DE TRAVAIL

PARTIE 4 : PREMIERES REACTIONS DES CHAUFFEURS ROUTIERS AU CONCEPT DE LA ROUTE AUTOMATISEE

Partie 1 : LE CONTEXTE : LE METIER DE CHAUFFEURS ROUTIERS

Partie 2: PERCEPTIONS / EVALUATIONS DU CONCEPT D'AUTOROUTE AUTOMATISEE ET DES TROIS SCENARII

1. Réactions à l'idée générale « d'une autoroute automatisée réservée aux poids lourds »
2. Le scénario d'autoroute automatisée
3. Les 2 scenarii d'attelage

RESUME DES TRAVAUX

L'avenir du système de transport pendant le XXI^{ème} siècle fait l'objet de deux interrogations majeures¹. **Sera-t-il capable de supporter de manière durable la croissance économique prévisible ? Son évolution pourra-t-elle devenir compatible avec les objectifs de développement durable désormais adoptés par la majeure partie de la communauté internationale ?**

L'hypothèse de travail sous-jacente à la présente réflexion est que la recherche peut aider à construire une telle cohérence en menant une approche « système ». Le point de départ de notre réflexion est de constater que les technologies (maîtrisées ou maîtrisables à court terme) permettent de reconfigurer, de « reformater », la conception que l'on peut avoir des systèmes de transport existants et donc de l'offre qui en découle.

- L'un des premiers facteurs de changement tient à l'ensemble des outils de traitement de l'information. Il est possible de parler aujourd'hui de véhicule intelligent, en ce sens que ceux-ci sont dotés ou peuvent être dotés de capacités de calcul, d'optimisation, et de simulation. Il est également évident que les puissances de calcul disponibles permettent de gérer des situations de plus en plus complexes, les simuler, etc...
- Un second facteur tient à la disponibilité d'outils de communication fiables, et d'outils de positionnement et de communication satellitaires. Cela signifie que l'on sait positionner – donc suivre – des véhicules, et communiquer avec eux, c'est à dire avec leurs passagers, leurs ordinateurs, leurs cargaisons...
- Un troisième facteur tient à la disponibilité d'outils de détection fiables ou susceptibles de l'être permettant par exemple la détection d'obstacles.

L'intégration de ces potentialités permet de concevoir une évolution radicale des systèmes de transport. Elle doit permettre le développement d'automatismes et une modification radicale de la gestion des flux.

L'étude a été menée par une équipe pluri-disciplinaire d'une douzaine de chercheurs de différents instituts. Une brève synthèse des travaux est donnée ci-dessous.

¹Voir en particulier « La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix », Commission des Communautés Européennes, Septembre 2001

Quelle forme pour la Route Automatisée PL ?

Cette partie de l'étude vise à définir la forme que peut prendre une route automatisée pour Poids Lourds. Une question surgit immédiatement : faut-il envisager l'aménagement de voies existantes ou prévoir un nouveau réseau dédié au concept.

Dans ce cadre, trois formes de RA pour PL sont identifiées :

- La réservation d'une voie existante associée à une modulation spatio-temporelle ;
- L'adjonction au réseau existant d'une voie supplémentaire
- La réalisation d'un nouveau réseau routier dédié au concept d'automatisation des PL

Les avantages et inconvénients de chaque forme de RAPL sont inventoriés. Suite à cet exercice, la solution préconisée est la construction d'un réseau autoroutier indépendant et dédié à l'automatisation des Poids Lourds.

Enfin, la présente étude est ponctuée par une estimation du coût d'une nouvelle infrastructure dédiée aux PL automatisés. Les hypothèses de cadrage s'appliquent à l'axe Calais – Bayonne long de 1020 Km avec un profil en travers de **2 × 1 voie** (3,5 m de largeur) et une bande d'arrêt d'urgence (3 m de largeur) pour chaque sens de circulation.

Les scénarios d'étude

L'infrastructure projetée est une autoroute dédiée au trafic poids lourd constituée pour chaque sens d'une voie de roulement et d'une BAU servant de voie d'accélération/décélération pour les entrées-sortie et de voie en conduite manuelle dans le cas d'un mode dégradé. Les voies s'apparentent à une voirie conventionnelle pour une circulation de poids lourds.

L'autoroute PL imaginée s'étend sur un millier de kilomètres depuis la frontière espagnole jusqu'à la frontière belge. Elle est dotée de 8 échangeurs qui la connectent avec les grands axes qui lui sont perpendiculaires. Ceux-ci permettant de collecter et de diffuser le trafic depuis et vers les grands centres de production et de consommation. Les véhicules y circulent à 110 km/h. Nous avons considéré trois scénarios :

- **Un scénario d'attelage électronique de poids lourds en statique** : des convois de poids lourds sont formés sur des aires spécialisées.
- **Un scénario d'attelage électronique de poids lourds en dynamique** : des convois sont formés en roulant sur la voie de circulation
- **Un scénario de route automatisée** : les PL s'insèrent individuellement sur l'autoroute automatisée.

Dans les trois cas, à degrés divers, le nouveau système permet d'augmenter le débit maximum de l'infrastructure, d'améliorer la sécurité et de dispenser pour tous (scénario 3) ou pour partie (scénarios 1 et 2) les chauffeurs de l'activité de conduite.

Capacité et sécurité d'une Route Automatisée Poids Lourds ?

Cette section a pour objectif d'examiner l'apport de l'automatisation des flux de PL au regard des critères de capacité et de sécurité. Un modèle des circulations a été construit à partir des données techniques attendues sur les véhicules et leur cinématique comme le temps de réaction, la longueur du véhicule, le freinage maximal, la vitesse de mobilisation de la capacité de freinage, l'accélération maximale, la précision sur le freinage, la vitesse du poids lourd avant le freinage, la précision sur la mesure des vitesses ainsi que la distance d'arrêt entre les véhicules... Fondée sur ce modèle, différentes valeurs de compromis capacité-sécurité atteignables sont identifiées.

Différentes grandes évolutions ou scénarios ont été étudiés :

- Evolution des longueurs et charge des PL
- Voie dédiée, PL en conduite manuelle : scénario de référence
- Voie dédiée, Convois
- Voie dédiée, PL automatisés autonomes

Fiabilité et fonctions critiques

L'étude préliminaire de sécurité vise d'une part à déterminer les objectifs de sécurité, en terme de fiabilité, que la conduite automatique intégrale d'un poids lourd sur autoroute française devra atteindre et, d'autre part, à déterminer les parties fonctionnelles critiques de ce système. Dans ce cadre, l'intervention du facteur humain pour la conduite automatique intégrale n'a pas été prise en compte. Deux points clés ont été spécialement abordés :

- Etude de l'interdistance comme exemple de fonction clé
- Système de prédiction de pannes de capteurs

Exemples de systèmes proches

Trois exemples de systèmes proches ont été examinés : Chauffeur2, Safe-Tunnel, ERTMS.

Régulation des réseaux

L'objectif de cette étude préliminaire est de développer quelques éléments de réflexion concernant l'insertion de nouveaux véhicules sur une voie de circulation automatisée pour Poids Lourds. Il s'agit ici d'évaluer, en terme de coût (espace occupé) et de performance (capacité), l'insertion de véhicules dans un flot de véhicules automatisés, en respectant les impératifs de sécurité.

L'apport d'une simulation dynamique

Le travail a consisté à définir différents scénarios pour le trafic poids lourds et à écrire les simulateurs correspondants. Ces scénarios vont du système actuel contrôlé à l'automatisation complète des poids lourds.

L'économie du projet

L'étude économique a été menée par deux équipes en parallèle. D'un côté, une étude a été menée par le Bureau EMC par Emmanuel MARIN et Richard Darbéra, de l'autre une étude a été menée par Patrice Salini de l'Inrets. Ces deux approches reposent sur certaines hypothèses communes (relatives par exemple au coût des infrastructures, et le volume de trafic actuel concerné), mais diffèrent relativement dans le cheminement de l'analyse par les choix pratiques et théoriques opérés, mais aussi en fonction des outils utilisés pour projeter les trafics et la situation du marché. Les méthodes d'actualisation diffèrent également, le principe retenu est d'un côté l'actualisation au jour du début des travaux (EMC), de l'autre une actualisation en valeur « 2004 » (Salini), intégrant donc la période d'étude dans les calculs.

Etude qualitative exploratoire des attitudes des chauffeurs « grands routiers »

Cette étude qualitative avait donc pour but de répondre aux interrogations suivantes :

- Faire le point sur les représentations, les comportements, les attitudes et les attentes des chauffeurs "grands" routiers vis-à-vis de leur métier et de la façon dont ils l'exercent.
- Déterminer la pertinence et la valeur d'attractivité du concept de "route automatisée pour poids lourds" du point de vue des cibles.

Pour répondre aux objectifs d'étude exploratoire de la perception et des représentations générées par les trois scénarii possibles - et compte tenu des caractéristiques de la cible : des chauffeurs routiers par définition en déplacements constants donc difficiles à réunir -, nous avons eu recours à des entretiens semi-directifs approfondis. Ils ont été menés en face à face, par des psychosociologues expérimentées et sur la base d'un guide thématique préétabli. Quinze entretiens semi-directifs ont eu lieu quatre en région parisienne (Rungis) et onze en province (Orléans / Sarran) dans des centres routiers à proximité du tracé supposé de la future autoroute dédiée.

Route automatisée aux USA

Ce rapport couvre les aspects de l'automatisation du transport routier en Amérique du Nord. L'ensemble du rapport aborde les sujets suivants, avec les points clés résumés dans ce document :

- Le contexte des flux de transport de marchandises aux USA
- Le contexte de l'exploitation du transport routier de marchandises aux USA dans l'environnement actuel

- Le potentiel des voies poids lourds aux USA
- Etude de cas : le transport routier automatisé dans la région de Chicago
- Vers l'automatisation de l'exploitation du transport routier : solutions et questions
- Autres activités concernant l'automatisation des poids lourds aux USA
- Débat et conclusion.

SYNTHESE

L'avenir du système de transport pendant le XXI^{ème} siècle fait l'objet de deux interrogations majeures². **Sera-t-il capable de supporter de manière durable la croissance économique prévisible ? Son évolution pourra-t-elle devenir compatible avec les objectifs de développement durable désormais adoptés par la majeure partie de la communauté internationale ?**

Un objectif de « découplage » entre la croissance économique et celle de la mobilité en général – et celle des marchandises en particulier – a été mis en avant par la Commission. Véritable défi, ce processus permettant de produire et consommer plus sans transporter plus, est encore largement à inventer et peut mettre relativement longtemps à produire des effets.

Il faut bien se résoudre par conséquent à mettre en œuvre un ensemble de stratégies permettant de contribuer de manière positive aux objectifs de développement durable.

Parmi ces stratégies, ce qu'on appelle traditionnellement des « stratégies d'offre³ » ont un rôle essentiel à moyen et long termes. Elles consistent à considérer qu'au-delà des variables d'action tarifaires (taxation...) et réglementaires, la modification du système de transport passe par une offre de transport nouvelle. Elles supposent généralement une augmentation de la capacité de transport, augmentation qui suppose généralement des infrastructures nouvelles.

Quelles infrastructures construire, quelles normes édicter, quelles technologies et quels systèmes techniques développer... telles sont les questions centrales qui permettent de définir une stratégie d'offre.

Tout indique en effet que certains choix ont une incidence plus que séculaire. Il est clair par exemple que les normes dimensionnelles (comme la largeur des véhicules), les gabarits ferroviaires ou fluviaux, les systèmes de signalisation et d'exploitation, les modes d'électrification des réseaux ferroviaires ou encore la standardisation automobile, ont structuré durablement et structureront encore pendant de nombreuses années les conditions d'exploitation des transports. Et nous savons que les changements, comme la mise en œuvre de l'interopérabilité ferroviaire, l'unification des systèmes de navigation aérienne, ou encore la modification des normes des unités de transport intermodales..., constituent des tâches longues, coûteuses et ardues. Elles reflètent le coût de la non-standardisation a priori ou celui d'absence de stratégie globale. Et les délais de transformation du système ne sont pas seulement inhérents à la transformation des systèmes techniques et des processus de production. Ils doivent également compter avec la sociologie du secteur, et les rapports entre les transports et leur environnement.

Une stratégie efficace doit donc largement anticiper ces différents mécanismes et prendre largement en compte les processus de mutation des systèmes de transport. Elle doit en outre tenter de construire d'emblée le maximum de cohérence.

²Voir en particulier « La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix », Commission des Communautés Européennes, Septembre 2001

³ L'idée est qu'il faut agir sur l'offre – donc les infrastructures, les systèmes de transport et leurs caractéristiques – pour changer de manière significative l'organisation des transports.

L'hypothèse de travail sous-jacente à la présente réflexion est que la recherche peut aider à construire une telle cohérence en menant une approche « système ». Il ne s'agit pas (ou pas seulement) d'évaluer ici des innovations « incrémentales » qui permettraient d'améliorer les performances du système de transport, mais d'étudier de nouveaux concepts globaux qui peuvent changer de manière radicale la nature des modes de transport telle que nous la connaissons.

Le point de départ de notre réflexion est de constater que les technologies (maîtrisées ou maîtrisables à court terme) permettent de reconfigurer, de « reformater », la conception que l'on peut avoir des systèmes de transport existant et donc de l'offre qui en découle.

- L'un des premiers facteurs de changement tient à l'ensemble des outils de traitement de l'information. Il est possible de parler aujourd'hui de véhicule intelligent, en ce sens que ceux-ci sont dotés ou peuvent être dotés de capacités de calcul, d'optimisation, et de simulation. Il est également évident que les puissances de calcul disponibles permettent de gérer des situations de plus en plus complexes, les simuler, etc...
- Un second facteur tient à la disponibilité d'outils de communication fiables, et d'outils de positionnement et de communication satellitaires. Cela signifie que l'on sait positionner – donc suivre – des véhicules, et communiquer avec eux, c'est à dire avec leurs passagers, leurs ordinateurs, leurs cargaisons...
- Un troisième facteur tient à la disponibilité d'outils de détection fiables ou susceptibles de l'être permettant par exemple la détection d'obstacles.

L'intégration de ces potentialités permet de concevoir une évolution radicale des systèmes de transport. Elle doit permettre le développement d'automatismes et une modification radicale de la gestion des flux.

L'étude a été menée par une équipe pluri-disciplinaire d'une douzaine de chercheurs de différents instituts. Une brève synthèse des travaux est donnée ci-dessous. Le plan de cette synthèse suit presque complètement le plan des rapports détaillés dont on donne l'ordre et les sommaires à la suite de cette synthèse. On y trouvera les rubriques suivantes :

1ÈME PARTIE :

- L'autoroute automatique poids lourds et le transport routier en France – aspects socio-économiques : Patrice SALINI (INRETS)
- Choix de l'infrastructure pour des scénarios de déploiement de la route automatisée pour poids lourds : Fahim BELARBI (Cofiroute) & Mathilde FERNIER (ATEME)
- Les Scénarios de déploiement du concept RAPL : Emmanuel MARIN (EMC)

2ÈME PARTIE :

- Les compromis en terme de capacité et sécurité (LIVIC)
- Analyse a priori de la fiabilité du système (INRETS/ESTAS, CNRS/LAIL),
- Exemple de systèmes proches (ESE/LCPC)
- La régulation du système (CNRS)

- La simulation dynamique des scénarios (INRIA)

3ÈME PARTIE :

- Evaluation économique de l'autoroute automatique poids lourds : synthèse : Patrice SALINI (INRETS)
- Segmentation et prospective de la demande en transport de marchandises : Emmanuel Marin (EMC)
- L'entreprise de transport et ses chauffeurs face à la route automatisée : Emmanuel Marin (EMC)
- Evaluation économique et financière d'un scénario de route automatisée et d'un scénario d'attelage électronique de poids lourds : Première approche : Emmanuel MARIN (EMC) & Richard DARBERA (ENPC)
- Evaluation économique et financière d'un scénario de route automatisée et d'un scénario d'attelage électronique de poids lourds : Seconde approche : Patrice SALINI (INRETS)
- Annexe : Note de travail R-SHIFT-R : Patrice SALINI (INRETS)

4ÈME PARTIE :

- Premières réactions des chauffeurs routiers au concept de la route automatisée (Yvette ORENGO)

1 QUELLE FORME POUR LA ROUTE AUTOMATISEE PL ?

Cette partie de l'étude vise à définir la forme que peut prendre une route automatisée pour Poids Lourds. Faut-il envisager l'aménagement de voies existantes ou prévoir un nouveau réseau dédié au concept.

Dans ce cadre, trois formes de RA pour PL sont identifiées :

- La réservation d'une voie existante associée à une modulation spatio-temporelle ;
- L'adjonction au réseau existant d'une voie supplémentaire
- La réalisation d'un nouveau réseau routier dédié au concept d'automatisation de la conduite

Les avantages et inconvénients de chaque forme de RAPL sont inventoriés. Suite à cet exercice, la solution préconisée est la construction d'un réseau autoroutier indépendant et dédié à l'automatisation des Poids Lourds. Ceci permet de s'affranchir de plusieurs contraintes telles que la mixité du trafic (manuel / automatique) et des aménagements lourds aux entrées / sorties des autoroutes.

De surcroît, cette forme de RAPL permet une introduction progressive des véhicules automatisés sur le réseau routier et représente un environnement de test idéal en vue de mettre en place et d'affiner des stratégies d'exploitation adaptées à l'automatisation des poids lourds (ex : contrôle d'accès,...).

A partir de la solution retenue, cette étude aborde l'expression générale des besoins du point de vue du gestionnaire de la future infrastructure : les caractéristiques géométriques de la chaussée, la signalisation fixe, les dispositifs de sécurité et de détection d'incidents à prévoir, les mesures d'exploitation à mettre en œuvre.

L'automatisation devra reposer essentiellement sur l'intelligence embarquée des véhicules. L'infrastructure jouerait le rôle de relais et fournirait, comme pour les autoroutes actuelles, des informations en temps réel sur les conditions de circulation et les événements prévalant sur la totalité du réseau.

L'exploitant de la route automatisée continue à assurer les missions de gestion de trafic, de maintien de la viabilité et d'aide au déplacement des PL automatisés. Cependant, l'infrastructure ne peut en aucun cas exercer une influence directe et continue sur le comportement de ces véhicules.

Dans cette analyse, des enjeux, du point de vue de l'exploitant autoroutier, sont identifiés :

- Une évolution du cadre législatif actuel (ex : contrat de concession) afin de tenir compte des spécificités liées au fonctionnement d'une RAPL ;
- Une revue du Schéma Directeur de la Route en vue de l'ajout d'un nouveau niveau d'exploitation associé à cette infrastructure dédiée ;
- L'engagement d'un exploitant d'une RAPL à mettre en œuvre tous les moyens en sa possession pour maintenir la continuité du trafic de PL automatisés dans de bonnes conditions de sécurité.

Enfin, la présente étude est ponctuée par une estimation du coût d'une nouvelle infrastructure dédiée aux PL automatisés. Les hypothèses de cadrage s'appliquent à l'axe Calais – Perpignan faisant

environ 1020 Km de longueur avec un profil en travers de **2 × 1 voie** (3,5 m de largeur) et une bande d'arrêt d'urgence (3 m de largeur) pour chaque sens de circulation.

2 LES SCENARIOS D'ETUDE

L'infrastructure projetée est une autoroute dédiée au trafic poids lourd constituée de deux fois une voie de roulement de 3,50 m plus une BAU servant de voie de service et de voie en conduite manuelle dans le cas d'un mode dégradé. Les voies s'apparentent à une voirie conventionnelle pour une circulation de poids lourds.

L'autoroute PL imaginée s'étend sur un millier de kilomètres depuis la frontière espagnole jusqu'à la frontière belge. Elle est dotée de 8 échangeurs qui la connectent avec les grands axes qui lui sont perpendiculaires. Ceux-ci permettant de collecter et de diffuser le trafic depuis et vers les grands centres de production et de consommation. Les véhicules y circulent à 110 km/h. Nous avons considéré trois scénarios :

- **Un scénario d'attelage électronique de poids lourds en statique** : des convois de poids lourds sont formés sur des aires spécialisées. Un convoi est composé d'un premier PL conduit manuellement, les autres sont en attelage électronique (conduite automatisée alignée sur le premier PL). Ils peuvent ensuite s'insérer sur l'autoroute. Les convois sont indéformables en section courante. La règle de formation est la suivante : les PL qui pénètrent l'aire d'attelage au fil de l'eau sont regroupés en convois pour les destinations qui concernent les sorties en aval. Pour l'étude les convois ont été limités à 4 PL. Le temps d'attente est limité à quelques minutes. Au delà du temps d'attente, les convois inférieurs à 4 PL sont introduits sur l'autoroute. Pour se désolidariser, le convoi de poids lourds doit rejoindre l'aire spécialisée où se réalisera le désattelage.
- **Un scénario d'attelage électronique de poids lourds en dynamique** : Les poids lourds s'insèrent individuellement en conduite manuelle directement sur l'infrastructure. Les convois sont ensuite constitués dynamiquement sur l'autoroute à vitesse de croisière. Les PL sont autorisés à pratiquer des différences de vitesse de 10 km/h de façon à autoriser le rattrapage et à former des convois. Le convoi obéit à la même définition que dans le scénario 1. On pourrait prévoir un système plus communiquant que dans le cas précédent qui favorise des « rendez-vous » entre poids lourds de manière à optimiser la composition des convois.
- **Un scénario de route automatisée** : les PL s'insèrent individuellement sur l'autoroute automatisée. Les PL circulent tous en mode automatisé à distance du PL précédant et à vitesse décidés par le gestionnaire de l'autoroute. On ne circule pas en convoi mais plutôt en utilisant tout l'espace disponible (éloignement maximum entre PL). Les automatismes prennent la main sur le chauffeur et ce avant l'insertion du poids lourd sur l'infrastructure. Le système organise la génération de créneaux permettant aux véhicules entrants de s'insérer. Les systèmes embarqués pilotent l'insertion, la conduite puis la sortie des poids lourds de l'infrastructure.

Dans les trois cas, à degrés divers, le nouveau système permet d'augmenter le débit maximum de l'infrastructure, d'améliorer la sécurité et de dispenser pour tous (scénario 3) ou pour partie (scénarios 1 et 2) les chauffeurs de l'activité de conduite.

Concernant le déploiement dans le temps des divers scénarios, il est envisagé de n'accepter sur l'autoroute automatisée que les PL équipés. Toutefois, les scénarios 1 et 2 pourraient tolérer des véhicules non équipés.

3 CAPACITE ET SECURITE D'UNE ROUTE AUTOMATISEE POIDS LOURDS ?

Cette section a pour objectif d'examiner l'apport de l'automatisation des flux de PL au regard des critères de capacité et de sécurité. Un modèle des circulations a été construit à partir des données techniques attendues sur les véhicules et leur cinématique comme le temps de réaction, la longueur du véhicule, le freinage maximal, la vitesse de mobilisation de la capacité de freinage, l'accélération maximale, la précision sur le freinage, la vitesse du poids lourd avant le freinage, la précision sur la mesure des vitesses ainsi que la distance d'arrêt entre les véhicules... Fondée sur ce modèle, différentes valeurs de compromis capacité-sécurité atteignables sont identifiées.

Différentes grandes évolutions ou scénarios ont été étudiés :

Evolution des longueurs et charge des PL

L'étude de l'impact de l'évolution des poids lourds en terme de longueur et de charge sur la capacité et la consommation montre qu'il est possible d'atteindre des gains respectifs de l'ordre de 2.5% et 6%.

Voie dédiée, PL en conduite manuelle : scénario de référence

A partir d'un scénario de référence, le modèle permet ainsi d'identifier l'influence des différents paramètres entrant en jeu (longueur des véhicules, temps de réaction, précision des vitesses, dispersion des capacités de freinage...) dans le calcul des gains en capacité.

On appelle ici scénario de référence un choix particulier de paramètres permettant de reproduire des valeurs de capacité proche de ce que serait une circulation en conduite manuelle une voie autoroutière qui serait spécialisée poids lourds. La capacité maximale obtenue est de 990PL/heure pour une vitesse de 90km/h.

Voie dédiée, Convois

Dans le cas du scénario « convois en statique », nous avons montré que la capacité de 1800véh/h à 110km/h satisfait la contrainte de sécurité maximale : seul le premier convoi (4 PL) est impliqué dans une collision avec obstacle fixe. Au-delà de cette capacité, beaucoup plus de PL seraient impliqués dans le cas d'un premier accident sur obstacle fixe (14 à 2600pl/h).

La mise en convoi des PL permet un gain additionnel en consommation obtenu grâce à la réduction de la turbulence de l'écoulement d'air. Pour un convoi donné, ce gain est de l'ordre de 7% pour le PL de tête et de 17% pour les 3 PL qui suivent. Le gain global est donc de 14.25%. Rappelons que ce gain en consommation vient s'ajouter au gain déjà obtenu du fait de l'évolution des PL en termes de dimensions et de tonnages.

Voie dédiée, PL automatisés autonomes

Les résultats obtenus sont comparables à ceux du scénario précédent puisque le nombre de collisions est de 4 à la même capacité (1800 v/h) et à la même vitesse. A la différence des scénarios « convois »

pour lesquels un accident grave sacrifie un convoi (4PL), le nombre de PL impliqués dans une collision avec un obstacle fixe pour des capacités légèrement inférieures à 1800v/h décroît rapidement de 4 vers 0.

4 FIABILITE ET FONCTIONS CRITIQUES

Etude préliminaire de sécurité de convois de camions

L'étude préliminaire de sécurité vise d'une part à déterminer les objectifs de sécurité, en terme de fiabilité, que la conduite automatique intégrale d'un poids lourd sur autoroute française devra atteindre et, d'autre part, à déterminer les parties fonctionnelles critiques de ce système. Dans ce cadre, l'intervention du facteur humain pour la conduite automatique intégrale n'a pas été prise en compte.

Après avoir donné la méthode d'évaluation, elle a été appliquée à notre cas d'étude. Les objectifs de sécurité selon le principe G.A.M.E. (Globalement Au Moins Equivalent) utilisé dans le domaine ferroviaire en France ont été appliqués. **L'objectif minimal selon ce principe évalué pour 100 km de voie équipée est de $2,13 \cdot 10^{-3}$ collision/heure/100km soit 11,5 collision/an/100km de route automatisée.** Cet objectif correspond exactement au taux d'accidents et de victimes obtenus sur le réseau autoroutier actuel. Un objectif plus ambitieux consiste à réduire ce taux à $1,46 \cdot 10^{-4}$ de façon à le ramener proche des systèmes actuels de transport en commun.

L'architecture fonctionnelle a été réalisée en s'arrêtant à un niveau fonctionnel relativement haut afin de prévenir toute orientation vers une architecture matérielle qui est du ressort du concepteur. Sur la base de cette architecture fonctionnelle, l'analyse et l'évaluation des risque sous forme d'A.M.D.E.C. a été construite.

Cette approche a permis de définir **un besoin important de capteurs longue portée qui préviendraient d'un obstacle arrêté sur la voie.** Etant donné les possibilités technologiques actuelles, seuls les capteurs de type vision ont un prisme de détection capable d'atteindre les objectifs énoncés mais ont une portée de détection efficace moindre que la distance de freinage sur chaussée mouillée. Sans progrès significatif dans le domaine de la détection efficace à longue portée, il est recommandé que la vitesse maximale des poids lourds en conduite automatique sur chaussée mouillée soit diminuée.

Hormis, les fonctions liées à l'acquisition de l'environnement et à leur traitement qui reste à analyser, cette A.M.D.E.C. a fait ressortir clairement des besoins forts en sécurité pour tous les organes du poids lourd gérant la conduite. La solution en cas de danger détecté étant le freinage d'urgence, tous les traitements et équipements liés à la réalisation d'un freinage d'urgence devront être plus particulièrement sûrs de fonctionnement. Excepté le poids lourd, d'autres fonctions plus liées à l'infrastructure au sens général sont à prendre en compte au niveau de la sécurité comme les fonctions dédiées à aider le poids lourds à se localiser et à recevoir et émettre des données de communications vers les gestionnaire d'infrastructure et la gendarmerie.

Etude de l'interdistance comme exemple de fonction clé

Quel que soit le scénario choisi pour la RAPL, la fonction de gestion de l'interdistance est essentielle à la sécurité. Que les véhicules soient en convoi ou en mode automatique, il est important de conserver une distance de sécurité entre les véhicules. Notre objectif dans cette étude est de savoir si les mêmes conditions de sécurité que celles offertes sur la route actuelle peuvent être atteintes lorsque la gestion de l'interdistance (perception et contrôle) est réalisée par un système automatique. Partant du risque moyen de collisions sur les autoroutes actuelles, notre étude nous permet de proposer une architecture matérielle (utilisant des composants actuellement disponibles) susceptible de répondre à ces contraintes sécuritaires dans le cas où l'interdistance serait contrôlée par un système automatique.

La fonction "perception d'interdistance" inclut les sous-systèmes : mesure de l'interdistance (à l'aide de capteurs passifs tels les caméras ou de capteurs actifs tels les radars), mesure de la vitesse propre et signalisation du danger. Pour privilégier l'aspect sécuritaire, nous avons considéré que chacun des trois éléments avait un taux de défaillance (nombre de défaillances par heure) identique et égal à celui de l'élément le moins fiable : le capteur d'interdistance. Nous montrons alors **qu'il est a priori possible d'atteindre technologiquement l'objectif de fiabilité fixé** dans la mesure où il existe déjà sur le marché des capteurs d'interdistance (radar, lidar, ...) répondant à des exigences encore plus fortes. Cependant, afin d'éviter les effets des défaillances "externes" (conditions climatiques par exemple) il est nécessaire d'avoir une redondance des moyens de mesure c'est à dire d'implanter plusieurs capteurs de technologies différentes qui ne sont pas sensibles aux mêmes défaillances.

Dans la dernière partie du document, nous considérons la fiabilité du système d'asservissement de l'interdistance fondé sur trois composants ne possédant pas de mode commun critique: la panne d'un seul composant peut conduire au désengagement automatique du système (avec une poursuite de la conduite en mode manuel) et seule la défaillance simultanée de deux composants conduit à une situation à risque avec un comportement dangereux du véhicule.

Système de prédiction de pannes de capteurs

L'objectif des travaux présentés est d'augmenter la sécurité d'un système par l'ajout d'une connaissance qui permet de prédire les anomalies de ses capteurs. Le comportement d'un système est généralement observé par un ensemble d'instruments de mesure. L'information de prédiction sera calculée directement à partir d'un traitement temps-réel des signaux de mesure. Cette information de prédiction permet au système de commande de faire de l'anticipation pour l'application de procédures d'urgence afin que le système reste dans un état fonctionnel sûr. Pour élaborer cette information de prédiction, le principe que nous utilisons est basé sur une extrapolation dans le temps d'un modèle de tendance obtenu par une régression linéaire. Une approche par intervalles est utilisée pour l'estimation des coefficients de la régression. L'information de prédiction délivrée par cette approche représente la durée qui reste au système pour qu'il sorte de son état de fonctionnement nominal. Cette prédiction permet aussi d'évaluer les performances temporelles de la reconfiguration du système dans le cas où ses capacités temporelles de réaction sont connues.

5 EXEMPLES DE SYSTEMES PROCHES

Trois exemples de systèmes proches ont été examinés : Chauffeur2, Safe-Tunnel, ERTMS.

Chauffeur 2

Chauffeur2 est un projet européen (mené par Daimler-Chrysler) ayant pour objectif la mise en convoi de camions. Un convoi est composé d'un premier véhicule conduit manuellement (aidé par des assistances), les autres étant en attelage électronique derrière le véhicule de tête. Le projet a été terminé en 2003 en ayant fait la preuve de l'automatisation possible des camions.

La mise en convoi repose sur deux types de manœuvres : le couplage et le découplage de poids lourds. Celles-ci ont été étudiées en dynamique sur un convoi constitué de 3 véhicules.

- Couplage

La vitesse du véhicule de tête est supposée constante et inférieure à 50 km/h. Dès que le véhicule suiveur est suffisamment proche du véhicule placé en tête de file, on considère que le couplage est réalisé. Une fois que ce raccordement est établi, cette opération peut alors se reproduire avec le troisième véhicule jusqu'à obtention du convoi.

- Découplage

Les manœuvres de découplage ont été étudiées à des vitesses inférieures à 90km/h.

La réalisation d'un convoi repose sur les fonctions suivantes :

- conservation d'une inter-distance mesurée par deux types de dispositifs : radar et système coopératif associant caméra placée dans le véhicule suiveur et LED infra-rouge placées à l'arrière du PL suivi.
- communication entre les différents PL : il est nécessaire que chaque véhicule couplé possède en temps réel des informations sur les véhicules suivis. En particulier, il est important de connaître, quasi instantanément, l'instant de freinage du véhicule de tête, ses angles de braquages, sa vitesse, son accélération et décélération, etc.

SAFE TUNNEL

Ce projet de recherche a pour but de sécuriser la traversée des poids lourds dans les tunnels notamment en évitant les défaillances mécaniques des véhicules (notamment celles pouvant conduire à une situation d'incendie. Les systèmes suivants ont été étudiés :

- Contrôle des pneumatiques

Le produit, développé par Michelin et WABCO, est un système qui permet de mesurer en temps réel la pression des pneus pour différents types de véhicules utilitaires (tracteurs, poids-lourd, autocars, semi-remorque, ...). Le système ITVM qui a pour but d'identifier les différentes fuites du pneumatique et avertir en temps utile le conducteur complète le dispositif. Dès qu'une valeur critique est atteinte, le conducteur en est instantanément informé grâce à un affichage sur le tableau de bord et une alerte sonore.

- Les systèmes de freinage

Au sein de SAFETUNNEL, c'est l'EBS (Electronic Braking System) qui a été intégré dans le démonstrateur. L'EBS est un système de freinage qui réduit de manière significative les distances d'arrêt. : un poids-lourds roulant à 90km/h réduit sa distance d'arrêt de 2.5m comparativement à un poids-lourd non équipé de ce système.

- Les systèmes de suspension

ECAS (Electronically Controlled Air Suspension) a pour objectif de commander électroniquement les suspensions afin de maintenir la bonne assiette du véhicule.

- Les systèmes de radar et d'ACC (Adaptive Cruise Control)

L'ACC permet de réguler automatiquement la vitesse du véhicule en agissant sur le moteur mais aussi sur le freinage. Grâce à ce système, le véhicule est alors capable d'adapter sa vitesse au véhicule précédent. D'un point de vue technologique, l'ACC repose sur un radar à micro-ondes. Pour réaliser cette fonction, le démonstrateur a été instrumenté avec le radar A.D.C. ARS100

- Communication véhicule&infrastructure

SAFE TUNNEL a mis en œuvre un concept de communication bidirectionnel du diagnostic de l'état du véhicule à l'infrastructure. SAFE TUNNEL est capable d'identifier via l'infrastructure, les différents paramètres du véhicule présentant une quelconque anomalie. Une fois les données obtenues, le conducteur et le centre de commande sont informés du diagnostic : les véhicules potentiellement dangereux sont identifiés, les opérateurs de tunnels peuvent alors en refuser l'accès. En cas de détection d'une défaillance du véhicule à l'intérieur du tunnel, le conducteur en est immédiatement informé via une alerte . Celui-ci peut alors immobiliser son véhicule sur une aire de secours ou une aire de stationnement et attendre les informations du centre de commande qui connaît en temps réel la position du véhicule en difficulté.

Les dispositifs de mesure implantés sur l'infrastructure permettent en outre de fournir des éléments d'information sur l'état du trafic. Le conducteur est informé de la vitesse et de la distance de sécurité à respecter.

ERTMS

L'objectif de ce chapitre vise à présenter les acquis dans le domaine ferroviaire et leurs éventuelles utilisations pour la gestion et la commande du trafic de la future autoroute automatisée poids lourds. Celles-ci pourraient s'inspirer de l'exploitation et de la gestion de la sécurité ferroviaires à l'échelle européenne. En effet la description du projet ERTMS, European Rail Traffic Management System, montre ici qu'il y a beaucoup de points communs, en terme de sécurité anticollision, entre l'exploitation ferroviaire et l'exploitation des camions ou convois de camions de la future autoroute automatique.

Dès la réalisation des premiers chemins de fer, il est apparu indispensable de réaliser un système de signalisation permettant la communication entre l'infrastructure et le matériel roulant. Ce système permettant de transmettre au conducteur à bord des trains, des autorisations de marche ou d'arrêt. Le système au sol a connaissance, en permanence, de la continuité et de la libération des voies, conditions essentielles pour assurer la sécurité des circulations. Cela conduit à réaliser certaines fonctions fondamentales à savoir :

- La localisation des trains ;
- La protection des trains se suivant sur une même voie ;
- La répétition à bord des trains des indications des signaux ;
- La concentration de la commande des aiguilles d'une même zone d'appareils de voie et la réalisation des enclenchements, qui sont à la base des postes d'aiguillage.

Dans le concept le plus avancé, ces fonctions permettent

L'auto-localisation des trains par combinaison d'informations provenant de balises fixes communicantes disposées sur les voies

- radars embarqués donnant une mesure d'odométrie
- communications entre trains et centre de surveillance

L'auto-protection des trains se suivant sur une même voie réalisée sur la base ;

- informations de régulation provenant du centre de surveillance (du type : vitesse but de x km/h à distance but y)
- indications de signalisation à bord des trains;
- Fonctions de surveillance des conducteurs au respect des consignes de régulation et et reprise en automatique si nécessaire
- possibilité de déclencher un freinage d'urgence sur une fréquence de sécurité par communication inter-trains, ce déclenchement engendrant l'arrêt de tous les trains circulant sur la même voie.

6 REGULATION DES RESEAUX

Un point clé : l'insertion des véhicules sur la voie automatisée PL

L'objectif de cette étude préliminaire est de développer quelques éléments de réflexion concernant l'insertion de nouveaux véhicules sur une voie de circulation automatisée pour Poids lourds.

Il s'agit ici d'évaluer, en terme de coût (espace occupé) et de performance (capacité), l'insertion de véhicules dans un flot de véhicules automatisés, en respectant les impératifs de sécurité.

Assez généralement, on peut distinguer 5 phases au sein d'une procédure d'insertion d'un véhicule dans un flot⁽⁴⁾:

- manipulation du flot d'entrée en vue de l'insertion,

⁴ B. RAN, S. LEIGHT, R.R. LU et S. JOHNSON, *Merging process analysis for an automated highway system*, ITSP Research Report, University of Wisconsin, 1996.

- communication entre véhicules,
- recherche d'un espace d'insertion,
- manœuvres d'insertion,
- contrôle de la propagation des perturbations du trafic après insertion.

Plusieurs choix stratégiques interviennent, sur la préparation du flux de véhicules en amont, sur le contrôle du flot de véhicule à insérer, sur les manœuvres elles-mêmes de création d'espaces d'insertion, et ces choix sont évidemment tributaires d'informations précises en particulier sur le mode de coopération entre véhicules (véhicules autonomes, coopération faible (uniquement en cas d'urgence), coopération forte, coopération par convois et sur la circulation du flot principal (sa structure, son intensité, mais aussi si elle suit un régime de vitesse homogène, permanent ou quelconque).

Ces informations étant encore à l'heure actuelle largement en débat, il est envisagé dans ce travail de proposer et discuter quelques scénarios assez généraux, en se basant sur des données relatives aux PL.

Deux problèmes sont essentiellement abordés :

- L'aménagement d'espaces d'insertion dans le flot de véhicules sur la voie principale.
- Les règles ou lois de commande pouvant être appliquées au(x) véhicule(s) souhaitant s'insérer dans le trafic principal.

L'apport d'une simulation dynamique

Le travail a consisté à définir différents scénarios pour le trafic poids lourds et à écrire les simulateurs correspondants. Ces simulateurs sont écrits en Scilab et les paramètres principaux peuvent être choisis par l'utilisateur.

Ces scénarios vont du système actuel contrôlé à l'automatisation complète des poids lourds.

La donnée commune pour les différentes situations est un site dédié : une autoroute à une voie avec bande d'arrêt d'urgence. Les vitesses sont de 90 km/h ou 110 km/h et les interdistances sont de 45 m, 50 m ou 60 m selon les scénarios.

Le but de ces scénarios est évidemment d'être utilisés avec des jeux de paramètres différents correspondant à des données réalistes, les résultats étant exploités par des constructeurs d'équipements, des économistes...

De ce point de vue l'intérêt de la simulation est de prendre en compte les phénomènes non stationnaires, les différentes non-linéarités (effet de seuil, retards,...), les erreurs de mesure.

Avant cette utilisation le développement des simulateurs a apporté des indications sur les modes de trafic possibles et leur évolution progressive. L'écriture d'un simulateur nécessite en particulier de bien préciser les variables nécessaires et la manière de les obtenir en pratique (avec les erreurs possibles ou leur absence temporaire).

La situation actuelle améliorée et les 3 scénarios étudiés ont été simulés. Les conclusions résumées sont rapportées ci-dessous :

Situation actuelle améliorée

La conduite reste manuelle et les véhicules indépendants avec la seule contrainte de respecter les interdistances. La simulation pose le problème de l'estimation de l'espace d'insertion sur la voie principale par le chauffeur entrant, ce qui nécessite de prendre des marges de sécurité très larges. Pour résoudre ce problème, la vitesse étant constante, on choisit de réguler les entrées par **un système de contrôle des insertions**. Un feu tricolore à chaque entrée du système autorise ou refuse l'entrée au poids lourd. Ceci signifie qu'un système de détection (portique ou balise) est installé en amont sur la voie de l'autoroute et le feu passe au vert si la distance entre 2 poids lourds est suffisante pour permettre l'insertion d'un véhicule. On propose également une aide à l'insertion avec un profil de trajectoire en vitesse pour avoir la bonne vitesse d'insertion en respectant les distances (rampe d'accès et interdistance). La simulation suggère également de rajouter un autre **système de régulation des interdistances et de vitesse** qui fournit au chauffeur une estimation de l'interdistance pratiquée en lui autorisant une petite modulation de vitesse, ce qui permet d'améliorer considérablement le débit et/ou la sécurité.

Les 3 ajouts techniquement très simples fournissent le premier mode de trafic sur un site dédié vers une automatisation plus complète.

Scénario 1 : Plate-forme de concentration et convois statiques

Ce système sera utilisé pour les entrées dans le scénario suivant. On suppose que les camions arrivent avec un débit de l'ordre de 300 à 400 pl/h à une plateforme ; si cette plateforme est située à une entrée sortie d'autoroute, le débit peut atteindre 600 à 900 pl/h. Chaque camion se positionne dans une file d'attente en fonction de sa destination et/ou de son choix d'aire de repos. Ces files représentent donc des convois qui vont entrer sur la voie autoroutière réservée. Le départ sera déclenché lorsqu'un convoi aura atteint une taille donnée (4 poids lourds) ou lorsque le temps d'attente du premier arrivé dans une file a atteint une limite donnée. Ces convois roulent ensuite à 110 km/h. Dans le convoi la distance entre les véhicules est de 15 m.

Ce scénario pose des problèmes de réglage de paramètres lorsque le trafic d'entrée devient très faible ou lorsque les taux des demandes des destinations sont très différents.

On suppose que chaque entrée du système est alimentée par une plateforme de concentration. Les convois sont séparés par une distance de 150 m. Le camion de tête du convoi est conduit manuellement et les suiveurs sont en automatique. Tous les camions d'un même convoi sortent ensemble.

Les systèmes de commande (feu de régulation, insertion pilotée et information sur les interdistances) du scénario 1 sont indispensables. Ce scénario présente 2 inconvénients : le problème des plateformes de concentration en cas de trafic faible et un problème d'insertion en cas de trafic chargé. Le point le plus délicat concerne l'insertion d'un convoi qui peut atteindre 150 m de long, ce qui nécessite un espace libre très important et qui suggère la nécessité de gérer les distances entre convois.

Scénario 2 : Convois dynamiques

Le système est alimenté comme dans le scénario 1, en manuel avec régulation des entrées mais cette régulation pourra être plus compliquée si on le souhaite. On peut moduler les distances d'insertion suivant les situations : 200 m après un convoi complet sur la voie principale et 100 m si le convoi est

incomplet (car il y a possibilité d'attelage). Les véhicules disposent d'informations sur ceux qui les précèdent. Si un véhicule suit un convoi incomplet et si sa distance avec leur prédécesseur est inférieure à une limite donnée, il peut augmenter sa vitesse, rattraper le véhicule précédent et se mettre en attelage virtuel automatique.

Ce scénario évite les inconvénients des 2 précédents ; c'est une solution très souple, quelle que soit la densité du trafic, qui est la suite logique du scénario 1. Les convois dynamiques peuvent coexister avec des poids lourds isolés non équipés pour l'attelage électronique mais satisfaisant simplement les conditions du scénario 1. Le seul point à régler est l'information de l'acceptation ou refus de l'attelage.

Scénario 3 : Voie automatisée

Dans ce cas un véhicule arrivant à une entrée passe en mode automatique et devient totalement commandé par le système. L'entrée est contrôlée par un feu de trafic. Ce feu est généralement vert car les poids lourds entrant sont prioritaires. Ce feu passe au rouge lorsque, sur la voie principale, ou bien le nombre de poids lourds en phase de freinage atteint un nombre donné, ou bien lorsqu'un poids lourd atteint une vitesse minimale.

Ce scénario est donc une suite naturelle du précédent; son avantage essentiel est de maximiser la sécurité.

7 L'ECONOMIE DU PROJET

Une approche pluraliste

L'étude économique a été menée par deux équipes en parallèle. D'un côté, une étude a été menée par le Bureau EMC par Emmanuel MARIN et Richard Darbéra, de l'autre une étude a été menée par Patrice Salini de l'Inrets. Ces deux approches reposent sur certaines hypothèses communes (relatives par exemple au coût des infrastructures, et le volume de trafic actuel concerné), mais diffèrent relativement dans le cheminement de l'analyse par les choix pratiques et théoriques opérés, mais aussi en fonction des outils utilisés pour projeter les trafics et la situation du marché. Les méthodes d'actualisation diffèrent également, le principe retenu est d'un côté l'actualisation au jour du début des travaux (EMC), de l'autre une actualisation en valeur « 2004 » (Salini), intégrant donc la période d'étude dans les calculs.

Pour autant, ces disparités permettent de confronter les résultats et de formuler un point de vue plus approfondi.

L'horizon

L'étude nécessite l'analyse d'un scénario à long terme (ici 2040 et au delà) en raison même des délais nécessaires pour déployer une autoroute automatique poids lourds. Rappelons ici qu'il convient à la fois de prendre en compte le délai de conception de mise au point et de commercialisation de poids lourds « aptes à l'automatisme », et par ailleurs de construire un axe. Les deux études diffèrent sur le rythme de construction et d'ouverture des tronçons.

Comparer à des situations de référence

La méthode consiste alors à comparer une *situation* « avec autoroute automatique poids lourds » (ou scénario RAPL) à *une situation de référence* d'ici à 2040. La pratique habituelle consiste ici à tester la sensibilité du résultat à différentes hypothèses de croissance économique ou de politique des transports. La base de cette comparaison repose donc sur ce qu'il est convenu d'appeler le *trafic potentiel* de l'autoroute automatique poids lourds, et surtout la sensibilité de ce potentiel à différentes hypothèses de politique de transport. Cette étude est essentielle à la détermination des conditions de rentabilité de la réalisation d'une infrastructure nouvelle.

Le tracé

Ce trafic potentiel dépend fondamentalement du tracé. Celui-ci est dans notre étude un axe Nord-Sud :



Détermination du trafic potentiel

Le potentiel est fondé sur une analyse des trafics existants sur l'axe à la fin du XXème siècle (dit trafic de l'année de référence). Le calcul permet de déterminer un potentiel qui serait compris entre **68 (Salini) et 77 (Emc) milliards de tonnes.km** pour l'axe considéré.

Sur cet ensemble on estime que plus du quart des tonnes.km sont produites dans le cadre de parcours empruntant la totalité de l'axe. La ventilation des trafics met en évidence une répartition à peu près équilibrée entre le transport intérieur, le transit et le transport international, ce dernier devançant légèrement les deux autres catégories. Sur ce potentiel une grande part du trafic – grossièrement **50 %** - est le fait de véhicules non immatriculés en France.

Evolution prévisible du potentiel

Les deux études diffèrent d'un quadruple point de vue :

- Les dates et le rythme de mise en service et de progression des trafics,
- Le mode même de calcul des trafics, EMC se fondant sur un calcul reprenant des prévisions faites par ailleurs, Salini utilisant le modèle modèle SimtransCo2⁵ qui a été adapté pour les besoins de ce travail (*SimtransRapl*).
- Des niveaux de péage sensiblement différents (0,28 € pour EMC contre 0,25 € pour Salini). En outre, Salini propose le test d'une politique restrictive pour la route.
- Un examen détaillé des hypothèses de travail fait ressortir enfin des divergences explicites ou implicites sur certains paramètres (prix du gazole, chargement moyen des véhicules, etc..)

Il faut être conscient du fait que les prévisions à un horizon aussi éloigné sont très discutables. La question de la persistance du « couplage » entre croissance économique et transport et mobilité étant posée. Les ruptures envisagées dans le présent exercice sont faibles (le découplage relatif intervient progressivement et tardivement).

Conclusions

La construction d'une autoroute automatique dédiée aux poids lourds est rentabilisable financièrement à des niveaux de péage acceptables (Taux de Rentabilité Interne pour le concessionnaire de 9 à 10,6 %). Cette constatation est robuste. L'hypothèse de travail retenue est en effet celle d'une diffusion progressive de l'automatisme.

Ce résultat devient critique si le coût des infrastructures devait être sensiblement supérieur, et a fortiori si cette hypothèse intervenait dans le cadre d'une politique « restrictive » .

⁵ voir : Salini P. et Karsky M., 2003, Simtrans : A simulation tool for sustainable freight transport policies, European Journal of Economic and Social System, Vol 16 N° 2/2003, éditions Lavoisier.

Le surplus des opérateurs de transport clients est très significatif. La prise en compte du surplus des transporteurs majeure suivant les hypothèses de quelques dixièmes de points à environ 5 % la rentabilité du projet (prise en compte des gains de temps).

Les avantages potentiels de l'autoroute automatique pour les usagers ont une valeur marchande en ce sens qu'elle pourrait supporter un sur-péage tout en fournissant aux usagers un avantage compétitif indéniable.

En ce qui concerne les compagnies autoroutières, il conviendrait de comparer – du point de vue des exploitants – les coûts et bénéfices de l'autoroute automatique et d'un accroissement de capacité du réseau existant pour faire face à la croissance des trafics automobiles et de poids lourds à l'horizon de 2040. Ce calcul n'a pas été fait.

L'analyse économique des effets externes tenant à la sécurité routière et à l'environnement fait ressortir un effet faible sur la pollution et l'émission de gaz à effet de serre, et un effet positif probablement faible mais difficilement évaluable sur la sécurité.

Les projets alternatifs ferroviaires à l'autoroute automatique poids lourds ne peuvent pas – pour des ordres de grandeur de coûts comparables – assurer une circulation de marchandises équivalente. Leur contribution à la lutte contre l'effet de serre, - au prix de la tonne de carbone habituellement retenu – ne semble pas compenser la moindre rentabilité économique de l'investissement.

L'utilisation plus rationnelle de la route et la modification des poids et dimensions des poids lourds permettrait d'augmenter à très faible coût – sans que cela soit d'ailleurs incompatible avec l'autoroute automatique – la capacité des autoroutes. Néanmoins cela n'évite pas la nécessité de faire des investissements de capacité sur l'axe nord-sud.

8 ETUDE QUALITATIVE EXPLORATOIRE DES ATTITUDES DES CHAUFFEURS « GRANDS ROUTIERS »

Le contexte

La vision de l'avenir est globalement négative. Les appréhensions se focalisent sur :

- L'exacerbation de la concurrence, notamment avec la montée en puissance de la main-d'œuvre des pays de l'Est, qui ne « respectent pas » les mêmes réglementations
- Un sentiment de perte d'autonomie et de déresponsabilisation qui va croissant
- La montée en puissance des problèmes environnementaux, des problèmes de sécurité routière et la dégradation de l'image des routiers aux yeux du grand public.
- Les craintes d'une mise en place du feroutage, qui peut être perçu comme une perspective inévitable à terme pour résoudre ces problèmes de circulation et de pollution, mais qui signifierait la fin du métier.

Réactions à l'idée d'autoroute automatisée

Malgré, là encore, les très vives réticences liées à la crainte d'une perte totale de liberté, ce scénario est celui qui présente le plus d'avantages potentiels. Parmi les éléments les plus importants de ce scénario on retiendra :

La vitesse annoncée. A condition de faire confiance au système pour gérer la sécurité , cette vitesse représente un gain de temps appréciable, elle offre donc la possibilité de travailler plus longtemps (de gagner plus) et la possibilité de conduire plus loin. Cependant, après réflexion, elle génère de fortes inquiétudes. En cas de dysfonctionnement du système cette vitesse ferait courir aux routiers de très grands dangers. Il est difficile voire impossible à la plupart des routiers d'imaginer faire confiance à un système automatisé gérant des poids lourds à une telle vitesse.

La perception de la (non) conduite sur tout le parcours. En principe, pour les plus ouverts à l'idée, il devrait être possible de dormir, pour les plus sceptiques, il devrait être possible au mieux de se reposer mais certainement pas de dormir. La capacité du système à prendre efficacement le relais du chauffeur – de façon à lui permettre de dormir -, serait intéressante, mais elle apparaît fortement mise en doute par la grande majorité des personnes rencontrées.

En pratique : à partir du descriptif les routiers imaginent qu'ils ne pourront pas sortir de cette autoroute à leur gré, ni s'arrêter quand ils le veulent, ce qui est impensable. L'image d'un parcours « fermé » perdure et rebute. L'idée de déléguer entièrement la conduite « au camion »/ au système, quelles que soient les circonstances, est également inacceptable. Chacun veut pouvoir « reprendre la main » , le contrôle, à tout moment

Cependant : pour le bon fonctionnement du système, il faudrait du point de vue des chauffeurs : Que tous les routiers sur le parcours « jouent le jeu » de la délégation de la conduite au système. Que les distances de sécurité aient été parfaitement calculées et qu'elles restent fixes

Ainsi : une question récurrente apparaît difficile à résoudre : le système peut-il garantir la sécurité et permettre / inclure le recours au mode manuel pour laisser une liberté d'initiative au routier selon les circonstances ? L'automatisation peut-elle être compatible ou complémentaire avec les valeurs du « métier » ?

L'attelage dit « statique » . Ce scénario est plus sécurisant que le scénario d'attelage dynamique, car le chauffeur ne dépend « que » de la machine, mais la passivité du chauffeur semble totale. Mais, du même coup, il renvoie plus encore fortement que les deux autres scénarii à la fin du « métier »

Qu'il soit en tête ou pas, le chauffeur, une fois dans le convoi, n'est plus vraiment maître : ni du camion, ni de la route, ni du temps : « on devient des passagers ».

L'attelage dit « dynamique » . Au-delà des points positifs associés à l'idée d'une autoroute dédiée aux camions, et valables pour chacun des trois concepts, les chauffeurs expriment beaucoup de réserves vis à vis de ce scénario, malgré l'activité plus importante du conducteur en interaction avec le système. Ils critiquent la double dépendance : faire confiance à un autre que soi même et faire confiance à une machine, la dévalorisation probable du temps de (non) conduite, le remplacement à terme de l'homme par la machine.

Au bilan pour les deux scénarii d'attelage la compréhension et l'adhésion aux deux scénarii reposant sur des convois est rendue particulièrement difficile par la perception : d'une contrainte forte par rapport à un trajet « fermé » (attelage statique > attelage dynamique)

Et/ou D'une interdépendance inquiétante entre tous les camions / tous les chauffeurs d'un convoi (attelage dynamique < attelage statique). De plus, dans les deux cas, il y a un risque élevé de perte de temps (attelage statique > attelage dynamique). Aucune place n'est vraiment enviable dans le convoi , qu'il soit statique ou dynamique : Etre pilote, est perçu comme une (trop) lourde responsabilité que personne n'a vraiment envie d'assumer. Suivre, génère un sentiment de (grand) danger, permanent pour celui qui suit. Aucun des routiers ne peut s'imaginer pris entre deux ! « au milieu, je ne serais pas rassuré, je n'aime pas être pris entre deux camions, je serais tout le temps en train de regarder derrière »

Enfin, la question du statut des heures de travail –pour ceux qui ne pilotent pas le convoi- et le calcul de leur rémunération soulève de nombreuses questions.

Conclusions

Dans ce contexte, les bénéfices les plus évidents reposent sur l'idée d'une autoroute dédiée plus sûre, garantissant plus de régularité. Le scénario le plus acceptable, voire le plus intéressant, semble être celui de l'autoroute automatisée car il maintient une autonomie relative, les chauffeurs s'y sentent moins captifs, plus actifs que dans le cadre d'un convoi. Ils ne dépendent pas d'un autre chauffeur, mais d'un système supposé plus fiable et, dans ce cas, ils peuvent envisager de se reposer : "on ne conduit pas et on avance quand même".

Mais pour que l'idée puisse faire son chemin dans les esprits, il semble indispensable de ménager des étapes. Ainsi, les routiers doivent être assurés de conserver la possibilité

de reprendre la conduite en mode manuel lorsqu'ils le souhaitent, et en particulier face à un imprévu ou en situation de danger, de rentrer et sortir de l'autoroute en des points différents de ceux indiqués dès le départ (pas de « trajets fermés »), de faire des pauses à leur convenance. C'est à dire de pouvoir « conduire » et continuer à gérer librement les temps de pause, de repos, les entrées et sorties de l'autoroute, s'ils le souhaitent. S'il y a une défaillance, on repasse en mode manuel, on reprend le métier, il faudra toujours être prêt à intervenir ».

D'autre part il apparaît indispensable de leur apporter des garanties :

- Sur le statut des heures de "non-conduite" et sur leur paiement
- Sur les capacités du système à gérer la complexité et l'imprévu lorsqu'ils se reposeront
- sa capacité à gérer les distances de sécurité malgré la diversité des différents véhicules engagés (différents tonnages, caractéristiques, chargements...).
- Sur l'accès aux formations requises pour « conduire » dans un tel système

Alors les bénéfices et les compensations liées à une autoroute « dédiée » et à une prise en charge au moins partielle de la conduite pourraient être mis en évidence, tels que :

- plus de sécurité
- la possibilité de se reposer sur les longs parcours

9 ROUTE AUTOMATISEE AUX USA

Ce rapport couvre les aspects de l'automatisation du transport routier en Amérique du Nord. Le concept d'automatisation des véhicules qui existe aux Etats Unis depuis un certain temps, a pris de l'importance au début des années 90 avec l'évolution des systèmes de transport intelligent. La plupart des travaux consacrés à l'automatisation des véhicules aux USA portent sur les voitures de tourisme. Il y a beaucoup de différence entre le marché des voitures de tourisme et celui des véhicules commerciaux en termes de caractéristiques d'exploitation, de demande des consommateurs et d'exigences de l'usager au moment de la décision d'achat. Ce document porte un regard nouveau sur les perspectives d'automatisation des véhicules aux USA et se concentre sur le transport de marchandises poids lourds sur autoroute.

Une partie importante du rapport est consacrée au potentiel des voies dédiées aux poids lourds aux USA. Ces voies poids lourds sont considérées comme essentielles pour l'automatisation du transport de marchandises dans ce pays.

L'ensemble du rapport aborde les sujets suivants, avec les points clés résumés dans ce document :

- Le contexte des flux de transport de marchandises aux USA
- Le contexte de l'exploitation du transport routier de marchandises aux USA dans l'environnement actuel
- Le potentiel des voies poids lourds aux USA
- Etude de cas : le transport routier automatisé dans la région de Chicago
- Vers l'automatisation de l'exploitation du transport routier : solutions et questions
- Autres activités concernant l'automatisation des poids lourds aux USA
- Débat et conclusion

L'automatisation des poids lourds pose différents problèmes, aussi bien pour les aspects commerciaux que pour le déploiement. Pour le transport de longue distance, il semble que le concept de voies à péage pour poids lourds soit assez largement soutenu par les gouvernements locaux de certains états, et au niveau politique – le modèle commercial proposé paraît viable et correspond aux préoccupations des industriels et du public pour le financement des nouvelles constructions des voies dédiées aux poids lourds. Pour le déploiement aux points sensibles (goulets d'étranglement), l'étude du CVHAS donne un excellent exemple de l'usage de l'exploitation des véhicules automatisés comme outil permettant de fonctionner dans des environnements très spécialisés.

Bien que l'une des approches de mise en œuvre de l'automatisation des poids lourds consiste à construire de nouvelles routes sur de nouveaux itinéraires, aucune des initiatives actives aux USA n'a choisi cette option. Il existe plutôt un consensus en faveur de la construction de nouvelles voies dédiées aux poids lourds au milieu des autoroutes inter-états existantes, au moins dans les zones rurales inter-urbaines. Les routes de transit pour poids lourds sur de nouveaux alignements sont à l'étude pour les zones urbaines, ainsi que l'usage de priorités pour le transport ferroviaire. De plus le potentiel de l'usage des voies à forte occupation par les poids lourds aux des heures de pointe, ou

même de la conversion de ces voies en voies dédiées aux poids lourds à plein temps offre un autre choix aux zones urbaines.

Concernant la formation de convois de façon dynamique plutôt que statique hors réseau, la réponse devrait dépendre des cas spécifiques des routes et de l'environnement réglementaire. Le scénario le plus probable pour la formation hors réseau des convois concernerait les liaisons inter-urbaines longues, où circulent de longues combinaisons de véhicules qui ne sont pas autorisées à rouler sur les autoroutes classiques aux points de départ et d'arrivée. Dans d'autres cas, surtout pour les ensembles à remorque qui sont admis partout, on préférera probablement la formation dynamique de convois.

Aussi bien l'étude de l'Institut Reason que l'étude du couloir de transport de marchandises I-10 mentionnent le transport routier automatisé comme option future. Il faut mener une analyse approfondie pour comparer les avantages des camions exploités manuellement sur les voies poids lourds dédiées aux avantages supplémentaires qui peuvent être obtenus par l'automatisation de ces véhicules.

Enfin, la réalisation de l'automatisation des poids lourds et des véhicules en général, demandera aux approches des systèmes d'éviter les "arrêts prolongés" de la technologie et/ou des investissements pour atteindre les premières exploitations. L'approche par étapes est absolument essentielle pour que les parties prenantes puissent bénéficier à chaque étape du développement, et constater pour eux-mêmes le potentiel des systèmes de véhicules automatisés. Certains exemples d'approches par étapes sont présentés.

Notre société change rapidement et de manière imprévisible tout comme le développement de notre technologie. C'est pourquoi notre capacité à définir cette approche par étapes ne peut être valide que pour les premières étapes ; la voie vers le transport de marchandises basé sur l'exploitation de véhicules automatisés ne peut être actuellement définie de façon solide. Il faut évaluer les options à chaque étape du développement en termes de problèmes commerciaux, d'exploitations, de sécurité et de problèmes sociétaux, en progressant pas à pas vers une innovation sociétale presque inévitable et bénéfique pour tous.

INTRODUCTION

Le présent document constitue la **Partie 1 : «Synthèse, Introduction et scénarios d'étude»** du rapport final présentant les travaux réalisés dans le cadre du projet **Route Automatisée Poids Lourds**.

Ce projet financé par la DRAST pour une durée de deux ans réunit les unités de recherche et sociétés suivantes :

- Cofiroute,
- Ecole des Ponts et Chaussées,
- EMC,
- INRETS – LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs) - Coordinateur du projet,
- INRETS – ESTAS (Évaluation des Systèmes de Transports Automatisés et de leur Sécurité),
- INRIA – Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique,
- Université de Lille – LAIL (Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille),
- Université d'Evry – LSC (Laboratoire Systèmes Complexes),
- Renault RVI
- ISIS

Ce rapport synthétise les travaux réalisés par les personnes suivantes :

- L'autoroute automatique poids lourds et le transport routier en France – aspects socio-économiques : Patrice SALINI (INRETS).
- Choix de l'infrastructure pour des scénarios de déploiement de la route automatisée pour poids lourds : Fahim BELARBI (Cofiroute) & Mathilde FERNIER (ATEME).
- Scénarios de déploiement du concept RAPL : Emmanuel MARIN (EMC).

L'AUTOROUTE AUTOMATIQUE POIDS LOURDS ET LE TRANSPORT ROUTIER EN FRANCE

« Stanley avait fait pivoter les fauteuils du conducteur et du passager avant de telle manière qu'ils se faisaient tous face. Eva baissa la tête et pénétra à son tour dans l'habitacle par l'unique porte latérale. La porte coulissa et se referma derrière elle, une fois qu'elle en eut donné l'ordre. Eloïse lui tendit la carte de visite de la clinique où figurait le code barre indiquant adresse, téléphone et autres données d'intérêt. Eva la prit, sourit à sa fille et introduisit la carte dans l'ordinateur de bord. L'adresse s'afficha sur l'écran, offrant la carte routière indiquant le trajet balisé. Eva appuya sur le bouton "pilote automatique". Le wagon démarra, fit marche arrière et emprunta le chemin que les balises des bas-côtés lui indiquaient. Les vitres se teintèrent et l'air propulsé par le climatiseur ralentit, la température adéquate ayant été atteinte. Le wagon accéléra insensiblement tandis que les passagers conversaient dos à la route. »

Roman Sans Titre, Jean-François Martine (<http://alexandra.foux.free.fr/romans/>)

1 UN SCENARIO VOLONTARISTE POUR UN « DOUBLE DIVIDENDE »

Mener une approche économique de l'autoroute automatique poids lourd nécessite de localiser les enjeux des innovations possibles au sein du système de transport de fret en Europe.

En effet, à l'horizon de la faisabilité d'un système d'autoroute automatique, les différents modes de transport bénéficieront d'un ensemble d'innovations pouvant modifier de manière significative leur productivité, leurs coûts (et structures de coût), ainsi que leur modèle productif.

Les contours probables de ces systèmes modaux (et intermodaux) à l'horizon de deux ou trois décennies constituent le contexte technologique prévisible du transport de fret, contexte dans lequel une innovation comme l'autoroute automatique constituerait une rupture.

Or, l'une des premières interrogations que l'on peut avoir concerne la nature des politiques mises en œuvre par les pouvoirs publics pendant la décennie à venir.

En effet, s'il est pratiquement acquis que le volume global de transport – en tonnes.km - progressera de 80 à 100 % en 20 ans, s'il est acquis que l'allongement des distances fléchira tendancielle, et que la dématérialisation de l'économie (proportionnellement plus de services et des produits plus légers) se poursuivra, il est probable que les politiques des transports seront amenées à s'infléchir voir à imaginer des ruptures.

En effet, la persistance de la croissance du transport routier et de sa part de marché continueront vraisemblablement à se manifester d'ici à 2010... ce qui renforcera la force du constat du livre Blanc sur les transports et la nécessité d'une politique permettant d'assurer – effectivement - un développement durable.

Dans ces conditions, il est probable que les politiques (européennes et nationales) se radicalisent en empruntant deux voies possibles :

- « La première, **malthusienne** consiste en gros à prendre un ensemble de mesures contraignantes à l'encontre du transport routier (tant en zone urbaine qu'à grande distance), à limiter les investissements sur le réseau routier, et à favoriser l'usage du rail et de la voie d'eau tant par le biais des systèmes de tarification publics que par l'investissement. Cette logique pourrait se doubler d'une attitude souverainiste.
- La seconde, **néo-saint-simonienn**e, consisterait en la combinaison du fédéralisme, de l'essor de nouveaux modèles économiques (impliquant, parmi d'autres la réforme radicale du modèle ferroviaire), et d'un effort d'innovation technologique volontariste centré sur des objectifs ambitieux en matière de développement durable. »⁶

Il nous semble clair que seule la seconde hypothèse constituerait un scénario favorable à l'autoroute automatique poids lourds, la première impliquant un détour nécessairement plus long... et très aléatoire.

Une approche volontariste est fondée sur l'idée que la combinaison d'innovations potentielles (pile à combustible, automatisme) permettant de bâtir des scénarios de transport durable nouveaux est à explorer.

Il nous semble clair que le déploiement de l'autoroute automatique poids lourds n'interviendra que s'il peut apporter une contribution majeure au développement durable. Cela implique la constitution - à terme - d'un véritable réseau noyau de 4000 à 4500 km. En effet, la rentabilité d'un scénario d'autoroute automatique est largement fonction de la taille du réseau, c'est à dire sur sa capacité à améliorer simultanément et dans des proportions significatives la vitesse, la fiabilité et le coût du transport routier, et dans le même temps d'apporter des avantages collectifs en termes de durabilité (énergie, pollution, effet de serre, sécurité).

Ce double « dividende » de l'autoroute automatique est, en effet, l'une de ses spécificités, mais elle est optimale au sein d'un réseau suffisamment dense (à dimensionner).

2 LE TRANSPORT ROUTIER DE MARCHANDISES : QUEL TRAFIC ?

Il convient tout d'abord de considérer que le transport routier de marchandises concerné par l'autoroute automatique, est essentiellement constitué de transport à longue distance. C'est en effet sur ce type de parcours que l'automatisme autoroutier peut trouver - au moins dans un premier temps - une valorisation positive.

⁶ Voir : « L'évolution de la demande de transport de marchandises : Quelles ruptures ? », Patrice Salini, Drast 2001.

La tonne.km

La quantité transportée se mesure généralement en masse – la tonne métrique -. Dès lors si l'on veut évaluer l'importance du transport, il est logique de considérer le kilométrage parcouru. Ainsi une tonne transportée à 100 km représente un transport de 100 tonnes.km, formellement comparable à deux transports d'une tonne sur 50 km. Cette unité permet donc d'additionner les prestations fournies sans se soucier des ruptures de charge. Par contre, l'indicateur « tonnes.km » a le défaut de ne prendre en compte qu'une dimension du transport – la masse – en négligeant la « valeur » du transport, le volume de l'objet transporté, sa longueur etc... La tonne.km est une unité internationale.

Les véhicules.km parcourus sur un réseau sont la somme des kilométrages parcourus par les différents véhicules sur ce réseau.

C'est en effet sur ces parcours que les gains éventuels de temps seront les plus importants grâce à la fluidification des trafics. Or cette fraction du transport routier est majoritaire en France.

S'agissant des véhicules immatriculés en France, les 3/4 des tonnes.km produites le sont en effet dans le cadre de transports à plus de 150 km. Et dans cet ensemble, les tonnes.km produites à plus de 500 km atteignent un volume proche de celles produites entre 150 et 500 km.

Si on ajoute à ce chiffre le montant du transit et une grande partie des transports internationaux réalisés par des véhicules étrangers, c'est probablement au total aux alentours de 170 à 190 milliards de tonnes.km qui sont concernés par l'autoroute automatique, soit entre 2/3 et 3/4 des 254 milliards de tonnes.km produites sur notre sol par des véhicules lourds (plus de 3 tonnes de charge utile).

Or on observe par ailleurs qu'environ 50 % des véhicules.km produits sur notre territoire par des poids lourds le sont sur autoroutes (13 milliards de véhicules.km). Ce chiffre – cohérent avec le précédent – accreditte l'idée que les véhicules empruntant les autoroutes sont logiquement les mieux chargés et les plus gros, et indique que l'écrasante majorité du transport à longue distance est bien produite sur autoroute.

	Milliards de tonnes.km	%
Transport routier intérieur sous pavillon français	168,60	66%
Transport international sous pavillon français	19,90	8%
Transport sous pavillon étranger	26,50	10%
Transit (tous pavillons)	39,20	15%

Tableau 1: Transport routier en France - Source Rapport de la Commission des Comptes des transports de la Nation 2002.

3 QUELS VEHICULES ?

Si l'on ne prend en compte que les véhicules français (de plus 3 tonnes de charge utile et de moins de 15 ans d'âge), on observe que sur **207 milliards de tonnes.km** transportées en 2001, **177 environ l'ont été par des ensembles articulés** (tracteur + semi remorque).

Cette prédominance des ensembles les plus gros, et parmi eux des ensembles articulés est une donnée essentielle.

Elle répond à une massification croissante des transports routiers, et au choix privilégié d'un type d'attelage.

Ce choix technique en faveur de la semi n'est pas général en Europe, certains pavillons privilégiant – comme l'Allemagne – des ensembles camion + remorque.

On peut donc en conclure, que 90 % environ des tonnes.km concernées par l'autoroute automatique, sont produites par des ensembles tracteur + semi et des ensembles camions + remorques. Dans cet ensemble, la prédominance des ensembles tracteurs + semi est avérée (ensembles Français, Espagnols, Italiens...).. elle est probablement supérieure à 90 %.

Il faut ajouter à ce constat quelques remarques :

- Nous sommes en présence d'un parc « cible » relativement homogène, proche des maxima autorisés en gabarit (longueur, largeur) et en PTAC, et très bien utilisé.
- Ce parc est celui qui a les productivités les plus fortes, les rendements énergétiques et les performances les meilleurs, et c'est un parc jeune⁷.
- Ce parc se renouvelle vite : de 15 000 à 30 000 immatriculations de tracteurs neufs en France pour un parc d'un peu plus de 200 000.

A moyen terme ces différentes variables seront directement affectées par l'évolution même du secteur des transports et de la demande. La taille moyenne des véhicules – à PTAC inchangé – continuera d'augmenter en raison même de la concentration du secteur et de son industrialisation.

⁷ Rappelons que Le taux d'utilisation est d'autant plus fort que les véhicules sont récents.

En 2001 il a été de 83,5 % pour les véhicules mis en circulation en 2000 et 2001, pour décliner à hauteur de 36,8 % pour les véhicules mis en circulation avant 1988.

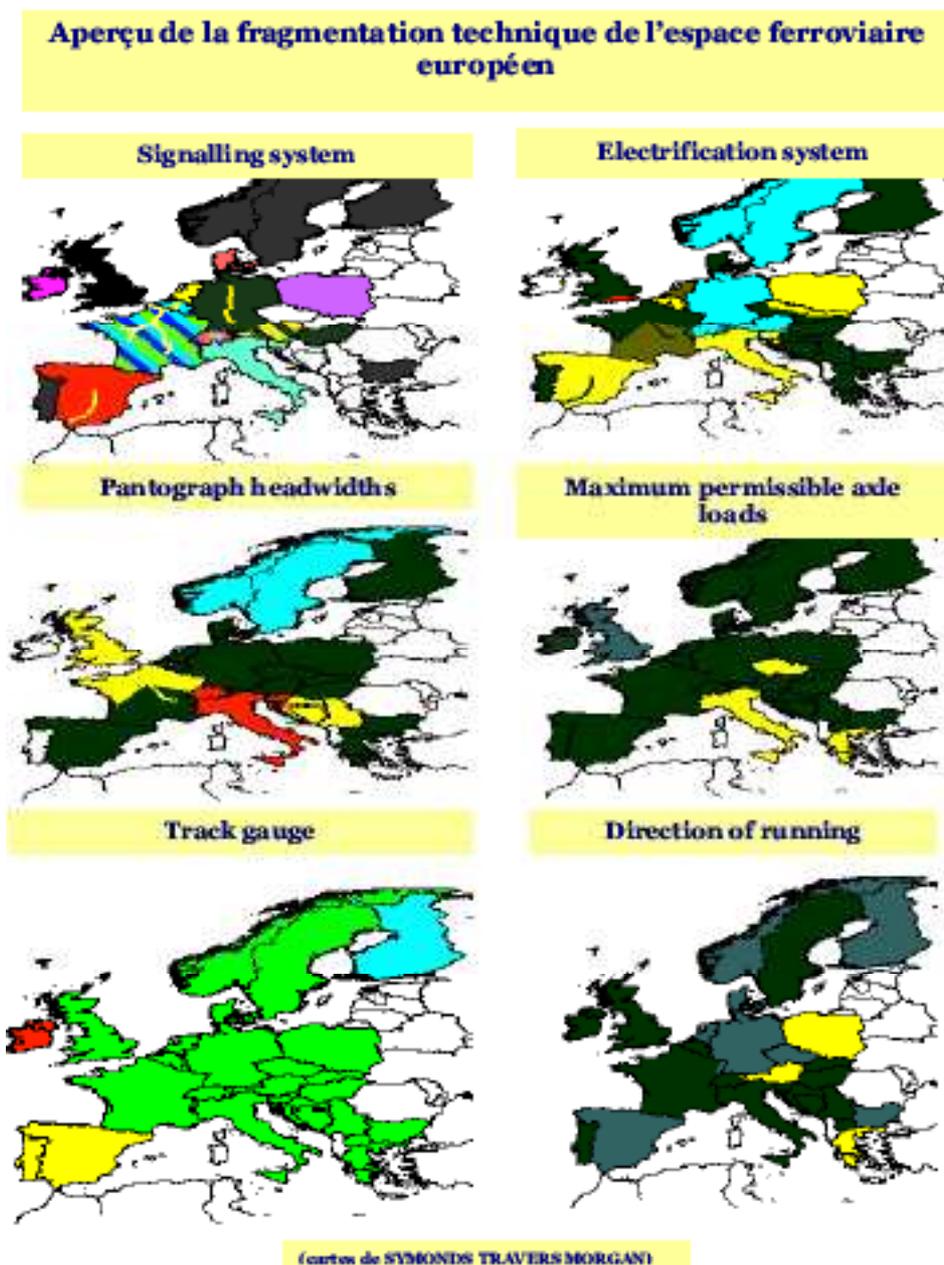
4 L'ESSOR DU TRANSPORT ROUTIER ET DE SA PRODUCTIVITE

Ce système de transport routier gagne en part de marché pratiquement depuis l'avènement du « camion moderne », c'est au cours des années 1920-1930, et malgré des réglementations parfois très contraignantes (période dite de « coordination des transports », de 1934 à 1985 en France⁸). Ces gains sont liés à des facteurs propres au transport routier et à l'évolution de l'économie.

Les facteurs intrinsèques au transport routier sont connus. Sa souplesse, son ubiquité, sa rapidité ont pleinement bénéficié de l'évolution du réseau routier (routes nationales et départementales puis réseau autoroutier) et des caractéristiques techniques des véhicules. Pour ne donner que quelques exemples banals, les vitesses moyennes observées lors des essais de véhicules par les revues spécialisées ont doublé depuis 50 ans, alors que les consommations de carburants aux 100 km ont pratiquement été divisées par 2. Or, pendant cette période, les maxi-codes mis sur le marché ont changé (35 tonnes au milieu des années 50, 40 aujourd'hui), et surtout, la taille moyenne du parc a progressé (probablement triplé). Ces éléments, liés aux véhicules et au réseau se traduisent in fine par une croissance continue de la productivité des véhicules.

Les facteurs externes sont également très forts. Ce que l'on appelle la « dématérialisation » de l'économie (baisse relative des activités de l'industrie lourde), et l'internationalisation des échanges dans un contexte ferroviaire défavorable (absence de standard européen, non unicité du réseau etc..), et pour finir la construction du marché unique, ont, joué un rôle central dans le recul du rail et de la voie d'eau au bénéfice de la route.

⁸ Cette période est sensiblement identique dans les grands pays industrialisés. Généralement la réglementation est mise en place pendant la grande crise, confirmée et approfondie après guerre, allégée puis remplacée entre 1975 et 1990...



Non-interopérabilité ferroviaire. Source : Vers un espace ferroviaire intégré, Mémo de la Commission Européenne, 2002.

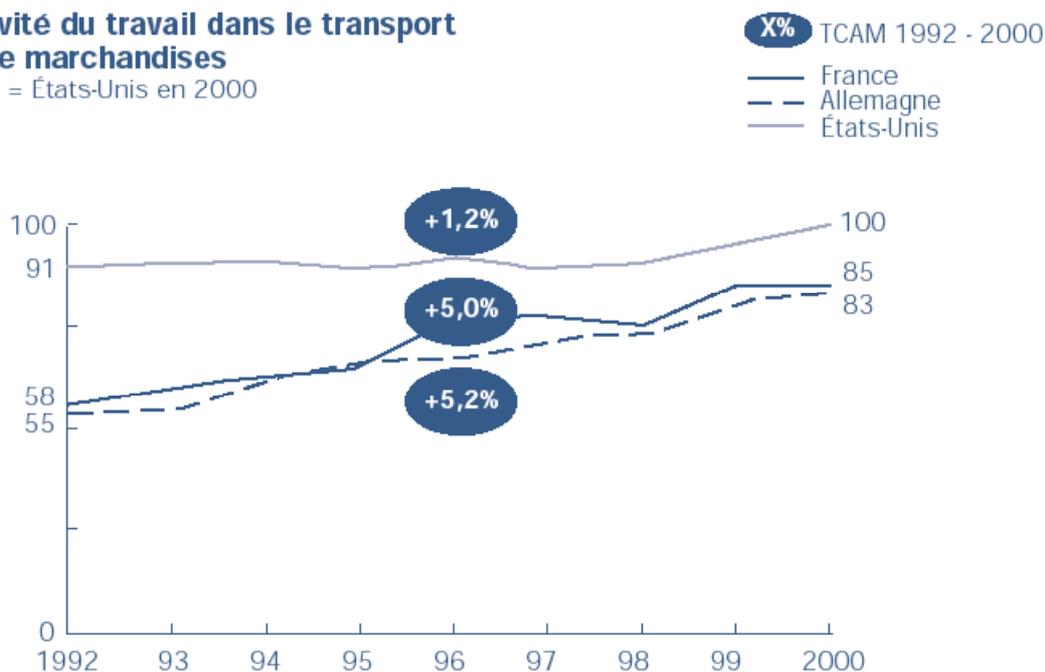
Au total, le transport routier continue de connaître une augmentation sensible de sa productivité en Europe. Ainsi, comme le souligne une récente étude de Mc Kinsey Company⁹, l'augmentation de la productivité du travail, exprimée en tonne.km par heure travaillée, a cru de 5% l'an en moyenne sur la dernière décennie aussi bien en France qu'en Allemagne.

⁹ « Dynamiser la productivité en France et en Allemagne ». Mc Kinsey Global Institute, 2002.

Cette évolution est liée à un ensemble de facteurs parmi lesquels la déréglementation a joué un rôle majeur parallèlement avec la construction européenne (marché unique, élargissements successifs). Ils ont favorisé – dans un contexte de globalisation économique – une restructuration sans précédent du secteur des transports de marchandises. Mais ce secteur demeure atypique dans son organisation du travail.

Productivité du travail dans le transport routier de marchandises

Indice 100 = États-Unis en 2000



* Pondération tenant compte des différences de prix des services express et à délais garantis
 Source : DAEI-SES ; DIW ; BAG ; ENO ; VIUS ; CFS ; analyse MGI

Productivité du travail dans le transport routier. Source : « Dynamiser la productivité en France et en Allemagne ». Mc Kinsey Global Institute, 2002.

5 LE SECTEUR : CONCENTRATION ET MODE DE PRODUCTION

L'image – encore dominante – d'un secteur routier dominé par une économie artisanale est largement erronée et le sera de plus en plus.

On part souvent de l'idée qu'en France le secteur est artisanal en raison du fait que près de 8 entreprises sur 10 a moins de 6 salariés. Mais c'est négliger le fait que la moitié du chiffre d'affaires est en effet produit par des entreprises de 50 salariés et plus.. contre 10 % environ pour les entreprises de 0 à 5 salariés. C'est aussi négliger le fait que nombre de groupes sont en réalité des constellations de PME... constellations que les statistiques ne reflètent pas.

5.1 La concentration

En outre, le secteur routier est particulièrement concentré dans certains segments d'activité.

L'un des marchés les plus concentrés (et dont la concentration mondiale croît) est celui de la messagerie. Quelques groupes détiennent une position majeure sur chaque grand marché national. Actuellement, les groupes « publics » (La Poste, Geodis, Le Sernam) contrôlent plus de 42 % du marché hexagonal. La Poste allemande (DHL, Ducros, Danzas) représente 10,6 % du marché et la poste hollandaise (TNT Post Group) 8,9 % (la part de cette dernière a légèrement baissé car elle a vendu son réseau de messagerie rapide pour ce centrer sur l'express). Les messagers génèrent peu de flux lourds à longue distance, mais des flux rapides, nocturnes et réguliers. Ils constituent donc une cible potentielle attrayante mais d'importance modérée, d'autant que certaines lignes sont régulièrement sous-traitées.

Un autre secteur très concentré est le transport frigorifique, et spécifiquement la « messagerie frigorifique », puisque 3 groupes représentent 95 % du chiffre d'affaires de cette activité en France. L'hyper concentration de ce secteur, et la nature de ses trafics sont des facteurs favorables à l'autoroute automatique et son basculement vers l'autoroute automatique.

Le secteur des citerniers chimiques – très exigeant en termes de sécurité – est également relativement concentré. Un classement des chiffres d'affaires réalisés par les grandes firmes dans ce domaine met en lumière cette concentration. L'importance de grandes flottes utilisées pour du transport de charges complètes est ici un potentiel de développement. Le volume de produits dangereux transportés en Europe est considérable. L'une des interrogations fortes est de savoir quelles réponses techniques l'autoroute automatique apporte aux questions de sécurité et de sûreté. La concentration du secteur est un facteur de concertation intéressant.

Le Vrac solide est aussi un secteur en voie de concentration, certains groupes «citerniers» s'y développant de manière active. Ce secteur est actuellement un terrain de développement de grands groupes lotiers, à ce titre au premier rang des groupes-cibles de l'autoroute automatique.

Le transport de lots est plus « banal ». C'est donc un secteur globalement plus atomisé. On y trouve cependant depuis une vingtaine d'années certains groupes en croissance rapide. Comme Giraud ou Dentressangle, dont le développement s'est accéléré avec le décontingement des licences de transport et la création du marché unique. Il faut noter que ces groupes sont présents sur le marché plus récent de la prestation de services logistiques. Les neufs prestataires dépassant la barre de 152 millions d'euros (1000 MF) en 2000 en contrôlent 45 % : Geodis, Hays Logistique, FM Logistic, Easydis, Stef-TFE, Norbert Dentressangle, Gefco, SDV, Daher, Giraud Logitics. Les deux leaders (Geodis et Hays Logistique) en représentent plus de 18 % et les groupes étrangers environ 28 %. Si ce

secteur souffre d'une moindre concentration, son évolution récente et prévisible et surtout la nature et le volume de ses trafics en font la cible principale de l'autoroute automatique.

5.2 Un mouvement accéléré

Le mouvement de concentration s'est engagé dans le secteur il y a plus de 40 ans. Pour autant, il a pris un tour particulier depuis 10 à 15 ans.

Plusieurs facteurs déterminants sont intervenus :

- La libéralisation des transports routiers et la construction européenne (règles communes ; multilatéralisme...);
- La « pression » de la demande en faveur d'une « offre globale » et le développement de la demande de prestations logistiques dans le cadre d'un marché mondialisé ;
- Le développement du « mono-colis » et le développement mondial des « intégrateurs » (Ups, Fedex, etc...);
- La restructuration du secteur public des transports (rail, filiales routières du rail) et la mise en œuvre des « nouvelles stratégies » des groupes postaux dans un contexte de libéralisation du marché postal.

Ce vaste mouvement conduit aujourd'hui à ce qu'un grand nombre de grands groupes dominants du secteur routier en Europe font partie ou sont issus du secteur public :

- TPG (TNT et son groupe)
- Deutsche Post (Danzas, DHL etc..)
- La Poste (TAT, Chronospost, DPD,...)
- DB (Schenker...),
- Sncf (Géodis)
- Sncb (Abx,..)
- Exel (ex- Chemins de fer anglais..)

Par ailleurs, les firmes américaines comme UPS ou Fedex continuent leur expansion en Europe.

Ce mouvement intervient dans un contexte toujours marqué par l'archaïsme des conditions de travail et de rémunération du secteur.

5.3 Les conditions de travail

Une conflictualité importante a permis de mettre sur le devant de la scène les conditions atypiques de travail des conducteurs routiers. Ceux-ci, en particulier dès lors qu'ils « découchent » 4 fois ou plus par semaine, travaillent notablement plus que la moyenne des ouvriers, pour des conditions de rémunération ramenées à l'heure médiocres.

	Retour chaque jour		Absents de 1 à 3 nuits		Absents au moins 4 nuits	
	1999	1993	1999	1993	1999	1993
Durée de travail total (a)	9,5	10,1	10,9	12,1	11	13,1
Dont conduite	5,5	5,9	7,2	7,8	7,7	8,9
Opération marchandises	3,1	3,2	2,3	2,9	2,0	2,5
Attentes	0,5	0,5	1,0	0,9	0,9	1,1
Autres travaux	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5
Durée de repos (b)	1,1	1,2	1,5	2,2	1,8	2,7
Durée de l'amplitude(a+b)	10,6	11,2	12,4	14,2	12,8	15,7
Nbre d'amplitudes par quinzaine	9,9	9,7	9,9	9,0	10,2	9,6
Nbre de km par jour	304	297	453	450	501	526

(Source : Enquête INRETS 1999.)

Durées journalières de travail (en heures) des routiers en France.

Ces conditions de travail sont en réalité « encadrées » par deux ordres de dispositifs. Le premier – communautaire – régleme la durée de conduite et de repos. Il semble être globalement respecté dans les pays Européens. Le second – national, local ou relevant des accords de branches ou d'entreprise – règle les conditions de travail et de rémunération. Ces règles n'ont pas encore de caractère homogène en Europe¹⁰, et elles sont appliquées et contrôlées de manière variable.

Plus encore, l'une des particularités des métiers de la route est de donner lieu à une rémunération hors salaires (frais de route) pouvant représenter jusqu'à 1/4 et plus du « revenu » du chauffeur.

Il va sans dire que le processus de concentration – qui peut ou non laisser une place importante à la sous-traitance en direction d'artisans¹¹ - est un facteur d'industrialisation des transports et par voie de conséquence d'organisation plus rationnelle du travail. La syndicalisation dans ces entreprises, et la mise en place d'accords collectifs (le contrat de progrès et sa suite), contribuent à une amélioration relative des conditions de travail dans les plus grandes firmes.

Le mécanisme de concentration et la spécificité sociale des métiers de la route mettent clairement la question du travail des chauffeurs au centre des évolutions à venir dans le secteur. Ces deux éléments sont stratégiques par rapport au mode de développement de l'autoroute automatique.

Il sera important en effet de ne pas « stigmatiser » le transport routier et ses acteurs.

¹⁰ Un texte européen est en voie de « finalisation » mais il ne concerne pour l'instant pas les artisans.

¹¹ L'artisanat n'est pas en France très important pour le transport à longue distance. Il l'est sans doute plus nettement pour le camionnage et la distribution de colis. Pour autant, sa place n'est pas négligeable (10 000 artisans ?). A l'étranger, les choses sont similaires à l'exception notoire de l'Italie et de l'Espagne où les « autopatrons » et autres tractionnaires indépendants se comptent en dizaines de milliers.

Mais la dimension psychosociologique de la transformation radicale du « métier » se doit d'être étudiée en tant que telle. Il n'est pas évident, en effet, qu'il y ait adéquation entre les représentations sociales actuelles de ce métier par leurs acteurs et le projet d'automatisation de la conduite. Ce métier où l'on valorise l'autonomie du travail – et à tout le moins de la conduite – et qui souffre de rétributions et de conditions de travail médiocres, est souvent perçu comme un moyen d'échapper à une sous-prolétarianisation¹²... Sa transformation serait radicale avec l'introduction de l'automatisation de la conduite sur certains parcours.

« L'auto-wagon venait de s'engager sur le rail électrique qui le mènerait à la sortie de la ville où il s'emboîterait aux autres wagons individuels des voyageurs pour Madrid. Stanley ne put s'empêcher un mouvement en direction du volant au moment où le wagon prenait un virage, ce réflexe de conducteur de la fin du 20ème siècle le fit sourire. »

Roman Sans Titre, Jean-François Martine (<http://alexandra.foux.free.fr/romans/>)

5.4 Marges et rentabilité

Une autre spécificité du secteur routier, et non des moindres, réside dans la nature même de sa rentabilité. Il est courant en effet de constater que ce secteur est générateur de faibles marges.

Ainsi, la Capacité d'Autofinancement moyenne des sociétés et quasi-sociétés¹³ de transport routier sur la période 1993-2000 ressort à 4,3 %. Mais cet état de fait n'est pas le privilège du seul transport routier. On retrouve en effet des marges faibles dans l'ensemble des transports.

Par nature « métier d'exploitation », l'activité de transport consiste, en effet, à valoriser au mieux une « capacité » (tonnage, véhicules, avions ou navires, places...) en consolidant des trafics de type différents et en opérant une péréquation tarifaire optimale (techniques de yield management, postalisation, etc...). Elle est donc – et depuis longtemps – frappée de plein fouet par les crises, d'autant qu'on a coutume de considérer que l'activité transport reflète avec une certaine amplification des fluctuations conjoncturelles.

Mais cette réalité ne doit pas faire négliger deux éléments majeurs :

- L'activité de transport peut dégager de fortes rentabilités des capitaux investis en raison même de la structure des comptes d'exploitation. Ainsi, le respect des obligations en matière de « capacité financière » obligatoire par les transporteurs conduit à imposer une « capacité » de 5000 €¹⁴ par véhicule « marginal ». Un véhicule gros porteur « produisant » 125 000 km par an vendus 1 €/km dégage une recette de 125 000 €. Une marge après impôt de 2 % représente 2500 €... c'est à dire 50 % de la capacité financière demandée. Si celle-ci est composée de capitaux propres, cela fait donc un rendement du capital après impôt sur les sociétés de 50 % ! Cet exemple caricatural permet de mesurer à la fois la fragilité des marges... et les fortes potentialités de rentabilisation des capitaux engagés.

¹² Voir « Les routiers, des hommes sans importance », J.P. Pouy, P. Hamelin et B. Lefebvre, ed Syros, 1993.

¹³ La prise en compte des entreprises individuelles, pour lesquelles il peut exister une confusion entre le revenu du travail et la capacité d'autofinancement ferait apparaître un taux légèrement supérieur.

¹⁴ 9000€ pour le premier PL, 5000€ pour les suivants.

- La diversification des activités vers des domaines moins marqués par des logiques d'exploitation (Commission de transport) permet de rendre les marges plus fortes et l'activité moins capitalistique. Mais tant la commission de transport que la prestation de services logistiques et la messagerie requièrent des coûts fixes de réseau, d'autant plus importants que l'on tend à fournir une offre « globale ». Il faut donc miser ici sur des économies d'échelle et de dimension.

Ces éléments montrent l'importance primordiale de l'argument relatif aux coûts (thématique des marges faibles, mais des opportunités de rentabilité forte) dans la stratégie de développement de l'autoroute automatique.

Un transporteur de lots à longue distance (notre cible) a en effet la structure de coûts approximative suivante :

	€	Unités d'œuvre (CNR)	Base actuelle
Roulage	0,35 €	Km	121950
Personnel	19,13 €	Heure	2379
Véhicule & charges de structure	150,39 €	Jour	231
Coût total actuel moyen	122 695 €		
Soit au km	1,01 €		
Vitesse moyenne observée	67,9	km/h	
Taux parcours en charge	86%		
Taux de chargement (en charge)	90%		

Structure de prix de revient du transport routier à longue distance (gros porteurs). Source CNR (www.cnr.fr)

On calcule aisément qu'un gain de vitesse moyenne de 10 % conduirait à une baisse du prix de revient kilométrique moyen de près de 6 %, auquel il conviendrait d'ajouter les gains de consommation unitaire (observée à 35,1 litres au 100). Un gain de consommation unitaire de 5 % fait passer l'économie globale à 7 %. Autrement dit, l'argument est « convaincant » par rapport au niveau actuel des marges. Ces données montrent en outre que les gains de vitesse et de consommation ne peuvent supporter une augmentation de coûts des véhicules que s'ils sont obtenus sur une fraction importante du réseau.

Dans ce cas, par contre, une augmentation même très sensible du coût de détention des véhicules permet de maintenir une attractivité forte à l'autoroute automatique.

5.5 L'évolution du métier de transporteur

Bénéficiaire d'une première vague d'externalisation (le transport privé a cédé le pas devant le transport public), le secteur des transports bénéficie d'une seconde vague qui concerne la logistique, en général, sous ses différents aspects.

Ce mécanisme provoque une diversification « naturelle » des métiers du transport, d'autant que, dans le même tant, le transport routier « sec », c'est à dire « ordinaire » ou disjoint de toute autre prestation, est souvent présenté comme la partie la plus simple, la plus archaïque, la moins lucrative de la prestation de service des transporteurs.

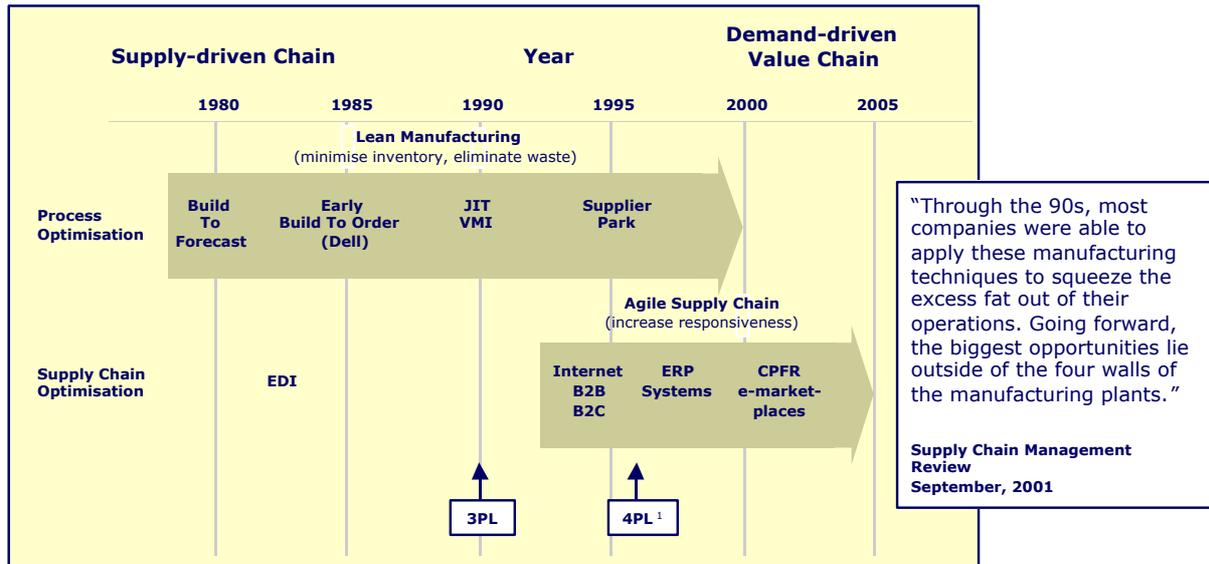
Mieux vaut dit-on faire de la valeur ajoutée, c'est-à-dire produire ou mieux encore organiser des opérations de transport complexes, et fournir des prestations logistiques intégrées combinant des opérations de stockage, préparation de commandes etc..

Le transporteur devient ainsi gestionnaire de chaînes d'approvisionnement (supply chain management), intégrateur de services logistiques complexes, et ce, à une échelle de plus en plus globale.

Cette orientation touche l'ensemble des métiers. Lotiers, organisateurs de transports internationaux, transporteurs maritimes, messagers, expressistes cherchent à se positionner comme opérateurs globaux ou au moins à élargir leur gamme de services au-delà du simple transport et à rechercher une plus large couverture géographique. En effet, les chargeurs ont tendance à rechercher une double globalisation : l'intégration des services et la globalisation géographique ou « mondialisation ».

La concentration (voir supra) devient un moyen de constituer une offre plus globale intégrant des services connexes¹⁵

¹⁵ Ça a été la stratégie explicite d'Exel, premier logisticien mondial, c'est à dire premier opérateur prestataire de services logistiques au monde. L'opérateur britannique, qui est désormais numéro 1 sur le marché américain, tire sa capacité d'offre globale de la fusion opérée avec Ocean il y a deux ans et demi. (Interview de John Allan, Distribution Business, décembre 2002.)



Vision d'Exel de l'évolution de l'efficacité des "supply chains". Source : "Creating value in the supply chain", présentation d'Exel, novembre 2001. (1) 4 PL est une marque déposée par Accenture in 1996

Mais cela ne doit pas pour autant conduire à négliger le maillon transport par lui-même. Les firmes tendent en effet à rationaliser (industrialiser) le transport proprement dit en maîtrisant les principaux « temps » et en optimisant la gestion des capacités de transport.

De ce point de vue, le développement des systèmes d'information et de communication (tracing, tracking, Gps, Gsm, etc..) constitue à la fois un facteur de différenciation et de service en direction des clients, mais aussi une source de productivité (massification des envois, rotation des véhicules, optimisation des parcours...) et d'économies (moins de services après vente, de colis dévoyés, etc..).

Pour l'instant, l'impact des investissements en matière de Ntic demeure faible. Selon McKinsey (op.cit.) : « Au cours de la période analysée, l'impact des TIC¹⁶ sur la croissance de la productivité s'est limité à des progrès dans l'optimisation des réseaux et à l'automatisation des tâches administratives et de support. Les TIC ont en moyenne représenté 1 % de croissance annuelle. À partir de la fin des années 1990, les investissements en TIC ont surtout porté sur l'amélioration du suivi des flux et des capacités à l'intérieur des réseaux et sur l'intégration des systèmes informatiques des sociétés en cours de rapprochement. ». Le bureau d'études constate en outre que « plus de la moitié des 15 % d'écart de productivité estimé entre les deux pays européens et les Etats-Unis est due à un recours moins systématique aux TIC. »

Ces ordres de grandeur sont importants. Ce « 1 % » de productivité représente 1/5 des gains de productivité obtenus durant la période récente.

Il convient donc de mettre en perspective les gains attendus de l'autoroute automatique. La combinaison du retard sur les USA (7 à 8 points ?), des gains attendus de l'autoroute automatique et des autres facteurs de productivité, fait ressortir un potentiel important dont le contenu technologique est fort.

¹⁶ TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

6 L'AUTOROUTE AUTOMATIQUE POIDS LOURDS : ELEMENTS POUR UNE ANALYSE ET UNE EVALUATION

L'introduction de l'autoroute automatique poids lourd constitue une rupture tant sur le plan technologique que sur le plan de l'ergonomie et du vécu des métiers de la route.

A ce titre il convient de mener une approche permettant :

Dans un premier temps d'expliquer aux acteurs (organisations patronales et ouvrières) et aux médias ce que pourrait-être et apporter l'autoroute automatique. Il s'agit de susciter le débat, de mieux cadrer les problématiques et les politiques de communication. A ce titre, il convient de présenter :

- Un projet global, non seulement technique, mais écologique, économique et social ;
- Un projet lié aux autres innovations possibles intéressant la route comme la pile à combustible ;
- Un projet parmi d'autres – susciter à ce propos des réflexions sur les innovations fortes possibles en matière de transport combiné rail route ;
- Un projet qui permet de générer des avantages directs pour les entreprises en termes de coûts et de niveau de service (productivité, sécurité, rapidité, fiabilité...) et des avantages externes pour la collectivité (pollution, sécurité, énergie, congestion etc..).

Dans un second temps, il convient de travailler à approfondir les conditions d'introduction de l'innovation et son acceptabilité sociale :

- Par un travail auprès de panels de groupes sociaux concernés (chauffeurs – à distinguer suivant leur activité -, dispatcheurs, cadres, etc...) ;
- Par un travail sociologique et psychosociologique sur le contenu du métier de conducteur routier et l'acceptabilité de la conduite automatique sur certains parcours.

Enfin, de mener une étude économique détaillée permettant de dresser un bilan coût avantage de différents scénarios d'introduction de l'autoroute automatique. Cette analyse devra en particulier mettre en évidence les bilans économiques et financiers des différents agents ainsi qu'un bilan collectif – monétarisé ou non – des différents effets externes liés au projet, en particulier en matière d'émission de gaz à effet de serre de sécurité (accidents graves) et de pollution. Ce bilan se fera en référence à un scénario de référence à l'horizon de la maturité de l'autoroute automatique qui devra intégrer en particulier les innovations probables dont bénéficieront les différents modes, et les inflexions prévisibles des conditions économiques, sociales et réglementaire de l'offre de transport en Europe.

CHOIX DE L'INFRASTRUCTURE POUR DES SCENARIOS DE DEPLOIEMENT DE LA ROUTE AUTOMATISEE POUR POIDS LOURDS

1 RESUME

Cette étude vise à définir la forme que peut prendre une route automatisée pour Poids Lourds. Faut-il envisager l'aménagement de voies existantes ou prévoir un nouveau réseau dédié au concept.

Dans ce cadre, trois formes de RA pour PL sont identifiées :

- La réservation d'une voie existante associée à une modulation spatio-temporelle ;
- L'adjonction au réseau existant d'une voie supplémentaire ;
- La réalisation d'un nouveau réseau routier dédié au concept d'automatisation de la conduite

Les avantages et inconvénients de chaque forme de RAPL, décrite ci-dessus, sont inventoriés. Suite à cet exercice, la solution préconisée est la construction d'un réseau autoroutier indépendant et dédié à l'automatisation des Poids Lourds. Ceci permet de s'affranchir de plusieurs contraintes telles que la mixité du trafic (manuel/automatique) et des aménagements lourds aux entrées / sorties des autoroutes.

De surcroît, cette forme de RAPL permet une introduction progressive des véhicules automatisés sur le réseau routier et représente un environnement de test idéal en vue de mettre en place et d'affiner des stratégies d'exploitation adaptées à l'automatisation des poids lourds (ex : contrôle d'accès,..).

A partir de la solution retenue, cette étude aborde l'expression générale des besoins du point de vue du gestionnaire de la future infrastructure : les caractéristiques géométriques de la chaussée, la signalisation fixe, les dispositifs de sécurité et de détection d'incidents à prévoir, les mesures d'exploitation à mettre en œuvre.

L'automatisation devra reposer essentiellement sur l'intelligence embarquée des véhicules. L'infrastructure jouerait le rôle de relais et fournirait, comme pour les autoroutes actuelles, des informations en temps réel sur les conditions de circulation et les événements prévalant sur la totalité du réseau.

L'exploitant de la route automatisée continue à assurer les missions de gestion de trafic, de maintien de la viabilité et d'aide au déplacement des PL automatisés. Cependant, l'infrastructure ne peut en aucun cas exercer une influence directe sur le comportement de ces véhicules.

Dans cette analyse, des enjeux, du point de vue de l'exploitant autoroutier, sont identifiés ci-dessous :

Une évolution du cadre législatif actuel (ex : contrat de concession) afin de tenir compte des spécificités liées au fonctionnement d'une RAPL ;

Une revue du Schéma Directeur de la Route en vue de l'ajout d'un nouveau niveau d'exploitation associé à cette infrastructure dédiée ;

L'engagement d'un exploitant d'une RAPL à mettre en œuvre tous les moyens en sa possession pour maintenir la continuité du trafic de PL automatisés dans de bonnes conditions de sécurité.

Enfin, la présente étude est ponctuée par une estimation du coût d'une nouvelle infrastructure dédiée aux PL automatisés. Les hypothèses de cadrage s'appliquent à l'axe Calais – Bayonne faisant environ 1120 Km de longueur avec un profil en travers de 2×1 voie (3,5 m de largeur) et une bande d'arrêt d'urgence (3 m de largeur) pour chaque sens de circulation.

This study is intended to define the suitable shape of infrastructure allowing truck automation. Do we need to use existing motorways or to build an independent and dedicated road network?

According to this question, three configurations have been identified:

The reservation in time and space of an existing lane ;

The building of an additional lane near the existing network ;

The creation of a new motorway dedicated to truck automation.

Advantages and drawbacks of each of the above configurations have been pointed out. Then, the recommended solution seems to be the construction of a new infrastructure. This should overcome major constraints such as dual traffic (manual / automatic) and heavy developments at the entrances and exits of the road network.

Furthermore, this dedicated motorway allow a smooth introduction of automated trucking on the road network and represents a good field test to deploy and fine tune road operations strategies which cope with automated lorries (e.g. ramp metering,...).

A major section of the report is devoted to the general needs, from a motorway operator point of view, related to an infrastructure supporting traffic of automated trucks : geometrical characteristics, static signs, road based safety and incident detection equipment, traffic management measures to be applied.

Automation processes and intelligence will be mainly located on-board trucks. Infrastructure will provide, as for existing ones, real time information on traffic conditions and events occurring on the network.

The automated motorway operator will ensure tasks related to traffic management, information and assistance to automated trucks. Nevertheless, the infrastructure may not influence directly the behaviour of those lorries.

The study addresses stakes on the following issues:

Evolution of legal aspects (e.g. concession contract) in order to take into account specific aspects of a truck automation road ;

An update of the road operation master plan regarding a new management level related to a dedicated motorway for automation purposes ;

A commitment of the future automated road operator to do the best that he can for ensuring continuity of traffic related to automated trucks in acceptable safety conditions.

At the end of this study, an estimation cost is achieved for a new infrastructure dedicated to automated trucks. Initial assumptions are applied to the stretch Calais – Bayonne. Its length is roughly of 1120 Km and cross section consists of 2×1 lane (width of 3,5 m) linked to a hard shoulder (width of 3 m) for each direction.

2 LE CHOIX DE L'INFRASTRUCTURE

2.1 Introduction

Quelle sera la forme de la route automatisée ? L'aménagement des voies existantes, est-elle envisageable ? Faut-il prévoir un nouveau réseau ? Comment introduire l'automatisation des véhicules ? Telles sont les questions auxquelles cette étude tentera de répondre.

La route automatisée ressemblera dans sa forme à une route actuelle. Elle possède une ou plusieurs voies de circulation par sens, des accès près des agglomérations, des aires et des péages. Elle n'est ni enterrée ni en surélévation. Elle ne possède pas d'équipements spécifiques et dédiés à la circulation des véhicules automatisés. L'intelligence et la technologie sont essentiellement embarquées dans les véhicules automatisés. Les équipements contribuant à la détection d'incidents et à la diffusion d'information sont plus nombreux pour offrir la sécurité et les services attendus.

Les véhicules en mode manuel peuvent-ils techniquement emprunter cette route. Les véhicules automatisés et manuels peuvent-ils cohabiter ?

2.2 Les infrastructures possibles

Les formes d'infrastructures sont nombreuses pour introduire l'automatisation des véhicules :

- L'utilisation des infrastructures existantes :
 - une voie réservée avec une modulation spatio-temporelle
 - une voie dédiée réservée à des convois de poids lourds automatisés ou des poids lourds autonomes automatisés
 - des accès séparés
- L'adjonction au réseau existant d'une voie supplémentaire
- La réalisation d'un réseau dédié indépendant

2.2.1 *L'utilisation des infrastructures existantes*

Les caractéristiques des véhicules manuels et automatisés étant proches, il peut être techniquement envisagé de les faire circuler sur une même infrastructure sans modification profonde de l'infrastructure. Cette solution consiste à réserver une voie sur le réseau existant, celle de droite par exemple, pour la circulation de véhicules automatisés. Cette voie n'est pas matérialisée physiquement, elle peut être indiquée par une signalisation dynamique. Les véhicules en mode manuel circulent sur les autres voies.

Une mise en œuvre en plusieurs étapes peut être envisagée. Dans un premier temps, la circulation des poids lourds automatisés pourrait être autorisée à certaines plages horaires correspondant aux heures où le trafic est le moins chargé (certains jours de la semaine). En dehors de ces plages horaires, aucun véhicule n'est autorisé à circuler. Le trafic sur l'autoroute s'effectue sur toutes les voies en mode manuel. Le passage entre le mode manuel et automatisé doit être particulièrement bien géré afin d'éviter le mélange des flux automatisés et manuels. Cette transition peut provoquer des interruptions de circulation relativement importantes sur cette voie.

Par ailleurs, les accès à l'autoroute doivent être effectués en mode manuel pour les véhicules automatisés et des règles strictes doivent être imposées aux véhicules manuels et aux PL automatisés pour les entrées/sorties pour une sécurité accrue.

Dans une seconde étape, la voie peut-être totalement dédiée à la circulation de poids lourds automatisés. L'autoroute est réduite d'une voie pour les véhicules en mode manuel. La capacité est augmentée pour les véhicules en mode automatique.

Il peut être envisagé de séparer les entrées/sorties des véhicules automatisés et manuels de manière à éviter les interactions entre les deux types de flux et permettre les accès en mode automatisé.

Les voies automatisées doivent être enterrées au passage des entrées/sorties des véhicules en mode manuel. Il faut également construire des échangeurs spécifiques pour les PL automatisés. Ceci constitue des aménagements importants d'infrastructure. La séparation des entrées/sorties pour le trafic manuel et le trafic automatisé est indispensable pour assurer une sécurité maximale aux points d'accès du réseau. Il n'est alors plus envisageable de restituer la voie aux véhicules en mode manuel à certaines heures. L'augmentation de débit liée à la disparition des poids lourds ne compense pas la perte de capacité due à la réduction d'une voie de circulation. Certains véhicules lents (les caravanes, les cars) circuleront toujours sur les voies en mode manuel.

2.2.2 La voie supplémentaire

Cette solution consiste à créer une voie sans interaction avec le réseau existant pour les véhicules automatisés. Dans cette configuration, il n'y a pas d'interaction possible entre les véhicules automatisés et les véhicules manuels.

La mise en place d'une voie automatisée totalement indépendante du réseau nécessite des modifications considérables de l'infrastructure. Cette voie située à droite dans le périmètre du Domaine Public Autoroutier Concédé doit être séparée matériellement des voies de circulation classiques. Les entrées/sorties de celles-ci doivent être modifiées, les aires doivent être déplacées et les ouvrages d'art élargis. Les voies automatisées doivent avoir leurs propres aménagements tels que les entrées/sorties, les bandes d'arrêt d'urgence et les accès aux aires.

Cette solution est optimisée en terme de sécurité, d'amélioration du temps de parcours et de confort de conduite pour le réseau classique et pour le réseau automatisé. En revanche, elle est lourde de conséquence sur l'infrastructure existante.

2.2.3 Le réseau indépendant

Il s'agit de construire un réseau autoroutier totalement dédié aux véhicules automatisés. Ce réseau sera à une ou deux voies par sens. Il s'agit d'une infrastructure autoroutière possédant des bandes d'arrêt d'urgence, des entrées/sorties et des aires totalement adaptées aux poids lourds automatisés.

Les accès tiendront compte du degré d'automatisation des véhicules (véhicules intégralement automatisés, convois de plusieurs poids lourds conduits par un chauffeur,..). Des études précises prenant en compte le fret national et international détermineront le tracé optimal, la fréquence et la localisation des accès. Les aires sont couplées aux accès servant ainsi d'aire de repos et d'aires de constitution de convois ou d'attente selon les scénarios de circulation prévus. L'autoroute sera équipée de capteurs et de moyens de communication bidirectionnelle route / PL.

2.3 La ou les infrastructure(s) retenue(s)

2.3.1 Arguments de l'utilisation du réseau existant

Dans ce cas, les principaux bénéfices en termes d'exploitation pour la circulation de véhicules automatisés sont :

- La réutilisation de l'infrastructure existante qui éviterait de chercher l'espace nécessaire à une nouvelle emprise de plus en plus rare en milieu périurbain.
- La corrélation étroite entre l'offre et la demande : déplacer le tracé d'une infrastructure automatisée loin des grandes agglomérations élimine une partie du trafic poids lourds interurbain.
- L'évolutivité de l'infrastructure : l'automatisation peut être étendue aux véhicules légers. Par ailleurs, dans le cadre des plans d'élargissements des autoroutes existantes, les infrastructures sont prévues pour anticiper l'augmentation du trafic.

Cependant, certaines interrogations pénalisent fortement cette solution :

- Peut-on envisager un trafic mixte sans séparation physique où les véhicules automatisés et les véhicules non automatisés circulent exclusivement sur leurs voies ?
- Comment traiter les situations d'urgence ?
- Comment gérer les accès au réseau ?
- La sécurité est-elle accrue ?
- La capacité est-elle améliorée ?

Peut-on envisager un trafic mixte sans séparation physique ?

L'insertion d'un véhicule entre deux poids lourds automatisés couplés électroniquement provoquerait un accident grave en raison de la perte de communication entraînée par cette insertion. Une forte répression suffirait-elle à empêcher des insertions inopinées ?

Comment gérer les accès au réseau ?

Les accès au réseau pour les véhicules manuels ne pourront plus s'effectuer avec la même souplesse qu'aujourd'hui si des trains de poids lourds circulent sur la voie lente. Un peloton de 4 PL a une longueur d'environ 150 m. Le conducteur en mode manuel doit anticiper sa sortie et accepter d'attendre la fin du passage d'un train de poids lourds avant de s'insérer sur les voies de circulation. Les entrées/sorties pour les véhicules manuels doivent être aménagées pour permettre la traversée des voies de trains de poids lourds en toute sécurité. Les voies d'accélération et de décélération devront

être allongées. Les conducteurs doivent également être informés, voire formés, à anticiper leurs sorties et accepter de se retrouver entre 2 trains de poids lourds pour effectuer les accès au réseau.

Pour assurer une sécurité totale aux accès du réseau et assurer tout le bénéfice d'une voie automatisée, il semble nécessaire de séparer les accès automatisés des accès manuels : les véhicules automatisés peuvent accéder au réseau en mode automatique, dans le cas de convois, des aires de délestages doivent être prévues pour la constitution de pelotons et l'attente des poids lourds. Les modifications d'infrastructure sont alors importantes : duplication des accès et évitement des voies automatisées. Ces modifications en terme d'aménagement et de coût sont considérables. Il devient quasiment impossible de créer des accès pour les véhicules automatisés reliés au réseau routier secondaire et dans un site qui permet le couplage de l'accès à l'aire.

La sécurité est-elle accrue ?

La bande d'arrêt d'urgence n'est accessible aux véhicules manuels qu'après la traversée de la voie automatisée. En cas de problème, le conducteur n'a probablement pas le choix d'attendre le créneau favorable pour cette traversée dans un scénario de convois de poids lourds. Un convoi de 4 poids lourds est un « bloc infranchissable » de 150 m de long minimum. Le risque qu'un véhicule s'insère entre deux poids lourds automatisés d'un convoi, interrompant la communication entre les véhicules, est important.

La capacité est-elle améliorée ?

On peut pressentir que le débit des poids lourds sera augmenté du fait de l'augmentation de la vitesse moyenne engendrée par l'automatisation et la fluidité d'une voie qui leur est réservée. De même, le retrait du trafic poids lourds sur les voies manuelles ne peut être que bénéfique en termes de sécurité. Cependant, il y a une voie de circulation en moins pour les véhicules en mode manuel. Pour la majorité des sections, il ne reste que deux voies de circulation. Par ailleurs, certains véhicules « lents » (caravanes, cars,...) ralentissent la vitesse moyenne sur les voies en mode manuel réduisant ainsi le débit total.

2.3.2 Arguments de la construction d'une voie supplémentaire

La principale raison d'accoler une voie à un réseau déjà construit est de réutiliser une infrastructure existante. Les accès sont les mêmes et la répartition des flux de PL est préalablement connue. La séparation des deux modes devrait améliorer notablement la sécurité sur le réseau automatisé ainsi que sur le réseau classique. De surcroît, la capacité du réseau classique est optimisée.

Deux inconvénients majeurs discréditent cette solution :

- Le coût d'élargissement d'une voie pour une autoroute est de 2,6 à 7,5 M€ / km en fonction de la difficulté d'élargissement de certains ouvrages d'art. La séparation des réseaux manuels et automatisés nécessite la construction d'une bande d'arrêt d'urgence pour chaque type de voie. Il faut donc prévoir deux voies additionnelles par sens. En prenant une moyenne de 4 M€ / km par voie, le coût d'élargissement minimum pour par exemple l'axe Calais - Bayonne (1100 km) est d'environ 8 800 M€, soit un coût supérieur de plus de 60 %, sans compter le coût des échangeurs et des aires dédiées au réseau automatisé, par rapport à la construction d'une autoroute nouvelle à 2 x 1 voie.
- En termes de génie civil, il n'est pas possible d'élargir certaines sections : ponts, autoroutes en zone urbaine.

2.3.3 Arguments pour la construction d'un réseau indépendant dédié

La construction d'une autoroute indépendante et dédiée aux PL automatisés présente de nombreux avantages :

- Les problèmes émanant du trafic mixte, la réservation de voies dédiées, les aménagements lourds aux entrées/sorties sont d'emblée résolus.
- Une structure adaptée aux nouveaux besoins de la route automatisée (entrées, sorties, échangeurs).
- Les contrôles d'accès sont plus faciles à mettre en place.
- En termes d'exploitation, un fonctionnement similaire au mode ferroviaire (ex : RFF et SNCF) peut être envisageable.

Le réseau indépendant permet une introduction progressive de véhicules automatisés sur le réseau routier. C'est avant tout un environnement de test idéal, permettant de mettre au point et d'affiner des stratégies d'exploitation adaptées à l'automatisation des poids lourds.

3 L'EXPLOITATION DE LA ROUTE AUTOMATISEE

3.1 Les besoins de la Route Automatisée

Cette partie aborde les besoins d'une route automatisée pour PL du point de vue d'un futur gestionnaire de cette infrastructure.

Sur une route automatisée pour PL, des dispositifs ainsi que des mesures d'exploitation sont à prévoir. Il sera mis l'accent sur les points suivants : géométrie, signalisation, conditions d'exploitation de l'infrastructure, organisation des secours et évacuation des usagers et enfin les équipements de sécurité.

3.1.1 Géométrie

Des règles d'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des routes automatisées pour PL devront être définies au même titre que celles existant aujourd'hui pour les Voies Rapides Urbaines ou les Autoroutes de Liaison (ICTAVRU et ICTAAL).

3.1.2 Conditions d'exploitation de la RA

Pour un niveau de sécurité particulièrement élevé, l'exploitant assurera un contrôle permanent de la circulation. Celui-ci permettra un contrôle des vitesses, la détection des accidents et le maintien de la fluidité. Des dispositions pourront être prévues. Elles sont décrites ci-dessous :

- Des équipements spécifiques devront permettre le contrôle permanent des vitesses pratiquées sur la totalité de la RA ;

- Des dispositifs dédiés à la détection des manœuvres dangereuses aux points de choix telles que : un arrêt supérieur à 10 secondes, un franchissement de ligne continue ou de zone interdite, susceptibles de perturber les conditions de circulation ;
- Un système de détection automatique d'incidents répondant à des objectifs tels que la détection de véhicules lents dont la vitesse est inférieure à 20 km/h, la détection de PL immobilisés. Ceci avec une probabilité de non détection inférieure à 1 pour 1000.

La route automatisée doit assurer une couverture totale du réseau en matière de détection d'incidents et de diffusion d'informations en temps réel sur l'état du trafic et les conditions de circulation. L'exploitant autoroutier assure déjà ces deux fonctions sur les infrastructures actuelles avec une qualité de service et une réactivité adaptée au trafic d'aujourd'hui.

Pour garantir une sécurité maximale sur une route automatisée, ces deux fonctions de détection d'incidents et de diffusion d'informations doivent être considérablement renforcées.

La détection d'incidents doit permettre de détecter et d'analyser en temps réel un événement. Cet événement peut être d'ordre climatique (neige, verglas, brouillard, etc.) ou d'ordre matériel (objet sur la chaussée, véhicule en panne, etc.). Cette information doit provenir de systèmes automatiques offrant une couverture maximale du réseau. Elle doit être fiable et diffusée en temps réel aux véhicules concernés. Le véhicule automatisé est équipé de capteurs qui pourront probablement détecter un obstacle sur une couverture de 100 m. Cette distance permet de diminuer le risque de collision. Les informations fournies par la détection d'incidents permettent d'anticiper les situations à risque et augmentent la sécurité sur le réseau. La validation de la détection sera assurée dans un délai de l'ordre de 20 à 30 secondes au maximum après la détection initiale.

Le système de DAI permettra à l'exploitant de neutraliser par feux en amont les sections concernées par l'incident, de déclencher l'envoi immédiat des moyens de dépannage et de secours et de réguler les entrées amont jusqu'à la fermeture si nécessaire.

Les véhicules qui circulent sur la route automatisée sont semi-automatisés (présence d'un chauffeur en tête de peloton).

L'automatisation devra reposer essentiellement sur l'intelligence embarquée des véhicules. L'infrastructure joue le rôle de relais et fournit, comme pour les autoroutes actuelles, des informations en temps réel sur les conditions de circulation et les événements prévalant sur la totalité du réseau.

Dans le cadre de sa mission d'exploitation, le gestionnaire d'infrastructures peut également fournir des consignes de circulation, en fonction des conditions de trafic sur chaque zone. Dans le cas de véhicules semi automatisés, c'est au chauffeur du véhicule de tête qu'appartiendra la décision d'appliquer ou pas les consignes données par l'exploitant de la route automatisée.

Le Poids Lourd garde la maîtrise des nouveaux systèmes embarqués d'aide à la conduite et de perception des paramètres externes. Ainsi, l'implication de l'infrastructure dans le processus de contrôle commande sera limitée et particulièrement dans le cas du contrôle latéral des PL.

L'exploitant de la route automatisée continue à assurer les missions de gestion de trafic, de maintien de la viabilité et d'aide au déplacement. L'infrastructure fournit toutes les informations sur les

événements et les conditions de circulation. Elles peuvent se décliner à travers des indications sur l'état de la route, la météo et les incidents, ainsi que certaines consignes d'optimisation de la circulation des PL automatisés (vitesse, distance inter véhiculaire,...). Le véhicule empruntant la route automatisée s'engage à les respecter. Le gestionnaire d'infrastructures assure des missions d'information et d'assistance aux Poids Lourds automatisés mais ne peut en aucun cas exercer une influence directe sur le comportement de ces véhicules.

3.2 Obligations et responsabilité de l'exploitant

Quel est le partage de responsabilité en cas d'un accident ?

De nombreux paramètres entrent en compte selon la cause et la gestion de l'accident.

Les origines d'un accident peuvent être nombreuses : défaillance technique du véhicule, obstacle non détecté, erreur de conduite, s'il y a un chauffeur, mauvaises conditions météorologiques, etc. La responsabilité sera-t-elle totalement imputable au constructeur qui n'a pas conçu un système assez robuste, au chauffeur qui n'a pas respecté une consigne, au gestionnaire d'autoroute pour diffusion d'informations erronées ou d'absence d'indication ?

Un cadre législatif adapté doit prendre en compte les aspects spécifiques aux besoins et au fonctionnement d'une route automatisée.

L'exploitant de la route automatisée sera tenu, sauf cas de force majeure dûment constaté, et quelles que soient les intempéries, de mettre en œuvre tous les moyens pour maintenir la continuité de la circulation dans de bonnes conditions de sécurité et de commodité.

Un nouveau schéma directeur d'exploitation de la route sera défini afin de prendre en compte les niveaux de gestion de la circulation de PL automatisés. La société concessionnaire et le ministère de tutelle chargé de la voirie se rapprocheront afin d'arrêter les modalités et les conséquences de sa mise en œuvre.

Trois ans avant la mise en service de cette Route Automatisée, un Plan de Gestion du Trafic (PGT) devra être élaboré conjointement entre la société concessionnaire et les responsables de l'exploitation des voies environnantes en respectant, d'une part la politique tarifaire qui préside à l'équilibre financier d'un contrat d'exploitation d'une RA pour PL, et d'autre part la politique globale d'exploitation de tout le réseau routier avoisinant.

Les ouvrages et les équipements dédiés à la route automatisée et établis en vertu d'une concession, seront entretenus en bon état et exploités par le concessionnaire de façon à toujours convenir parfaitement à l'usage auquel ils sont destinés.

La signalisation sur cette nouvelle infrastructure sera en permanence mise en conformité avec les règlements en vigueur.

Les lignes de télécommunications terrestres et aériennes contribuant à la sécurité des flux de poids lourds automatisés seront entretenues par la société concessionnaire.

4 L'INFRASTRUCTURE

4.1 Caractéristiques

L'infrastructure décrite est celle d'un réseau indépendant

La route automatisée pour poids lourds est une autoroute 2 x 1 voie (ou 2 x 2 voies selon le trafic) avec une bande d'arrêt d'urgence. La voie de circulation est de 3,5 m. La bande d'arrêt d'urgence peut être de 3 m ou 3,5 m, si une évolution du réseau vers une autoroute 2 x 2 voies est prévue. Les barrières de sécurité ne sont pas utiles et le terre-plein central peut être réduit à une bande de signalisation horizontale large. Deux systèmes contre les intrusions (animaux, véhicules non autorisés, personnes) doivent assurer une partie de la sécurité sur le réseau. Des fossés ou des buttes selon la topologie du site sont suffisants pour assurer une protection contre le passage d'animaux, de véhicules ou de personnes tout en participant à la préservation du paysage. Des contrôles d'accès par barrière, par exemple, permettent de refuser les véhicules non autorisés (véhicules léger, PL non équipés, véhicules défaillants, etc.).

L'espacement des accès dépend du tracé de la RA. Plus le tracé est proche des grandes et moyennes agglomérations, plus le nombre d'entrées/sorties est important. Chaque entrée/sortie doit être adaptée au scénario de circulation et au débit en chaque point. Le débit d'un accès situé près de Lille, Paris ou Bordeaux est supérieur à celui d'une entrée/sortie située près d'Angoulême. Le dimensionnement de ces points d'accès au réseau doit faire l'objet d'une étude poussée. Il n'est pas envisageable d'autoriser la sortie de véhicules à un débit que le réseau secondaire ne peut absorber. La gestion de trafic d'une RA doit prendre en compte l'état du réseau automatisé à un instant ainsi que l'état des routes adjacentes afin de gérer au mieux les accès et sorties.

Dans le cas d'une RA située près des agglomérations, les échangeurs peuvent être distants de 30 km. Dans le cas où la RA est éloignée des agglomérations, les échangeurs pourraient être distants de plus de 50 km. Cette RA ne concerne alors que le trafic 'grande distance' (supérieure à 400 km).

Les aires de service sont couplées aux entrées/sorties. Elles servent de centre de constitution de convois, cas du scénario de circulation « train de poids lourds statiques », ou de centre d'attente, cas des scénarios de « train de poids lourds dynamiques » ou « véhicules indépendants ». Dans tous ces cas, les aires n'ont pas la même fonction et elles devront être dimensionnées en conséquence.

Dans un scénario de circulation par train de poids lourds statique, la composition et décomposition des trains se font à l'arrêt sur des aires de triage. Pour chaque sens de circulation, une zone de triage permet la constitution des pelotons de poids lourds et une deuxième zone le démantèlement. Chaque aire doit avoir au moins quatre zones avec des voies d'accès des poids lourds individuels et des voies d'accès de trains de poids lourds à ces zones. Chaque zone doit pouvoir accueillir au minimum quatre pelotons de cinq véhicules.

Dans le cas d'un train de poids lourds dynamique, la constitution est réalisée sur l'autoroute. Il doit y avoir une aire d'attente avant l'entrée sur l'autoroute. Les poids lourds peuvent être dans l'obligation d'attendre quelques instants une place dans un train optimisé. L'espace est beaucoup moins important que dans le scénario précédent, seuls quelques poids lourds peuvent être simultanément en attente. Dans le cas contraire, le fonctionnement de la route automatisée ne serait pas optimisé.

Dans le scénario de véhicules automatisés indépendants, les aires ressemblent sensiblement aux aires actuelles, à la différence qu'elles n'accueillent que des poids lourds et sont réaménagées en conséquence. Il n'existe aucune contrainte particulière en terme d'infrastructure.

Selon le scénario de circulation, des véhicules indépendants ou en convoi empruntent les bretelles d'accès. Les voies d'accélération ou de décélération devront être prévues suffisamment longues afin de permettre le rattachement d'un poids lourd et sa séparation d'un convoi ou la circulation d'un convoi de plusieurs poids lourds.

Les principaux systèmes présents sur l'infrastructure sont les systèmes de transport de l'information, les systèmes de contrôle des véhicules ainsi que les systèmes de détection d'incidents et de surveillance.

La signalisation dynamique peut être nécessaire pour les scénarios avec chauffeur. Elle permet la redondance des informations essentielles et augmente la sécurité sur le réseau.

5 COUTS

5.1 Coûts d'élargissement

Le coût d'élargissement d'une voie d'une autoroute est de 2,6 à 7,5 M€ / km en fonction de la difficulté d'élargissement de certains ouvrages d'art.

Infrastructure	Coût unitaire (M€ HT)	<u>NB</u>	Coût (M€ HT)
Km d'autoroute en plaine / voie (hors échangeurs et aire de repos)	2,6 - 7,5	1120 km x 2	5824 - 16800
Aire associée à un échangeur	10	8	80
Échangeur	5,11	8	41
Voie de télépéage	0,04	100	2
TOTAL			5947 - 16923

5.2 Coûts de construction d'un nouveau réseau

Hypothèses :

- Axe d'étude Calais – Bayonne.
- Coût au kilomètre : coût moyen pour une région de plaine ou peu vallonnée dans un environnement peu contraignant (rase campagne).
- Axe 2 x 1 voie de 3,5 m avec une bande d'arrêt d'urgence de 3,0 m.
- Chiffrage au km ne tenant pas compte des contournements des grandes agglomérations, les spécificités du terrain, les grands ouvrages d'art (traversée de la Loire, par exemple).
- Distance estimée en tracé linéaire : environ 1120 km.
- Les aires sont couplées aux échangeurs.
- Les accès à l'autoroute sont des voies automatisées de type télépéage.
- Les équipements de supervision ne sont pas pris en compte dans ce chiffrage.

Notes :

- Les coûts d'ouverture de chantier, de planning et d'administration sont compris dans les estimations. Le coût au kilomètre intègre les dépenses relatives aux études préalables (avant projet sommaire, domaine foncier,...).
- Les ouvrages d'art (en moyenne un ouvrage tous les 20 km) sont compris dans les estimations.
- Les coûts unitaires indiqués sont des coûts minimums.

5.2.1 Scénario de convoi avec attelage statique

Infrastructure	Coût unitaire (M€ HT)	<u>NB</u>	Coût (M€ HT)
Km d'autoroute en plaine (hors échangeurs et aire de repos)	6,1	1120 km	6832
Aire associée à un échangeur	10	8	80
Échangeur	5,11	8	41
Voie de télépéage	0,04	50	2
TOTAL			6955

5.2.2 Scénario sans zone d'attelage

Infrastructure	Coût unitaire (M€ HT)	<u>NB</u>	Coût (M€ HT)
Km d'autoroute en plaine (hors échangeurs et aire de repos)	6,1	1120 km	6832
Aire associée à un échangeur	3,83	8	31
Échangeur	5,11	8	41
Voie de télépéage	0,04	50	2
TOTAL			6906

Le coût de construction d'un axe Calais - Bayonne automatisé est de l'ordre de 7 milliards d'€ environ.

5.3 Temps de construction

La construction d'une autoroute sans ouvrage d'art important dure 5 à 6 ans, dès l'acceptation du dossier. Les délais les plus longs pour le démarrage d'un tel projet sont les études amont :

acceptabilité du projet, procédures publiques (acquisitions, appels d'offres...), études préliminaires de terrain.

5.4 Coûts d'exploitation

On entend par coûts d'exploitation les principaux coûts de fonctionnement de la route automatisée.

Une solution pour évaluer ces coûts consiste à estimer la masse salariale nécessaire pour le fonctionnement du système. Pour une route automatisée, on peut considérer qu'il faille 1 personne par kilomètre. Pour une autoroute de 1120 km avec 8 000 à 10 000 PL/j, les coûts d'exploitation s'élèvent à environ 55 M€.

5.5 Coûts non estimables

Il est difficile d'évaluer le coût des nouveaux systèmes et particulièrement celui du système de gestion de trafic. Il est dépendant des scénarios de circulation et des systèmes de contrôle et de surveillance utilisés dans les 30 prochaines années.

La supervision d'une RA de convois de véhicules semi-automatisés est moins contraignante que celle d'une RA avec des véhicules totalement automatisés, mais la gestion de la constitution des convois implique la mise en place d'un système de gestion inédit jusqu'à aujourd'hui et une nouvelle forme de coopération entre l'exploitant et les clients gérés par diverses sociétés de transport aux intérêts et fonctionnements différents

5.6 Rentabilité

En se basant sur les connaissances actuelles, un ordre de grandeur peut être donné afin d'assurer la rentabilité d'une autoroute de poids lourds. Avec environ 10 000 PL/jour et par extrapolation, cet ordre de grandeur peut être pris pour évaluer le seuil de rentabilité de la RA, en considérant que les tarifs des péages sont fonction des services disponibles et des améliorations en terme de fluidité et de sécurité apportées par la Route Automatisée pour PL.

SCENARIOS DE DEPLOIEMENT DU CONCEPT RAPL

1 RESUME

L'infrastructure projetée est une autoroute à 2x1 voie dédiée au trafic poids lourd avec une BAU par sens pouvant servir de voie de service et éventuellement de voie en conduite manuelle dans le cas d'un mode dégradé. Il s'agit d'une voirie conventionnelle pour une circulation de poids lourds. Elle est équipée d'un système de détection des objets fixes ou mobiles : une caisse tombée d'un véhicule, un poids lourds en panne, un animal, un convoi en marche, ... ; dans les zones concernées elle est équipée d'un système hors gel, neige ou pluie, d'un système de récupération des gaz d'échappement dans les zones sensibles,...

Elle s'étend sur un millier de kilomètres depuis la frontière espagnole jusqu'à la frontière belge. Elle est dotée de 8 échangeurs qui la connectent avec les grands axes qui lui sont perpendiculaires. Ceux-ci permettant de collecter et de diffuser le trafic depuis et vers les grands centres de production et de consommation.

Les véhicules y circulent à 110 km/h.

Nous avons considéré trois scénarios :

- Un scénario d'attelage électronique de poids lourds en statique : des convois de poids lourds sont formés sur des aires spécialisées puis insérés sur l'autoroute. Les convois sont indéformables en section courante. Pour se désolidariser, le convoi de poids lourds doit rejoindre l'aire spécialisée où se réalisera le désattelage. Afin de conserver la plus grande flexibilité du système routier actuel tout en assurant la formation des convois, la règle de formation de ces derniers est la suivante : les poids lourds qui pénètrent l'aire d'attelage au fil de l'eau sont regroupés de manière à optimiser la composition du convoi.
- Un scénario d'attelage électronique de poids lourds en dynamique : les poids lourds s'insèrent directement sur l'infrastructure. Le système d'optimisation est plus communiquant que dans le cas précédent et favorise des « rendez-vous » entre poids lourds de manière à optimiser la composition des convois.
- Un scénario de route automatisée : le système prend la main sur le chauffeur et ce avant l'insertion du poids lourds sur l'infrastructure. C'est le système qui génère des créneaux permettant aux véhicules entrants de s'insérer et qui pilote l'insertion, la conduite puis la sortie des poids lourds de l'infrastructure.

Dans les trois cas, à degré divers, le nouveau système permet d'augmenter le débit maximum de l'infrastructure, d'améliorer la sécurité et de dispenser tout ou partie des poids lourds d'un chauffeur actif.

Concernant le déploiement dans le temps des divers scénarios, il est envisagé une autoroute dédiée sur laquelle ne circuleront que des poids lourds équipés.

En effet, si tel n'était pas le cas, et compte tenu de l'unicité de la voie de circulation, un poids lourd équipé qui serait précédé par un poids lourd non équipé devrait le suivre dans les conditions de circulation du poids lourd non équipé : vitesse, risque de panne, d'accident, ... Il perdrait ainsi tous les avantages dont il devait bénéficier en empruntant cette autoroute.

Pour se lancer dans l'opération, l'exploitant de la route doit alors être assuré que le jour de son ouverture, le trafic de poids lourds équipés (les seuls empruntant son infrastructure) sera suffisant.

De ce qui précède, il ressort que le concept de route automatisée ou de conduite en convois doit être développé par un consortium, formel ou non, comprenant le ou les futurs gestionnaires de l'infrastructure, des transporteurs représentant une masse critique acceptable et un ou des équipementiers de poids lourds.

Le ou les gestionnaires de l'infrastructure s'engageront à fournir celle-ci et les services l'accompagnant à la date prévue ; les transporteurs s'engageront à équiper leurs poids lourds, à former leurs chauffeurs et à utiliser la nouvelle infrastructure dans les conditions définies. Les équipementiers s'engageront à fournir les équipements nécessaires aux poids lourds.

Dans le rapport du Thème 6, nous considérerons également le cas où la montée en charge du trafic serait progressive et sur 5 ans.

2 INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet de présenter trois scénarios pour la nouvelle infrastructure.

Les deux premiers scénarios se basent sur la technologie de l'attelage électronique de poids lourds telle que définie dans le projet « Promote Chauffeur ». De façon très résumée, l'attelage électronique de poids lourds consiste à former un convoi de poids lourds tel que:

- L'interdistance véhiculaire soit minimale (de l'ordre de la dizaine de mètres) ;
- Le premier poids lourd soit conduit par un chauffeur ;
- Les poids lourds suivants se comportent comme des « remorques », c'est à dire qu'ils suivent la conduite menée par le poids lourd de tête sans intervention de leur conducteur.

La différenciation de ces deux scénarios porte sur le mode d'attelage : statique (poids lourds à l'arrêt) ou dynamique (poids lourds en mouvement). D'autres scénarios sont bien évidemment jouables.

L'intérêt de la démarche consiste surtout à montrer que l'application de cette technologie peut engendrer des systèmes opérationnels bien différents et conduire à des investissements de nature et de montant également bien différents : pour l'essentiel, à la plate-forme physique nécessaire à l'attelage statique se substituera, pour l'attelage dynamique, une plate-forme « informative » qu'elle soit centralisée ou embarquée.

Le troisième scénario porte sur le concept de route automatisée. Il s'agit d'un système fortement coopératif entre l'infrastructure et le véhicule tel que la conduite du véhicule soit automatisée, c'est à dire sans intervention d'un conducteur humain.

3 SCENARIO D'ATTELAGE ELECTRONIQUE DE POIDS LOURDS EN STATIQUE

Concept : les poids lourds se regroupent sur une plate-forme sur laquelle ils sont organisés en convois indéformables jusqu'à leur arrivée sur une autre plate-forme.

3.1 Le scénario

3.1.1 Cas du poids lourd quittant son lieu de chargement

Sur son ordinateur de bord, le chauffeur du poids lourd indique sa destination. Un itinéraire lui est alors communiqué. Il quitte ainsi son lieu de chargement et se dirige vers la plate-forme d'attelage correspondante.

En amont de la plate-forme, il franchit la borne de contrôle qui réalise le check-up de conformité du véhicule (niveau de carburant, temps de conduite du chauffeur, système de frein, équipement embarqué, etc.), l'enregistrement de sa destination, ...

Il reçoit alors un message lui indiquant s'il est autorisé ou non à accéder à la plate-forme. Dans la négative, la raison du refus lui est communiquée ainsi que ce qu'il doit faire pour être autorisée à accéder à l'autoroute (prendre du carburant car son niveau actuel ne permet pas de rejoindre sa destination, mettre à niveau sa pression des pneumatiques, réparer tel organe défectueux, ...).

A l'entrée de la plate-forme, une borne vérifie que le poids lourd est habilité à y accéder. Le cas échéant, une barrière ferme l'accès et oblige le poids lourd à ressortir. Sinon, une barrière ferme la piste de sortie et le poids lourd s'engage sur la bretelle d'accès à la plate-forme.

Un message parvient alors au chauffeur pour lui indiquer le numéro de sa piste d'attelage.

Il se dirige vers la piste en question, se positionne derrière le poids lourd qui s'y trouve et s'y attelle, à moins qu'il ne soit le 1^{er} poids lourd. Auquel cas, il se positionne au début de la piste d'attelage.

Lorsque le convoi est organisé, il démarre pour aller rejoindre sa plate-forme de destination.

Un feu bicolore installé au début de la voie d'accélération indiquera au chauffeur le moment où il peut s'élancer pour s'insérer sur l'autoroute en fonction des convois qui y circulent.

L'échange d'information :

- D'origine humaine : le chauffeur saisit sa destination.
- D'origine automatique : calcul d'itinéraire, check up du véhicule, autorisation d'accès, numéro de piste, ordre de départ du convoi, autorisation d'insertion du convoi sur l'autoroute.

3.1.2 Cas des poids lourds qui circulent sur l'autoroute

Nous sommes sur l'autoroute et en amont de chaque plate-forme, une borne située sur le bord de l'autoroute réalise un check-up de conformité des poids lourds attelés et vérifie leurs destinations respectives.

Si aucun des poids lourds constitutifs du convoi n'est arrivé à destination et qu'ils sont tous en conformité technique, le convoi poursuit sa route ; le feu autorisant l'insertion d'un convoi depuis la plate-forme se met au rouge.

Dans le cas contraire, c'est-à-dire si au moins un des poids lourds constitutifs du convoi est arrivé à destination, ou si le chauffeur de tête a atteint son temps de conduite maximum, ou qu'il souhaite céder son rôle de conduite ou bien encore si une non-conformité technique d'un des véhicules est détectée, ... alors, un signal réveille les chauffeurs correspondants. Une réponse est attendue afin de vérifier que les dits chauffeurs sont opérationnels. Le convoi sort alors de l'autoroute et se dirige vers la piste de désattelage qui lui est indiquée. Les chauffeurs actifs sont alors informés de leur autorisation de se ré-atteler.

Le convoi atteint une piste de désattelage. Sur celle-ci, les poids lourds se désattellent et se dirigent vers la bretelle de sortie où les formalités de télépéage sont réalisées. Une borne vérifie la destination du poids lourd et active le système de barrière destiné à orienter le poids lourd (ou la partition de convois) vers la piste d'attelage ou vers la sortie (pour des poids lourds désattelés).

L'échange d'information :

D'origine humaine : demande du chauffeur d'un arrêt, confirmation de réveil

D'origine automatique : check up véhicules, interdiction de continuer, réveil, autorisation d'accès, numéro de piste, ordre de départ du convoi, autorisation d'insertion du convoi sur l'autoroute.



Le convoi atteint la vitesse maximale

Un feu autorise ou non l'insertion sur l'autoroute

Le Poste de Commande centralise toutes les informations, il organise des convois optimisés sur un double critère :
- le moindre temps d'attente
- des distances entre plates-formes d'attelage maximales

La borne détecte le passage de convois et active le feu d'insertion

Borne Check up

Le numéro de la piste d'attelage est communiqué au Chauffeur

La borne commande la barrière d'accès à la piste d'attelage

Une barrière oblige les poids lourds non conformes à ressortir

Aire de Services et de Repos

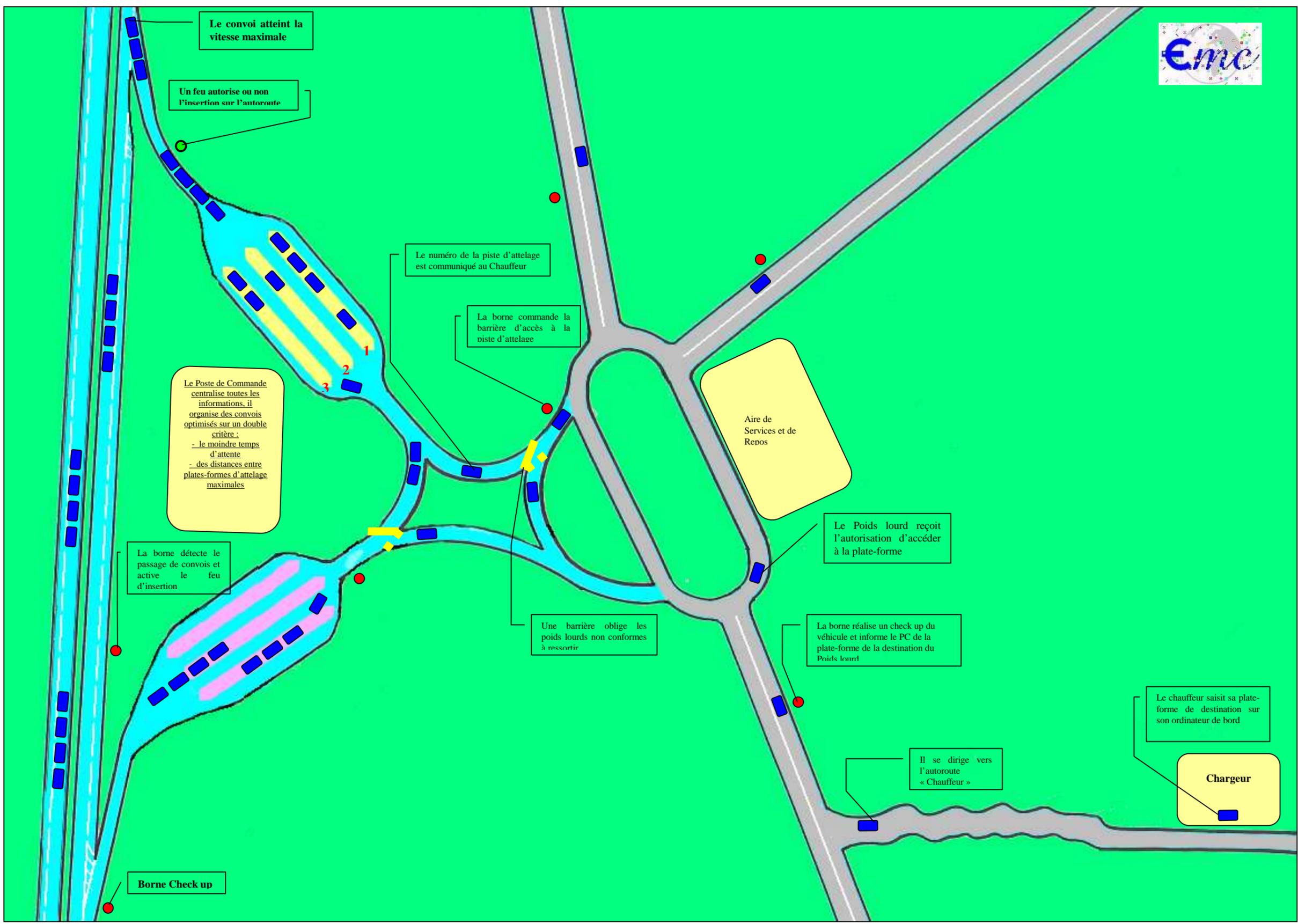
Le Poids lourd reçoit l'autorisation d'accéder à la plate-forme

La borne réalise un check up du véhicule et informe le PC de la plate-forme de la destination du Poids lourd

Il se dirige vers l'autoroute « Chauffeur »

Le chauffeur saisit sa plate-forme de destination sur son ordinateur de bord

Chargeur



3.2 Description du système

La voirie : elle est constituée, par sens, d'une voie de 3,50 m et d'une BAU servant de voie de service et éventuellement de voie en conduite manuelle dans le cas d'un mode dégradé. Il s'agit d'une voirie conventionnelle pour une circulation de poids lourds. Elle est équipée d'un système de détection des objets fixes ou mobiles : une caisse tombée d'un véhicule, un poids lourd en panne, un animal, un convoi en marche, ... ; dans les zones concernées elle est équipée d'un système hors gel, neige ou pluie, d'un système de récupération des gaz d'échappement dans les zones sensibles,...

Les plates-formes : Elles sont constituées d'une zone de désattelage, de zones de circulation, d'une zone d'attelage, de pistes d'accès (un accès depuis l'autoroute et un accès depuis la voirie classique) et de pistes de sortie (une voie d'insertion vers l'autoroute et une sortie vers la voirie classique).

A noter que leur couplage avec des plates-formes logistiques pourrait se révéler intéressant de par la mutualisation des espaces de circulation et les potentiels de formation de convois.

Le système d'optimisation des convois : un poste de commande de la plate-forme centralise toutes les destinations des poids lourds en conformité, qui se trouvent entre la borne de check-up et l'accès à la zone d'attelage. Un système relativement simple peut alors calculer les arrangements optimaux des dits poids lourds et leur indiquer le numéro de leur piste d'attelage. Les informations d'arrivée de véhicules peuvent également être transmises par les gestionnaires de fret pour améliorer l'optimisation des convois.

L'optimisation pourrait se faire sur les bases suivantes :

- Former des convois-blocs : c'est à dire des convois ayant la même destination afin d'éviter une rupture de charge.
- Former des convois hétérogènes pour lesquels la rupture de charge correspond à un arrêt obligatoire (cas du chauffeur de tête ayant atteint son temps limite de conduite).
- Minimiser le temps d'attente ce qui signifie la possibilité de faire partir un convoi de moins de 4 poids lourds si le délai d'attente (à préciser) est trop important.

Les pistes d'attelage : il s'agit ni plus, ni moins, que d'une zone de la chaussée qui pourrait, par exemple, être matérialisée par une couleur spécifique. En aucun cas, elles ne sont liées à une destination en particulier, la plate-forme destination est donnée par celle du premier poids lourd qui s'y trouve.

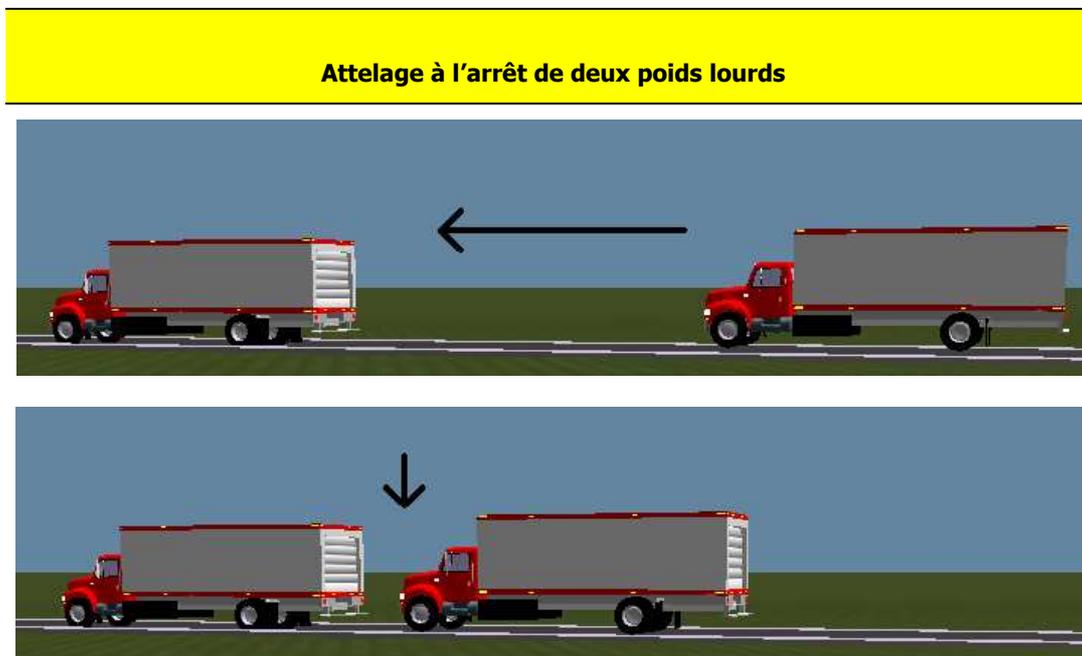
Ce principe de fonctionnement basé sur l'ordre d'arrivée a le mérite d'être simple et rapide. Les convois sont formés en flux continu, l'attente en formation de convoi est minimale.

La position du poids lourd dans le convoi est donc aléatoire puisqu'elle dépend de son ordre d'arrivée. Si aucun convoi n'est en formation, le premier poids lourd qui se présente, devient une tête de convoi. Si un convoi est en formation, il devient élément intermédiaire du convoi ou sa queue selon le nombre de poids lourds déjà attelés.

Nombre de pistes d'attelage : En considérant une durée d'attelage de 1 minute (le poids lourd s'avance lentement jusqu'à l'interdistance d'enclenchement du système), une piste d'attelage aurait une capacité de 60 poids lourds par heure soit 15 convois par heure. Le nombre de piste dépend donc du nombre de convois que l'on veut obtenir par heure.

Notons que la capacité en formation de convois de la plate-forme est contrainte par le débit observé sur l'autoroute puisque nécessairement, pour pouvoir s'y insérer, il faut bien que la voie soit libre...

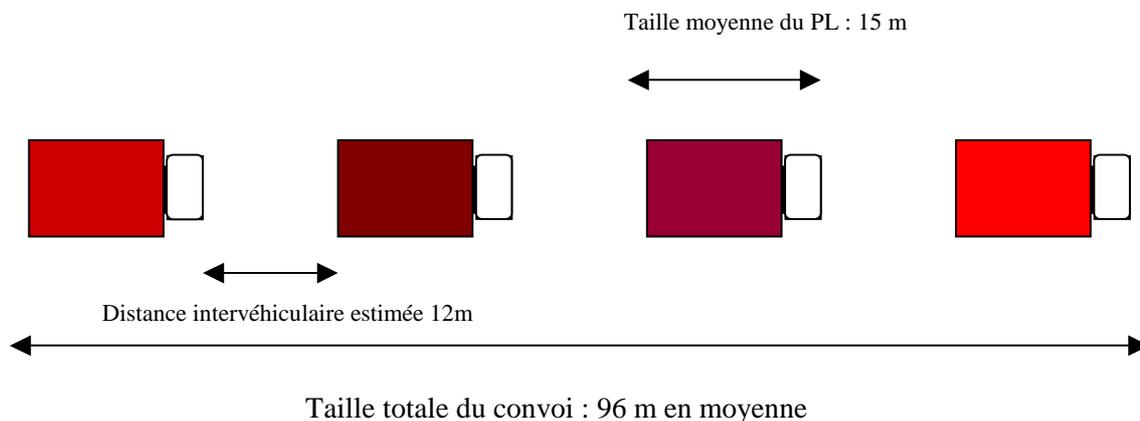
L'attelage : Il se réalise comme suit : le poids lourd suiveur se positionne derrière le poids lourd qui le précédera et qui se trouve à l'arrêt, l'attelage se fait simultanément. Le temps d'attelage correspond au seul temps de positionnement.



Le premier poids lourd est à l'arrêt, le second poids lourd s'avance lentement jusqu'à ce que le système prenne la main.

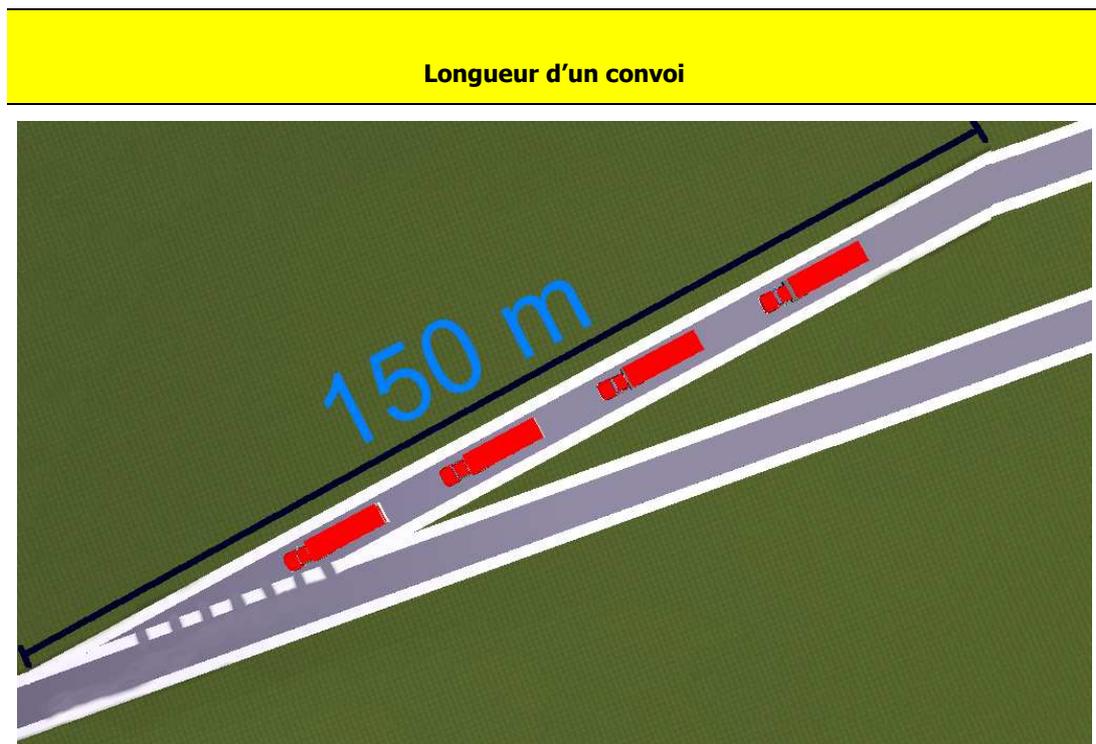
Nombre de véhicules constitutifs d'un convoi : dans l'absolu, les convois de poids lourds ne sont pas limités en nombre de poids lourds attelés électroniquement (concept du « platooning »). Du point de vue expérimental, c'est l'attelage de 2 poids lourds (concept du « Tow Bar ») qui a été réalisé.

Un convoi (c'est à dire l'équivalent d'un bloc impénétrable) de 4 poids lourds représente une longueur d'environ 90 m (hors distance de sécurité que doit respecter le 1^{er} poids lourd), un convoi de 10 poids lourds représente une longueur d'environ 240 m.



Remarque : dans un tel convoi on suppose actuellement que les véhicules ont les mêmes caractéristiques. Il sera nécessaire à terme d'intégrer au problème relatif à la poursuite des camions. En effet, on peut considérer que tous les poids lourds non pas la même accélération, ni le même poids. Les performances du convoi doivent donc se baser sur le camion le plus « faible ».

Aussi, pour des considérations physiques (taille de la plate-forme, longueur des voies d'accélération et de décélération en insertion et sortie de l'autoroute, ...), éventuellement de sécurité (nombre de véhicules impliqués dans un même accident, gravité, ...) mais surtout pour des raisons de souplesse dans la formation des convois, il semblerait que le nombre de poids lourds attelés dans un même convoi ne peut dépasser les quelques unités.



Sur une autoroute conventionnelle, les voies d'accélération mesurent environ 150m. Un convoi de quatre poids lourds attelés électroniquement mesure 90 m de long.

Accès des convois à l'autoroute : Cette insertion pose problème de par la longueur du convoi qui requiert l'existence, en aval de son point d'entrée, d'une interdistance suffisante pour ne pas faire freiner les véhicules en provenance de l'autoroute. Il apparaît nécessaire qu'un système régule l'accès à l'autoroute. Par exemple, il peut s'agir d'un feu qui permettrait ou non l'insertion du convoi en fonction de l'interdistance entre le convoi et le premier véhicule en aval de son point d'entrée.

Les poids lourds : ils sont équipés de systèmes d'aides à la conduite (calcul d'itinéraire, détection d'obstacles, détection de sortie de voie, ...) et d'un système d'attelage électronique. Selon le poids lourd, l'habitacle est prévu pour donner tout le confort nécessaire pour y séjourner, se reposer, se restaurer sur une longue durée : couchette, toilettes, multimédia, connexion audio-vidéo avec le domicile du chauffeur, ...

Les conducteurs : le conducteur du poids lourd de tête conduit le convoi ; les conducteurs des autres poids lourds du convoi sont en pause, ils peuvent y compris dormir.

La législation : Compte tenu des améliorations en terme de sécurité, on supposera une vitesse de 110 km/h, une interdistanse entre poids lourds d'un même convoi de 15 m et une interdistanse entre convois de 45 m (cf. Chapitre « Analyse capacité-sécurité de scénarios de route automatisée poids lourds » par Saïd Mammar).

Pour ce qui est des temps de conduites, nous nous placerons dans le cadre général, à savoir : 4h30 maximum sans interruption avec 45 minutes d'interruption prise en une seule fois et une conduite journalière de 9h00 maximum suivi d'une période de repos d'au moins 11 heures consécutives.

Comme cela est actuellement autorisé dans le cadre du ferroutage (les wagons roulent...), on supposera que la législation autorise que les temps de pause et de repos soient pris dans un véhicule roulant (aujourd'hui, la pause peut être prise dans un véhicule roulant mais la nuité doit se faire à l'arrêt) dès lors que celui-ci répond à des normes de confort et de cadre de vie (voir ci-dessus le paragraphe « Les poids lourds »).

L'interdistanse entre plates-formes : sur la base d'une vitesse 110 km/h, 4h30 de conduite permettrait de parcourir au plus 500 km.

Cela dit, du fait que pour parvenir à la plate-forme d'attelage, les chauffeurs aient déjà accumulé un temps de conduite et l'éventuelle impossibilité de maintenir une vitesse constante de 110 km/h (pour cause de visibilité, incident, ...), l'interdistanse entre plates-formes doit être moindre ou du moins des aires de stationnement intermédiaires doivent être aménagées.

D'autre part, compte tenu de la grande diversité des origines et des destinations¹⁷ des poids lourds, une interdistanse entre plates-formes d'attelage de 100 à 150 km semblerait raisonnable. De plus, celles-ci devraient se situer à proximité des grands centres de production et de distribution.

Les aires de service et de repos : elles sont situées à l'extérieur de la plate-forme d'attelage/désattelage. En effet, dans l'enceinte de la plate-forme, tout est fluide et est organisé en flux tendus. Tout ce qui pourrait pénaliser la fluidité est reporté à son extérieur (boire un café, le plein d'essence, passer aux toilettes, vie sociale, réparation, ...).

Le péage : il s'agit d'un système de péage électronique basé sur un tarif au kilomètre permettant, de ce fait, les sorties et entrées sur le réseau sans pénalité.

Carburant : les poids lourds fonctionnent au gazole et leur consommation se réduit en moyenne de 1% par an¹⁸.

¹⁷ Marin, Emmanuel .2002., « Détection d'opportunités de report modal selon deux stratégies de massification de flux de poids lourds en nombre et tonnage », Bureau d'Etudes EMC - Ministère de l'Equipement, du Transports, du Logement, du Tourisme et du la Mer, 21 pages

¹⁸ « La consommation unitaire des poids lourds se réduit en moyenne de 1% par an depuis 10 ans » - Source site www.fntr.fr

Le ou les gestionnaires du système : il leur incombe les principales fonctions suivantes :

- Le système de façonnage des convois;
- La gestion de l'information;
- La gestion du trafic;
- La coordination avec le réseau conventionnel;
- la gestion des pannes;
- la gestion des incidents / accidents;
- la gestion des intempéries;
- la gestion des transactions de péage;
- la maintenance de l'infrastructure.

Les véhicules de service : l'important est leur capacité et réactivité d'intervention en cas d'incident ou d'accident sur l'autoroute.

Le système d'information : Ce scénario ne requiert pas d'un système d'échange d'informations évolué hormis au niveau de la plate-forme.

3.3 Systèmes de communication

3.3.1 Communication véhicule-véhicule

Pour ce qui concerne la communication dans un convoi de camions, que deux types de communication peuvent être envisagés :

- Par diffusion : le premier camion envoie l'information aux autres camions du convoi : Temps de réponse total = Temps de diffusion.
- De proche en proche : C'est à dire que chaque camion communique avec celui qui le précède et celui qui le suit. Temps de réponse total = Somme des temps de diffusion du premier au dernier.

La transmission par diffusion semble la plus rapide mais elle est difficilement réalisable en pratique pour un convoi plein. En effet, le premier camion devra communiquer sur une distance totale de 100 m environ et aujourd'hui aucun système de communication n'est vraiment assez rapide et fiable pour réaliser ce type de communication. La solution de communiquer de proche en proche sera donc sans doute la meilleure car chaque camion ne devra plus communiquer au maximum que sur une quinzaine de mètres (suivant l'emplacement des antennes sur chaque camion).

La mise en place de la communication entre véhicules est réalisée simplement puisque les convois sont constitués en statique.

Par ailleurs, le système de communication doit être tel qu'un convoi ne doit pas subir d'interférences avec un autre convoi ce qui pourrait avoir des conséquences dramatiques.

Dans la plupart des projets où les camions sont en attelage, un système de communication permet aux deux véhicules de dialoguer. Ce système améliore la sécurité et permet la transmission d'informations tel que la vitesse, l'angle de braquage, ... du premier véhicule de manière à mieux appréhender le profil de la route et, en particulier les virages.

Cette communication est aussi très pratique lors de réaction d'urgence du style freinage brutal. En effet, les systèmes vidéos conçus jusqu'alors ont un temps de réaction de 80 ms : détecter une rampe de feux à l'arrière du véhicule précédent prendrait donc 80 ms. On peut donc penser qu'en détectant une pression anormalement élevée sur la pédale de frein et en la communiquant aux camions suivants cela serait plus efficace puisque que le temps de réponse d'un système tel que le DSRC est de 50 ms. Par comparaison, l'être humain réagira en 1 seconde à un événement de ce type.

La communication est également utilisée pour un contrôle permanent du système. Les deux camions échangent constamment des messages sur leur état. Le moindre problème est alors immédiatement répercuté aux systèmes de contrôle des deux camions. Généralement, l'information entre les deux véhicules est échangée beaucoup plus souvent qu'il ne le faut pour lutter contre les messages erronés et perdus.

3.3.2 Communication véhicule –infrastructure

La communication dans ce scénario est relativement simple. Sur chaque aire de formation de convois, le système d'information devra posséder des moyens de communication (des capteurs de présence ou par une communication du type télépéage) avec les véhicules de manière à former les convois, et des informations sur l'entrée et la sortie des véhicules et des convois de cette zone. L'identification des véhicules et la file d'attente pourront être réalisées par des balises ou des badges DSRC.

Le système d'information de l'aire de formation a toutes les informations relatives aux camions présents, approchant ou sortant de sa zone.

Un système global de communication au niveau de l'infrastructure est nécessaire prévenir les usagers pour prévenir de tout problème de circulation, d'un accident, d'embouteillages,

Parmi les avantages de cette solution, on peut citer :

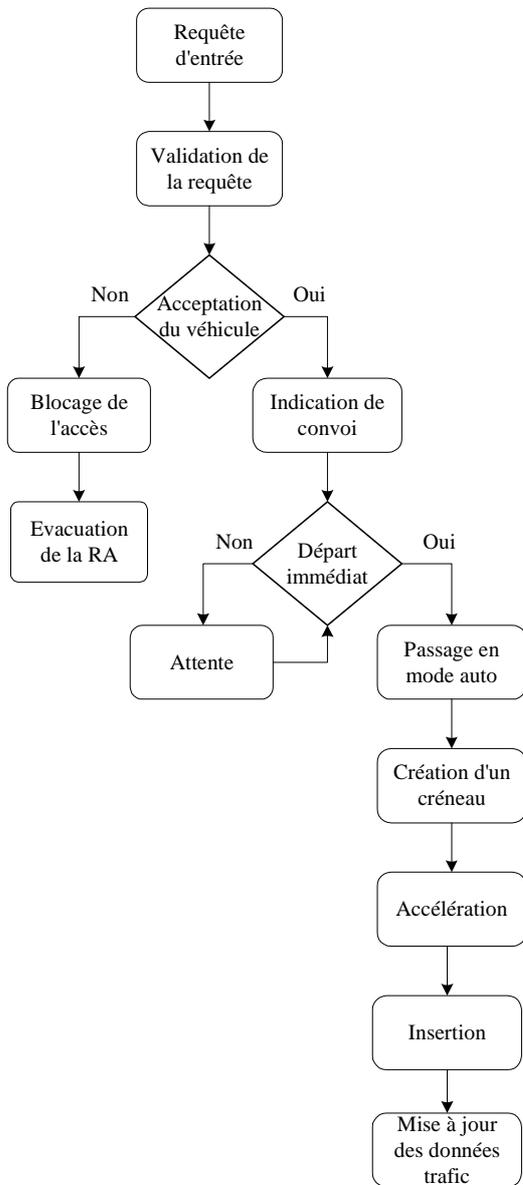
Le principal avantage de ces aires de formation est que la communication générale sera sans aucun doute aisée à mettre en place. En effet, les camions doivent être mis en relation avec l'infrastructure, uniquement au moment de l'identification et des files d'attente. Puis c'est la communication entre les camions du convoi qui prend le relais.

Le second point positif de cette méthode est que la formation du convoi et sa séparation se font en dehors de l'infrastructure routière, sur des aires réservées.

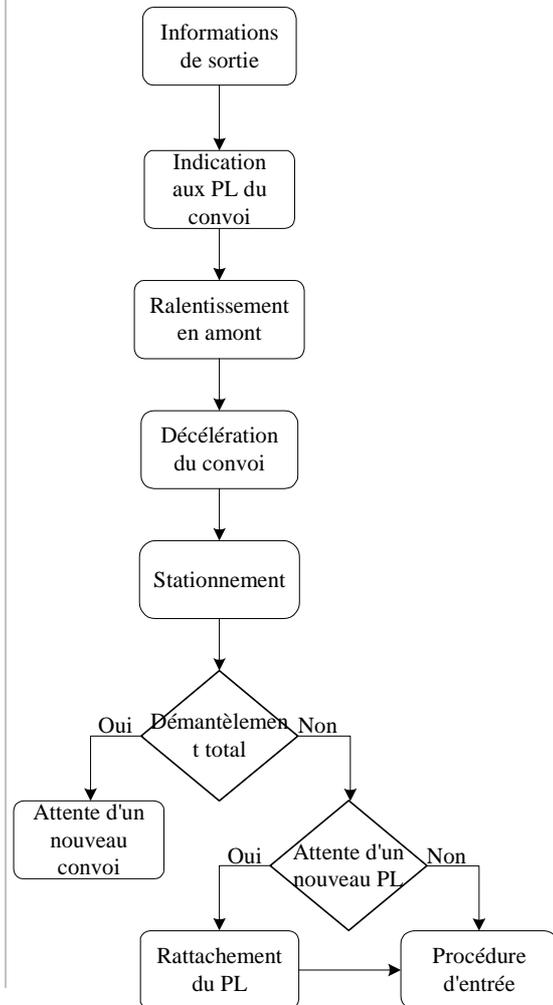
En contre partie, cette solution a les inconvénients suivants :

- Le système risque d'imposer à certains camions et pour certaines destinations peu demandées une attente inutile puisque qu'aucun convoi ne sera peut-être formé.
- Le deuxième inconvénient majeur est un coût non négligeable engendré par la construction de ces aires et supporté par les sociétés d'autoroute (et sans doute également par les entreprises de transport au travers des péages).

3.4 Architecture sommaire du système



Entrée sur la RA - Convoi avec attelage statique



Sortie de la RA - Convoi avec attelage statique

4 SCENARIO D'ATTELAGE ELECTRONIQUE DE POIDS LOURDS EN DYNAMIQUE

Concept : les poids lourds se regroupent et se dégroupent sur la voie même où ils circulent.

4.1 Le scénario

4.1.1 Cas du poids lourd quittant son lieu de chargement

Sur son ordinateur de bord, le chauffeur du poids lourd indique sa destination. Un itinéraire lui est alors communiqué. Il quitte ainsi son lieu de chargement et se dirige vers l'entrée d'autoroute correspondante.

Dès qu'il arrive dans le rayon d'action du COC (Centre d'Optimisation des Convois), le poids lourd lui communique diverses données, comme par exemple : sa destination, sa localisation actuelle, sa vitesse et tous les éléments permettant de faire le check-up de conformité du véhicule (niveau de carburant, système de frein, équipement embarqué, etc.).

Il reçoit un message lui indiquant si sa demande d'accès à l'autoroute est autorisée ou non. Dans ce dernier cas, la raison lui est communiquée ainsi que ce qu'il doit faire pour être autorisée à accéder à l'autoroute (prendre du carburant car son niveau actuel ne permet pas de joindre sa destination, mettre à niveau sa pression des pneumatiques, réparer tel organe défectueux, ...)

Pour le poids lourd autorisé, jusqu'à son arrivée à l'entrée de l'autoroute, une intercommunication permet au COC d'actualiser ses données et d'envoyer de nouveaux messages au chauffeur, notamment pour lui indiquer de ralentir ou d'accélérer afin de s'insérer dans l'autoroute au moment opportun.

A l'entrée de l'échangeur, une borne vérifie que le poids lourd est habilité à y accéder. Si tel est le cas, le poids lourd s'engage sur la bretelle d'accès à l'autoroute. Sinon, une barrière ferme l'accès et oblige le poids lourd à ressortir.

Le poids lourd autorisé se dirige au début de la piste d'accélération et s'arrête. Dès qu'il reçoit l'autorisation, le poids lourd démarre, accélère et s'insère sur l'autoroute à la vitesse indiquée par le COC. Cette vitesse permettra au poids lourd soit de rattraper un véhicule isolé ou un convoi déjà formé et de s'y atteler, soit d'être rattrapé par un véhicule isolé ou un convoi déjà formé et d'en prendre la tête.

4.1.2 Cas des poids lourds en circulation sur l'autoroute

Dès qu'ils arrivent dans le rayon d'action du COC (Centre d'Optimisation des Convois), les poids lourds lui communiquent leurs diverses données comme par exemple : leur destination, leur localisation actuelle, leur vitesse, tous les éléments permettant de faire le check-up de conformité de leurs véhicules (niveau de carburant, système de frein, équipement embarqué, etc.), l'historique du temps de conduite des différents chauffeurs du convoi, ...

En retour, ils reçoivent des instructions qui peuvent être de se désatteler, de sortir afin de remédier à une défaillance (niveau de carburant, problèmes mécanique, ...), de ralentir pour faciliter l'attelage

d'un nouveau poids lourd, de continuer tel quel, etc. Un signal réveille les chauffeurs correspondants (ceux dont les poids lourds sont arrivés à destination, celui qui prendra le prochain tour de conduite, celui qui doit sortir par la détection d'une non-conformité, ...), une réponse est attendue afin de vérifier que les dits chauffeurs sont opérationnels. Selon le cas, ils sont alors informés de leur autorisation de se ré-atteler.

Les poids lourds sortants empruntent la bretelle de sortie et les formalités de télépéage sont réalisées.

Les autres poids lourds continuent leur route sur l'autoroute à la vitesse indiquée par le COC et se ré-attellent selon les indications données par le COC.

4.2 Description du système

La voirie : elle est constituée, par sens, d'une voie de 3,50 m et d'une BAU servant de voie de service et éventuellement de voie en conduite manuelle dans le cas d'un mode dégradé. Il s'agit d'une voirie conventionnelle pour une circulation de poids lourds. Elle est équipée d'un système de détection des objets fixes ou mobiles : une caisse tombée d'un véhicule, un poids lourds en panne, un animal, un convoi en marche, ... ; dans les zones concernées elle est équipée d'un système hors gel, neige ou pluie, d'un système de récupération des gaz d'échappement,...

Les poids lourds : ils sont équipés de systèmes d'aides à la conduite (calcul d'itinéraire, détection d'obstacles, détection de sortie de voie, ...) et d'un système d'attelage électronique. Selon le poids lourd, l'habitacle est prévu pour donner tout le confort nécessaire pour y séjourner, se reposer, se restaurer sur une longue durée : couchette, toilettes, multimédia, connexion audio-vidéo avec le domicile du chauffeur, ...

Les conducteurs : le conducteur du poids lourd de tête conduit le convoi ; les conducteurs des autres poids lourds du convoi sont en pause, ils peuvent y compris dormir.

La législation : Compte tenu des améliorations en terme de sécurité, on supposera une vitesse de 110 km/h, une interdistanse entre poids lourds d'un même convoi de 15 m et une interdistanse entre convois de 45 m (cf. Chapitre « Analyse capacité-sécurité de scénarios de route automatisée poids lourds » par Saïd Mammari).

Pour ce qui est des temps de conduites, nous nous placerons dans le cadre général¹⁹ à savoir : 4h30 maximum sans interruption avec 45 minutes d'interruption prise en une seule fois et une conduite journalière de 9h00 maximum suivi d'une période de repos d'au moins 11 heures consécutives.

Comme cela est actuellement autorisé dans le cadre du ferroulage (les wagons roulent...), on supposera que la législation autorise que les temps de pause et de repos soient pris dans un véhicule roulant (aujourd'hui, la pause peut être prise dans un véhicule roulant mais la nuité doit se faire à l'arrêt) dès lors que celui-ci répond à des normes de confort et de cadre de vie (voir ci-dessus le paragraphe « Les poids lourds »).

L'interdistanse entre échangeurs : sur la base d'une vitesse 110 km/h, 4h30 de conduite permettrait de parcourir au plus 500 km.

¹⁹ DTT- Ministère de l'Équipement .2000. « Réglementation sociale européenne dans les transports routiers »

D'autre part, compte tenu de la grande diversité des origines et des destinations²⁰ des poids lourds, une interdistance entre échangeurs de 100 à 150 km semblerait raisonnable. Ceux-ci se permettraient une interconnexion avec les grands axes perpendiculaires à la nouvelle infrastructure afin de collecter et de diffuser le trafic correspondant depuis et vers les grands centres de production et de consommation.

Les entrées : Il s'agit d'entrées conventionnelles par lesquelles, les poids lourds s'insèrent sur l'autoroute individuellement.

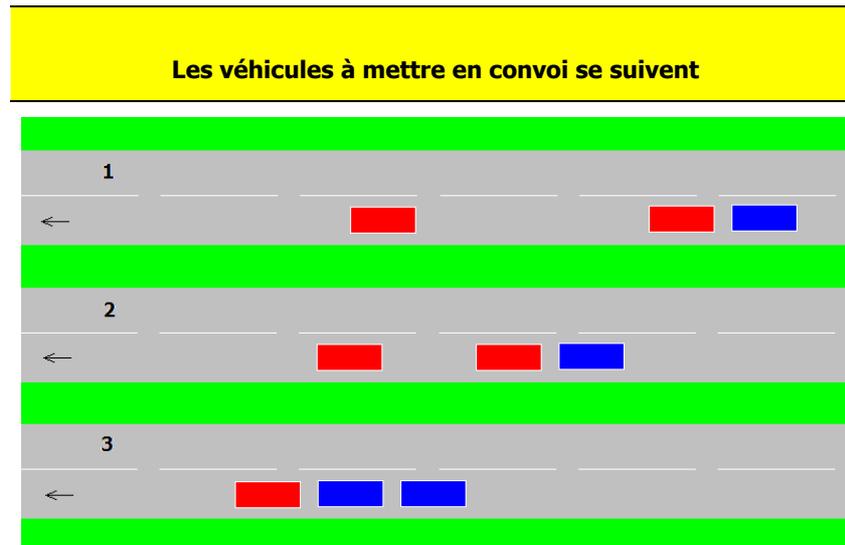
Les sorties : Il s'agit de sorties conventionnelles par lesquelles, les poids lourds sortent de l'autoroute individuellement.

L'attelage : Des véhicules à la même vitesse ne peuvent se rattraper... Aussi, la seule façon de pouvoir former les convois est que soit créé un différentiel de vitesse entre le poids lourd meneur (qu'il dirige déjà un convoi ou non) et le poids lourd (qu'il dirige déjà un convoi ou non) qui doit s'y atteler. Les poids lourds circulant sur l'autoroute le font à la vitesse maximale autorisée. Aussi, le différentiel ne pourra se faire que par le ralentissement du ou des poids lourds auquel (auxquels) le ou les poids lourds considéré(s) doit(ent) s'atteler.

Deux cas peuvent alors se présenter :

Le poids lourd à atteler se trouve directement derrière le poids lourd auquel il doit s'atteler. Dans ce cas, ce dernier (le cas échéant le convoi auquel ce dernier participe) ralentit suffisamment pour que le rattrapage se fasse le plus rapidement possible (sur la base d'un différentiel de vitesse de 10 km/h, il faut 1 heure pour qu'un poids lourd rejoigne son convoi situé à 10 km en amont mais seulement 10 mn si le différentiel est de 60 km/h).

²⁰ Marin, Emmanuel .2002., « Détection d'opportunités de report modal selon deux stratégies de massification de flux de poids lourds en nombre et tonnage », Bureau d'Etudes EMC - Ministère de l'Équipement, du Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 21 pages

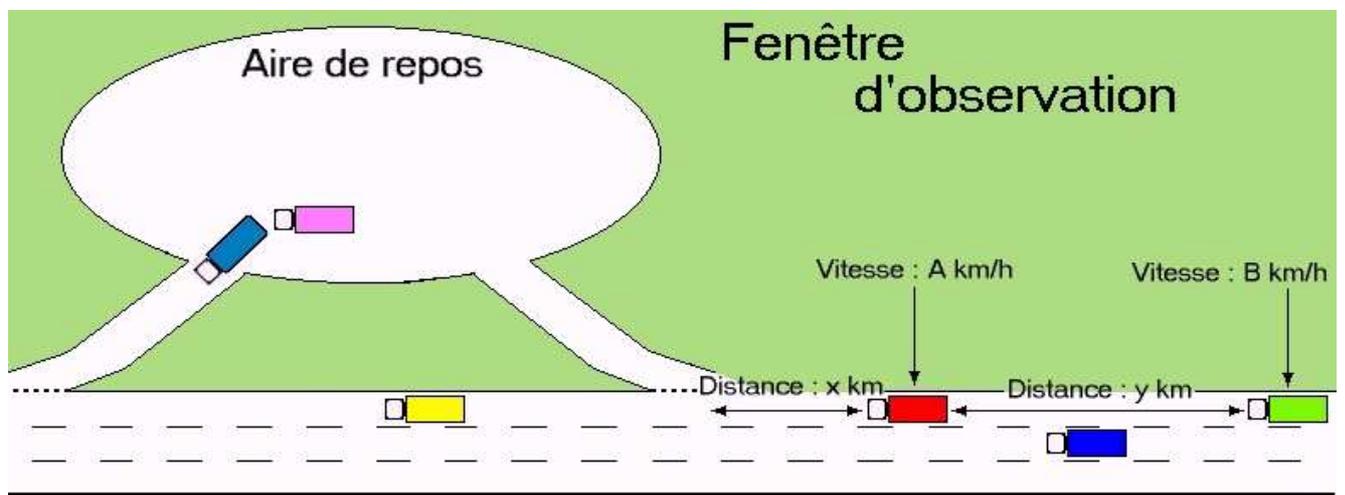


Le(s) véhicules amont ralentissent suffisamment pour permettre à(aux) véhicule(s) aval(s) de le(s) rattraper.

La formation des convois peut alors se faire de deux façons différentes :

Soit toujours de manière dynamique c'est à dire sans jamais effectuer d'arrêt :

On dispose dans ce cas là d'un temps fixé arbitrairement (et raisonnablement) pour établir le convoi. En effet, les bénéfices retirés d'une conduite en automatique doivent se manifester au plus vite. Fixons donc par exemple ce temps à 15 minutes.



La formation du convoi en temps fixé est faisable sous deux conditions :

- Si la **distance** y séparant les camions intéressés par le futur convoi et qui sont les plus éloignés l'un de l'autre, n'est pas trop importante.
- Cela dépendra également des vitesses respectives des camions qui souhaitent se rejoindre.

Lorsque les différents camions du futur convoi sont identifiés, on adapte leur vitesse en faisant ralentir le camion le plus en avance et en faisant accélérer raisonnablement le camion le plus en retrait : le camion de tête sera ralenti à une **vitesse A** km/h et le dernier camion est accéléré à la **vitesse B** km/h.

Dans cette solution, il faut également tenir compte du **temps T** mis par les camions pour opérer le passage en automatique (c'est à dire formation du convoi suivant les temps de conduite déjà effectués par les différents chauffeurs) et retrouver une vitesse de croisière de 110 km/h environ.

On peut donc calculer désormais la distance limite y , pour que le convoi soit faisable :

$$y \leq \frac{(15 - T) \times (B - A)}{60}$$

Si y est inférieure à cette valeur, le convoi sera réalisable en 15 min.

La deuxième solution se déroule de façon un peu plus statique :

En effet, une fois que les camions susceptibles de former un convoi sont repérés et informés, ils peuvent être arrêtés sur l'aire de repos la plus proche (dans le cas des autoroutes équipées bien sûr).

On fixe toujours un temps bien défini pour établir le convoi. Reprenons 15 minutes qui semble être un temps raisonnable. Une fois encore le convoi est réalisable, s'il y a une aire de repos à proximité et que tous les camions concernés ont la possibilité de s'y arrêter sans danger.

Dans cette solution, on fixe un nouveau **temps T'** qui est le temps mis par le dernier camion pour décélérer sur l'aire de repos, s'arrêter, former le convoi selon les temps de conduite, repartir en convoi et prendre une vitesse moyenne de 110 km/h environ. L'opération ainsi décrite semble fastidieuse mais ne devrait pas prendre plus de 5 minutes en réalité.

En partant dans l'hypothèse cette fois ci que tous les camions concernés par le convoi roulent à des vitesses de B km/h proches l'une de l'autre, à quelle distance maximale du dernier camion doit se trouver l'aire de repos pour que le convoi soit réalisable en 15 minutes ?

$$x + y \leq \frac{(15 - T') \times B}{60}$$

Si $x + y$ est inférieur à cette valeur le convoi sera réalisable en 15 minutes

Si les deux conditions trouvées précédemment sont réalisées, il faudra effectuer un choix judicieux afin d'effectuer la jonction du mieux possible c'est à dire le plus rapidement possible pour en retirer un bénéfice optimal.

La constitution d'un convoi ne doit pas générer de dépassement de la vitesse autorisée par le véhicule qui veut s'atteler en convoi.

Le temps de formation du convoi a été fixé arbitrairement à 15 minutes mais il peut être bien être modifié : cette valeur a une incidence, sur la taille de la fenêtre d'observation mais aussi sur les bénéfices engendrés par la mise en automatique.

Comme dans le cas statique, il sera inutile de former des camions pour une vingtaine de km car c'est la distance parcourue par les camions en un quart d'heure à une vitesse de 90 km/h. Les avantages retirés seront insignifiants à ce moment là. La distance minimale à partir de laquelle il est intéressant de rouler en automatique, reste à fixer.

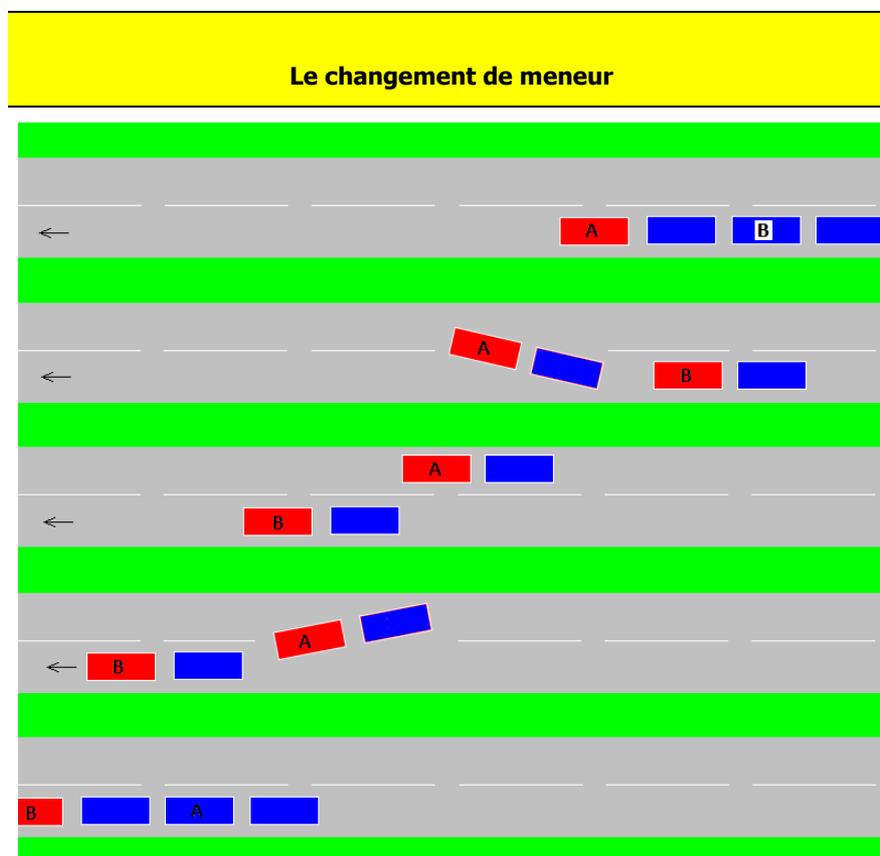
Le désattelage : deux cas peuvent se présenter. Premier cas, un véhicule veut se désatteler d'un véhicule qui le précède. Deuxième cas, un véhicule veut se désatteler d'un véhicule qui le suit.

Dans le premier cas, le chauffeur du véhicule qui désire se désatteler peut engager la procédure de désattelage.

Dans le second cas, il est nécessaire que le chauffeur du véhicule qui suit le véhicule qui désire se désatteler soit en condition de reprendre le contrôle de son véhicule. De ne pas être ainsi, la procédure de désattelage ne peut être engagée.

La procédure de désattelage consiste en une déconnection du système d'attelage électronique suite à une reprise du contrôle de son véhicule par le chauffeur concerné ce qui conduit à un ralentissement de son véhicule (et par conséquent des véhicules qui y sont attelés le cas échéant) jusqu'à ce que soit retrouvée l'interdistance de sécurité de 45m.

Le changement de meneur : il ne peut être réalisé qu'en section courante et jamais au niveau des échangeurs. Le chauffeur du poids lourd qui va prendre la place du meneur se désattelle. L'actuel meneur se déporte sur la voie de droite et ralentit afin de se faire dépasser par le nouveau meneur à la suite duquel il se reporte sur la voie de gauche pour s'y atteler.



Le(s) véhicule(s) amont se déporte(nt) sur la voie de droite pour se faire dépasser puis se reporte(nt) sur la voie de gauche pour s'atteler au nouveau meneur.

Nombre de véhicules constitutifs d'un convoi : L'attelage et le désattelage se faisant sur l'autoroute, les contraintes physiques énoncées dans le scénario « d'attelage statique » ne s'appliquent plus. Il subsiste cependant des contraintes de sécurité (nombre de véhicules impliqués dans un même accident, gravité, ...) et de circulation (non-accès à une sortie d'autoroute pendant le passage d'un convoi de poids lourds, ...).

Les aires de service et de repos : elles n'impliquent pas de contraintes spécifiques.

Le péage : il s'agit d'un système de péage électronique basé sur un tarif au kilomètre permettant de ce fait les sorties et entrées sur le réseau sans pénalité.

Carburant : les poids lourds fonctionnent au gazole et leur consommation se réduit en moyenne de 1% par an.

Le ou les gestionnaires du système : Il leur incombe les principales fonctions suivantes :

- Le système de façonnage des convois
- La gestion de l'information
- La gestion du trafic
- La coordination avec le réseau conventionnel
- la gestion des pannes
- la gestion des incidents / accidents
- la gestion des intempéries
- la gestion des transactions de péage
- la maintenance de l'infrastructure

Les véhicules de service : l'important est leur capacité et réactivité d'intervention en cas d'incident ou d'accident sur l'autoroute.

La gestion des informations : De par l'absence de lieu physique connu pour les rendez-vous, il est nécessaire qu'un système de communication et de gestion des informations soit mis en place afin que les différents participants au système puissent connaître leurs opportunités de participation à des convois.

4.3 Systèmes de communication

4.3.1 *Communication véhicule-véhicule*

La communication dans un convoi de camions se réalisera de la même façon, que dans le cas statique, à savoir par diffusion sur l'ensemble des véhicules ou de proche en proche.

Pour la constitution des convois, et donc l'identification des camions susceptibles d'être associés en convoi ; on peut disposer d'un équipement embarqué. Chaque poids lourd recevant ainsi toutes les informations en provenance des autres poids lourds se trouvant dans sa zone de réception. Un calculateur embarqué optimise alors la participation du poids lourd à un convoi et le met en relation avec celui-ci et donne les impératifs à suivre pour la formation de leur convoi. Un tel système suppose que l'on dispose d'un système de communication capable de communiquer avec un autre système dans un rayon de 2,5 km minimum (distance maximale d'un camion auquel on peut s'atteler).

Bien sûr une fois le convoi formé, il y aura une communication entre les camions du convoi pour assurer la sécurité de tous : prévenir de toute défaillance d'un camion, communiquer des informations de vitesse, de rayon de braquage, de distance afin que les camions se suivent parfaitement.

4.3.2 *Communication véhicule–infrastructure*

Le système peut aussi être associé à un Centre d'Optimisation des Convois. Ceux-ci peuvent être situés au niveau des échangeurs. Toutes les demandes et localisations des poids lourds sont alors

transmises à ce centre²¹ qui a pour objet de consolider toutes les demandes émises dans son rayon d'action ainsi que la localisation dynamique de tous les poids lourds concernés. En fonction de leurs localisations, le centre optimise la formation des convois et diffuse aux chauffeurs concernés les impératifs à suivre pour la formation de leur convoi : l'heure de départ (pour un poids lourd non encore parti), le point de rendez-vous, les vitesses à maintenir, leur position dans le convoi... Une des difficultés est d'assurer le transfert d'information d'un centre d'optimisation des convois à un autre.

Pour limiter la complexité des traitements, la zone observée sera fixée en fonction du temps admis pour constituer un convoi.

L'insertion d'un camion sur l'autoroute s'effectue comme en statique par un système de feux qui autorise l'accès quand la place pour l'insertion est suffisante.

Un système global de communication au niveau de l'infrastructure est nécessaire pour prévenir les usagers de tout problème de circulation, d'un accident, d'embouteillages,

Parmi les avantages de cette solution, on peut citer :

L'avantage principal de cette formation en dynamique est un gain de temps précieux puisque les camions n'ont plus besoin d'attendre parfois en vain l'arrivée de collègues. L'attente n'est plus statique mais dynamique car tant que personne n'est en mesure de se joindre à lui, le camion continue sa route.

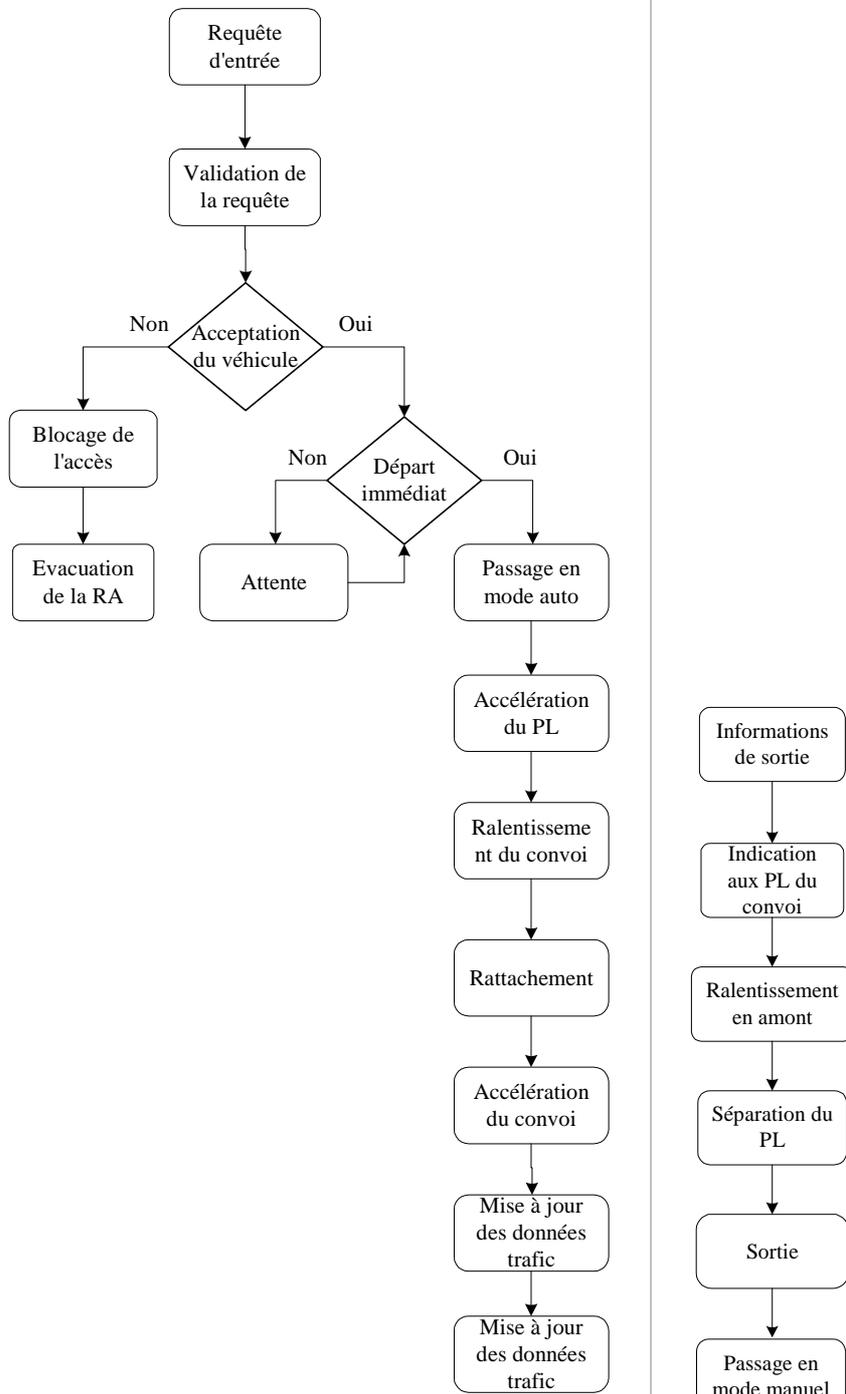
Un autre avantage est le coût engendré. En effet, aucune infrastructure coûteuse ne doit être mise en place si ce n'est des balises de communication mais dont le prix est très inférieur à celui des aires de formation.

En contre partie, cette solution possède l'inconvénient suivant :

L'inconvénient majeur vient cependant de la difficulté de communiquer. En effet, dans cette solution, les camions doivent discuter en permanence entre eux ou avec les centres d'Optimisation de Convois ce qui risque de générer un trafic d'information très important.

²¹ Outre la gestion de la formation des convois, ce centre pourrait optimiser la totalité de l'itinéraire du poids lourd en prenant en compte les conditions de circulation, les conditions météorologiques, les conditions d'offre réelle d'infrastructures et les règles de circulation.

4.4 Architecture sommaire du système



Entrée sur la RA - Convoi avec attelage dynamique

Sortie de la RA - Convoi avec attelage dynamique

5 SCENARIO DE ROUTE AUTOMATISEE

Concept : les poids lourds circulent individuellement et automatiquement sur l'infrastructure. L'automatisation permet de réduire les interdistances de sécurité.

5.1 Le Scénario

5.1.1 Cas du poids lourd quittant son lieu de chargement

Sur son ordinateur de bord, le chauffeur du poids lourd indique sa destination. Un itinéraire lui est alors communiqué. Il quitte ainsi son lieu de chargement et se dirige vers l'entrée d'autoroute correspondante.

En amont de cette dernière, il franchit la borne de contrôle qui réalise le check-up de conformité du véhicule (niveau de carburant, temps de conduite du chauffeur, système de frein, équipement embarqué, etc.), l'enregistrement de sa destination, ...

Il reçoit un message lui indiquant si sa demande d'accès à l'autoroute est autorisée ou non. Dans ce dernier cas, la raison lui est communiquée ainsi que ce qu'il doit faire pour être autorisée à accéder à l'autoroute (prendre du carburant car son niveau actuel ne permet pas de joindre sa destination, mettre à niveau sa pression des pneumatiques, réparer tel organe défectueux, ...)

A l'entrée de l'échangeur, une borne vérifie que le poids lourd est habilité à y accéder. Si tel est le cas, le poids lourd s'engage sur la bretelle d'accès à l'autoroute. Sinon, une barrière ferme l'accès et oblige le poids lourd à ressortir.

Le poids lourd autorisé s'arrête sur la zone de transfert de mode de conduite. Dès qu'un créneau d'insertion est libre, automatiquement, le poids lourd démarre, accélère et s'insère sur l'autoroute. Le chauffeur est libéré de toutes ses obligations de conduites.

5.1.2 Cas des poids lourds en circulation sur l'autoroute

Tout au long de l'infrastructure, des échanges d'informations s'assurent du fonctionnement normal de la conduite automatisée.

En amont de la sortie qu'il doit emprunter, un signal est envoyé au chauffeur pour le réveiller le cas échéant. Une réponse est attendue afin de vérifier que le chauffeur est opérationnel. Le poids lourds sort et s'arrête sur la zone de transfert de mode de conduite. Au signal qui lui est donné, le chauffeur démarre et sort de la zone automatisée pour rejoindre manuellement le réseau conventionnel.

5.2 Description du système

La voirie : elle est constituée, par sens, d'une voie de 3,50 m et d'une BAU servant de voie de service et éventuellement de voie en conduite manuelle dans le cas d'un mode dégradé. Il s'agit d'une voirie conventionnelle pour une circulation de poids lourds. Elle est équipée d'un système de contrôle de l'infrastructure (détection des objets fixes ou mobiles : une caisse tombée d'un véhicule, un poids lourds en panne, un animal, ...), d'un système coopératif infrastructure-véhicule et dans les zones concernées elle est équipée d'un système hors gel, neige ou pluie, d'un système de récupération des gaz d'échappement, ...

Les poids lourds : ils sont équipés d'un système de pilotage automatique, d'un système coopératif infrastructure-véhicule. Selon le poids lourd, l'habitacle est prévu pour donner tout le confort nécessaire pour y séjourner, se reposer, se restaurer sur une longue durée : couchette, toilettes, multimédia, connexion audio-vidéo avec le domicile du chauffeur, ...

Les conducteurs : le conducteur est en pause, il peut y compris dormir.

La législation : Compte tenu des améliorations en terme de sécurité, on supposera une vitesse de 110 km/h, une interdistanse entre poids lourds d'un même convoi de 12 m (soit 0,4 s) (cf. Chapitre « Analyse capacité-sécurité de scénarios de route automatisée poids lourds » par Saïd Mammar).

Pour ce qui est des temps de conduites, ils sont nuls sur la partie du parcours réalisée sur l'autoroute automatisée.

On supposera que la législation évolue et assimile le temps passé dans un véhicule en conduite automatique comme un temps de repos dès lors que l'habitacle du véhicule répond à des normes de confort et de cadre de vie (voir ci-dessus le paragraphe « Les poids lourds »).

L'interdistanse entre échangeurs : Compte tenu de la grande diversité des origines et des destinations²² des poids lourds, une interdistanse entre les échangeurs de 100 à 150 km semblerait raisonnable. Ceux-ci se permettraient une interconnexion avec les grands axes perpendiculaires à la nouvelle infrastructure afin de collecter et de diffuser le trafic correspondant depuis et vers les grands centres de production et de consommation.

Les entrées : Il s'agit d'entrées comportant une zone de conduite manuelle (l'accès à l'échangeur), une zone de transfert du mode de conduite manuelle-automatique et une zone de conduite automatisée (la piste d'accélération et d'insertion sur l'autoroute).

Les sorties : Symétriques aux entrées, elles comportent une zone de conduite automatisée (piste de décélération), une zone de transfert du mode de conduite automatique-manuelle et une zone manuelle (sortie de l'échangeur).

Les aires de service et de repos : elles n'impliquent pas de contraintes spécifiques.

Le péage : il s'agit d'un système de péage électronique basé sur un tarif au kilomètre permettant, de ce fait, les sorties et entrées sur le réseau sans pénalité.

Carburant : les poids lourds fonctionnent au gazole et leur consommation se réduit en moyenne de 1% par an.

Le ou les gestionnaires du système : Il leur incombe les principales fonctions suivantes :

- La gestion de l'information
- La gestion du trafic
- La gestion des insertions et sorties des véhicules

²² Marin, Emmanuel .2002., « Détection d'opportunités de report modal selon deux stratégies de massification de flux de poids lourds en nombre et tonnage », Bureau d'Etudes EMC - Ministère de l'Équipement, du Transports, du Logement, du Tourisme et du la Mer, 21 pages

- La coordination avec le réseau conventionnel
- La gestion des pannes
- La gestion des incidents / accidents
- La gestion des intempéries
- La gestion des transactions de péage
- La maintenance de l'infrastructure

Les véhicules de service : l'important est leur capacité et réactivité d'intervention en cas d'incident ou d'accident sur l'autoroute.

La gestion des informations : Il s'agit du cœur du système puisque de lui dépend la sécurité et le fonctionnement de la route automatisée. Il s'agit de collecter les informations en provenance de l'infrastructure, celles en provenance des véhicules, assurer l'échange intra-véhicules et véhicules-véhicules, de manière à assurer une conduite automatique sûre des véhicules.

5.3 Systèmes de communication

5.3.1 *Communication véhicule-véhicule*

Les véhicules ne sont pas organisés en convois, mais il est nécessaire de mettre en œuvre une communication entre véhicule tout au moins avec le premier véhicule qui précède. La communication permet l'échange d'information sur le fonctionnement des véhicules et améliore le système du système. Elle pourra être étendue à plusieurs véhicules situés en amont.

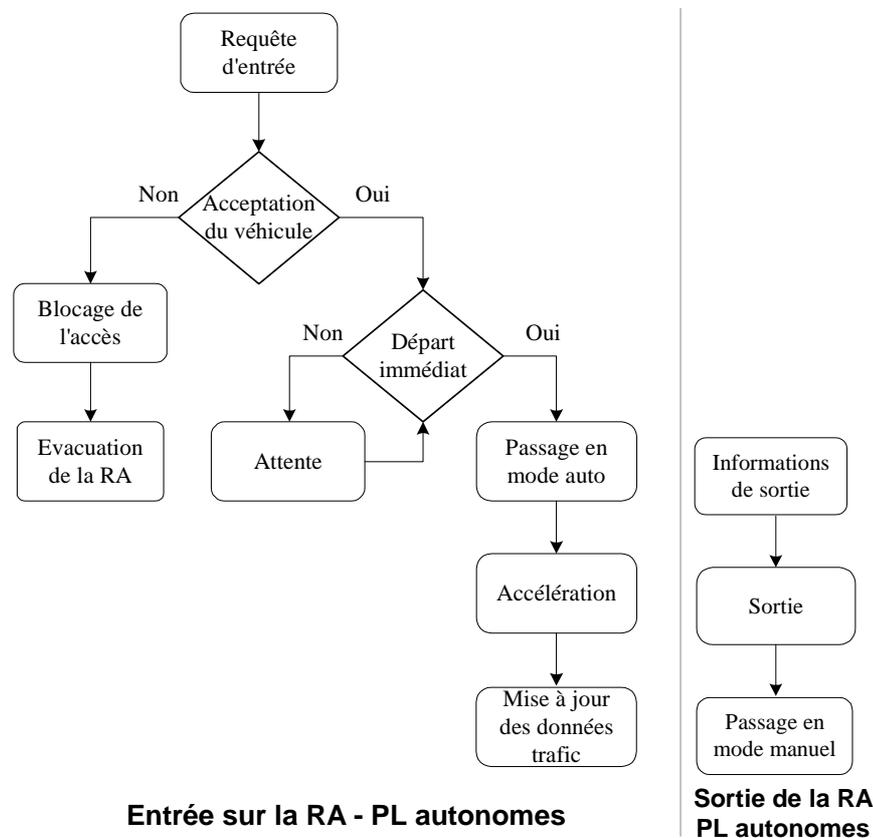
5.3.2 *Communication véhicule-infrastructure*

Elle est très importante car elle devra permettre d'envoyer des consignes à chacun des véhicules pour l'informer de tout problème de circulation, d'un ralentissement, d'un accident, d'un embouteillage, ...

La communication est aussi indispensable pour gérer les entrées et sortie de la voie automatique, dans la mesure où il sera nécessaire de prévenir les véhicules roulant dans une zone proche.

La structure courante est généralement une structure hiérarchisée avec un niveau autoroute, un niveau zone, un niveau secteur.

5.4 Architecture sommaire du système



6 DEPLOIEMENT DANS LE TEMPS DES SCENARIOS

Quel que soit le scénario, il est envisagé une autoroute dédiée sur laquelle ne circuleront que des poids lourds équipés.

En effet, si tel n'était pas le cas, et compte tenu de l'unicité de la voie de circulation, un poids lourd équipé qui serait précédé par un poids lourd non équipé devrait le suivre dans les conditions de circulation du poids lourd non équipé : vitesse, risque de panne, ... Il perdrait ainsi tous les avantages dont il devait bénéficier en empruntant cette autoroute.

Pour se lancer dans l'opération, l'exploitant de la route doit alors être assuré que le jour de son ouverture, le trafic de poids lourds équipés (les seuls empruntant son infrastructure) sera suffisant.

De ce qui précède, il ressort que le concept de route automatisée ou de conduite en convois doit être développé par un consortium, formel ou non, comprenant le ou les futurs gestionnaires de l'infrastructure, des transporteurs représentant une masse critique acceptable et un ou des équipementiers de poids lourds.

Le ou les gestionnaires de l'infrastructure s'engageront à fournir celle-ci et les services l'accompagnant à la date prévue ; les transporteurs s'engageront à équiper leurs poids lourds, à former leurs chauffeurs et à utiliser la nouvelle infrastructure dans les conditions définies ; les équipementiers s'engageront à fournir les équipements nécessaires aux poids lourds.

7 L'AXE PRIS EN COMPTE

Cette infrastructure dédiée peut consister en une nouvelle infrastructure traversant les rases campagnes et qui utiliserait les axes autoroutiers transversaux pour collecter et diffuser son trafic depuis et vers les centres de production et de distribution.

Dans ce cas et compte tenu des enjeux organisationnels, financiers et économiques, il apparaîtrait que la nouvelle infrastructure ne pourrait être mise en service par petits tronçons et ce d'autant plus que ses principaux avantages n'ont de sens que pour des longues distances (voir rapport Thème 3).

Cette infrastructure dédiée peut consister en une nouvelle infrastructure réutilisant partie d'une autoroute existante. Dans ce cas, il n'y a plus de trajet d'approche et son utilisation peut effectivement se justifier dès la mise en service d'un premier tronçon de 100 à 150 km.

Le Comité de pilotage du projet RAPL a envisagé 4 options d'infrastructures :

- Autoroute existante de trafic mixte (Voitures – Poids Lourds)
- Cantonnement des poids lourds sur la voie de droite d'une autoroute existante de trafic mixte (Voitures – Poids Lourds)
- L'adjonction d'une voie dédiée aux poids lourds à une autoroute de trafic mixte existante
- La réalisation d'une nouvelle infrastructure dédiée aux poids lourds

Finalement, il a décidé de baser la suite de son analyse sur la réalisation d'une nouvelle infrastructure (4^{ème} option) parallèle à l'axe Atlantique Nord-Sud que nous présentons ci-après.

7.1 Le tracé

Le tracé de route automatisée présenté ci-après correspond à environ 1.020 km d'une nouvelle infrastructure qui comprend 8 échangeurs.

Le tracé suit les routes suivantes depuis la frontière espagnole jusqu'à la frontière belge :

- **RN134** depuis le tunnel du Somport jusqu'à **Aire sur l'Adour**
- **RN124** jusqu'à la **D934** jusqu'à **Roquefort**



- **D932** jusqu'à la **A62**. On coupe en ligne droite pour rattraper la **D672** au nord de **Saint-Macaire** que l'on suit jusqu'à **Sauveterre de Guyenne** et que l'on poursuit jusqu'à suivre la **D17**.
- Avant **Lussac**, nous suivons la **D21** pour rejoindre la **D674**.
- A l'Est d'**Angoulême**, nous suivons la **D939** puis **D699** jusqu'à l'**Isle d'Espagnac**
- **D941** puis, au sud de Ruelle sur Touvre, la **D23** puis la **D12**, la **D11**, la **RN141** jusqu'à Chasseneuil sur Bonnieure
- **D951**, puis la **D729** au nord de **Saint-Germain de Confolens** jusqu'à la **D11** que l'on suit jusqu'à **Lussac les Châteaux**
- **RN147** pour prendre la **D749** pour retrouver la **D11** puis la **D936** à **Nalliers**
- **D5** et la **D2** jusqu'au nord de **Angles sur l'Anglin** pour emprunter la **D6** jusqu'à **Tournon Saint-Martin**
- **D50** jusqu'à **Martizay** puis **D975** qui se prolonge en **D675**, puis la **D956** puis **D102** jusqu'à **Cour Cheverny**

- **D765** puis **D174** puis **RN152** Jusqu'au sud de **Villebarou**
- **D924** jusqu'au sud de **Chateaudun**
- **RN10** jusqu'à Chartres
- **RN154** puis **RN15** et **RN138** puis **RN2028** qui se poursuit en **D928**
- à l'ouest de **Neufchatel en Bray** la **D157** pour retrouver la **D928** qui redevient ensuite la **RN2028** jusqu'à **Abbeville**
- **RN1** puis de nouveau la **D928** jusqu'à **Hesdin**
- **D94** jusqu'à **Busnes**
- **D916** jusqu'à Saint-Venant
- **D186**, puis la **D23C** puis la **D122** pour rejoindre la **D945**.

7.2 Les échangeurs

Au nombre de 8, ils permettent de s'interconnecter avec le réseau actuel des autoroutes et avec la nationale RD147. Nous donnons les distances de la RAPL aux villes de plus de 50 000 habitants les plus proches :

- RAPL-A64 : Pau (5 km), Toulouse sud (185 km)
- RAPL-A62 : Bordeaux sud (40 km), Montauban (163 km) et Toulouse nord (183 km)
- RAPL-RN147 : Niort (100 km), Poitiers (40 km), Limoges (77 km)
- RAPL-A10 : Tours (50 km), Orléans (50 km)
- RAPL-A11 : Le Mans (100 km), Paris Sud-ouest (85 km)
- RAPL-A13 : Le Havre (90 km), Rouen Sud (25 km), Evreux (35 km), Paris ouest (95 km)
- RAPL-A16 : Calais (100 km), Amiens (40 km), Beauvais (90 km),
- RAPL-A25 : Calais (85 km), Dunkerque (60 km), Lille-Tourcoing-Roubaix (20 km).

Les distances entre échangeurs sont les suivantes :

- Frontière – A64 : 90 km
- A64 – A62 : 150 km
- A62 – RN147 : 250 km
- RN147 – A10 : 160 km
- A10 – A11 : 100 km
- A11 – A13: 110 km
- A13 – A16: 120 km
- A16 – A25: 100 km
- A25 Frontière : 40 km

8 CONCLUSION

La nouvelle infrastructure implique une interaction véhicule-infrastructure qui devient maximale dans le cadre du scénario de route automatisée. Le risque est dès lors d'engendrer un système qui formerait une réponse moins adéquate au besoin en transport du chargeur.

En effet, pour une même option technologique (par exemple, système d'attelage statique), le type d'organisation correspondra à réinventer la rigidité du ferroviaire (par exemple avec des pistes d'attelage/désattelage considérées comme des quais avec des directions fixes et pré-définies) ou à optimiser la flexibilité routière actuelle (destination du convoi fonction des véhicules qui se présentent).

Il sera donc important de confronter dans le cadre d'études postérieures le ou les scénarios du nouveau système à l'arbre fonctionnel dont les racines sont formées par le besoin du chargeur en transport.

9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Marin Emmanuel (2002) « Détection d'opportunités de report modal selon deux stratégies de massification de flux de poids lourds en nombre et tonnage », Bureau d'Etudes EMC - Ministère de l'Équipement, du Transport, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 21 pages
- COFIROUTE (2003) *RAPL, Chiffrage d'un axe atlantique Calais-Bayonne*, Paris, 18 mars 2003, 3 pages
- La Route Automatisée: Un scénario périurbain Mai 2001- LCPC
- The Promote-Chauffeur Consortium (1999) *User, safety, and operational requirements*, Deliverable D03.1.1 – version 2.0, 56 pages.
- The Promote-Chauffeur Consortium (1999) *Report on safety analysis of system components and hazard analysis of tow-bar*, Deliverable D07.1.1 – version 2.0, 57 pages.
- The Promote-Chauffeur Consortium (2001) *First results of user needs analysis as basis for system functional specification*, Deliverable D20 – version 1.0, 98 pages.
- Diaporama de ADASE II – « Advanced driver assistance systems in Europe (AHSEA) – 1st concertation meeting – October 24/25 », 2001 Brussels, (6 diapositives).
- Diaporama de KÖKÖSY, Annemarie (ERASM), YOKER, Jeremy (Université de Californie, Berkeley), « Modélisation d'un attelage virtuel à l'aide des automates cellulaires » (22 diapositives).
- LASMEA (2001) Synthèse du colloque « Les véhicules routiers intelligents » - 15 juin 2001 – Polydome de Clermont Ferrand, 6 pages.
- Tabibi M., Hansen I.A., « Buffer area for dedicated lanes of automated freight traffic », Paper submitted to 9th WCTR, 16 pages.
- DTT- Ministère de l'Équipement, des Transport et du Logement (2000) « Réglementation sociale européenne dans les transports routiers »
- Darbéra R., Marin E. (2002) « Une prospective de l'attelage électronique pour camions »

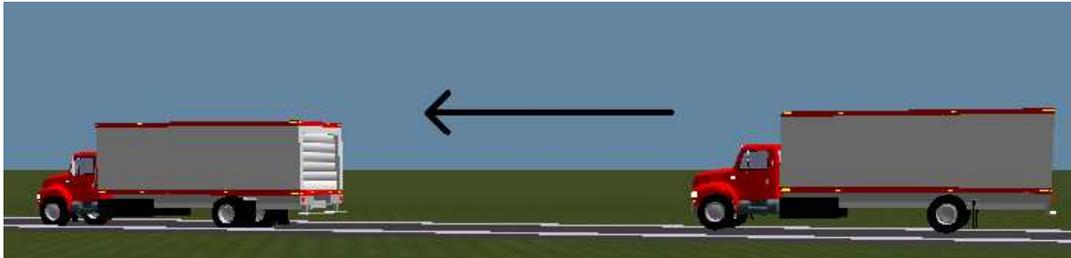


LIVIC



ROUTE AUTOMATISEE POIDS LOURDS

Rapport final



PARTIE 2 : MODELISATION ET EVALUATION DES CIRCULATIONS

Juin 2004

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	6
ANALYSE CAPACITE-SECURITE DE SCENARIOS DE ROUTE AUTOMATISEE POIDS LOURDS.....	9
1 Résumé	9
2 Introduction	11
3 Modélisation et choix des paramètres	11
4 Route actuelle et évolutions	15
5 Poids lourds automatisés en trafic mixte	19
6 Voie dédiée, scénario de référence.....	20
7 Voie dédiée, 3 scénarios d'automatisation des PL	22
8 Conclusion.....	36
9 Bibliographie	38
ETUDE DE FIABILITE : ÉTUDE PRELIMINAIRE DE SECURITE DE CONVOIS DE POIDS LOURDS	39
1 Résumé	39
2 Introduction	39
3 Contexte de l'étude.....	40
4 Méthodologie d'évaluation de la sécurité.....	45
5 Architecture fonctionnelle du système d'un PL en conduite automatique sur route automatisée	47
6 Analyse préliminaire des risques d'un PL sur route automatisée [20].....	50
7 Conclusions	51
ETUDE DE FIABILITE DE LA FONCTION "GESTION D'INTERDISTANCE" DANS LE CADRE DE LA RAPL	53
1 Résumé	53
2 Introduction générale.....	55
3 La sûreté de fonctionnement	56

4	La fonction "estimation d'interdistance"	62
5	Fiabilité de la fonction d'Asservissement de l'interdistance	73
6	Amélioration de la sécurité.....	93
7	Conclusions	93
8	Bibliographie	94
SYSTEME DE PREDICTION DE PANNES DE CAPTEURS DE CAMIONS EN CONVOIS		95
1	Résumé	95
2	Introduction	95
3	Environnement et objectif du système de prédiction.....	96
4	Le système de prédiction	97
5	Simulation	105
6	Conclusion.....	106
7	Bibliographie	107
ETUDE DE PROCEDURES D'INSERTION SUR UNE VOIE AUTOMATISEE POIDS LOURDS.....		109
1	Résumé	109
2	Introduction et hypothèses	113
3	Critères de choix d'une politique d'insertion	114
4	Création d'un espace d'insertion	115
5	Scénario de base : insertion d'un véhicule parmi N.....	115
6	Généralisation : insertion de K parmi N.....	117
7	Quelques exemples numériques	118
8	Procédures de contrôle du véhicule entrant	120
9	Conclusion et perspectives.....	133

FAISABILITE D'UNE ROUTE AUTOMATISEE A UNE VOIE DE CIRCULATION : QUELQUES SIMULATEURS.....	135
1 Résumé	135
2 Introduction	139
3 Scénario 1 : conduite manuelle, référence de base.....	139
4 Scénario 2 : plate forme de concentration	142
5 Scénario 3 : pelotons statiques de type « Chauffeur »	145
6 Scénario 4 : pelotons dynamiques.....	146
7 Scénario 5 : route totalement automatisée.....	152
8 Annexe : Quelques résultats de simulation de trafic avec les simulateurs	156
AUTOMATISATION DES POIDS LOURDS : DEBAT SUR LE CONTEXTE ET LES POSSIBILITES DES USA.....	159
1 Résumé	159
2 Rapport intermédiaire	171
ANNEXES : EXEMPLES DE SYSTEMES PROCHES	207
1 Etat de l'art sur les projets européen sur les poids lourds : rojets CHAUFFEUR2 et SAFETUNNEL	207
2 Note explicative du système européen de gestion et de commande du trafic ferroviaire : ERTMS, European Rail Traffic Management System.....	210

INTRODUCTION

Le présent document constitue la **Partie 2 : « Modélisation et évaluation des circulations »** du rapport final présentant les travaux réalisés dans le cadre du projet **Route Automatisée Poids Lourds**.

Ce projet financé par la DRAST pour une durée de deux ans réunit les unités de recherche et sociétés suivantes :

- Cofiroute,
- Ecole des Ponts et Chaussées (ENPC),
- EMC
- INRETS – LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs) - Coordinateur du projet,
- INRETS – ESTAS (Évaluation des Systèmes de Transports Automatisés et de leur Sécurité),
- INRIA – Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique,
- Université de Lille – LAIL (Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille),
- Université d'Evry – LSC (Laboratoire Systèmes Complexes),
- Renault RVI
- ISIS

Ce rapport synthétise les travaux réalisés par les personnes suivantes :

- Analyse capacité-sécurité de scénarios de route automatisée poids lourds : Saïd MAMMAR (INRETS) & Jean-marc Blosseville (INRETS)
- Etude de fiabilité : Etude préliminaire de sécurité de convois de poids lourds : Etienne LEMAIRE (INRETS/ESTAS)
- Etude de fiabilité de la fonction "gestion de l'interdistance" dans le cadre de la RAPL : Vincent COCQUEMPOT & Mireille BAYART & B. CONRARD (Université de Lille/LAIL)
- Système de prédiction de pannes de capteurs de camions en convois : Saïd HAYAT (INRETS/ESTAS)
- Etude de procédures d'insertion sur une voie automatisée poids lourds : Claude BARRET (Université d'Evry/LSC)
- Faisabilité d'une route automatisée à une voie de circulation : Quelques simulateurs : Claude GOMEZ & Maurice GOURSAT (INRIA Rocquencourt)
- Automatisation des poids lourds : débat sur le contexte et les possibilités des USA : *Bishop Consulting*
- ANNEXES : Exemples de systèmes proches :
 - Etat de l'art sur les projets européen sur les poids lourds : projets CHAUFFEUR2 et SAFETUNNEL : Victor DOLCEMASCOLO (INRETS)
 - ERTMS : Saïd HAYAT (INRETS/ESTAS)

ANALYSE CAPACITE-SECURITE DE SCENARIOS DE ROUTE AUTOMATISEE POIDS LOURDS

1 RESUME

Cette section a pour objectif d'identifier les scénarios route automatisée poids lourds qui présentent un avantage par rapport à la route actuelle en terme de sécurité et de capacité.

Afin de pouvoir étudier les performances à atteindre en terme de débit, vitesse, capacité et sécurité, un modèle des circulations a été construit à partir des données techniques attendues sur les véhicules et leur cinématique comme le temps de réaction, la longueur du véhicule, le freinage maximal, la vitesse de mobilisation de la capacité de freinage, l'accélération maximale, la précision sur le freinage, la vitesse du poids lourd avant le freinage, la précision sur la mesure des vitesses ainsi que la distance d'arrêt entre les véhicules...

Fondée sur ce modèle, l'étude concerne principalement le compromis capacité-sécurité atteignable. Différentes grandes évolutions ou scénarios ont été étudiés :

1. Evolution des longueurs et charge des PL

L'étude de l'impact de l'évolution des poids lourds en terme de longueur et de charge sur la capacité et la consommation montre qu'il est possible d'atteindre des gains respectifs de l'ordre de 2.5% et 6%. Le gain en capacité peut être porté à 36% si les capacités de freinage sont maîtrisées et homogènes.

2. Trafic mixte PL automatisés, PL manuel, VL

Bien que difficile à imaginer dans la pratique, l'automatisation d'une voie de circulation en trafic mixte associant PL automatisés autonomes, PL manuel et véhicules légers en conduite manuelle est virtuellement envisagée. La part de poids lourds (automatisés et manuels) est fixée à 30% du trafic, la capacité atteignable dépend du taux de pénétration p de PL automatisés. La capacité maximale que l'on peut escompter est de 1450 véh/h ($p=100%$). Toutefois, cette valeur de capacité est purement théorique et ne sera vraisemblablement jamais atteinte étant donné les phénomènes transitoires perturbants qui seront engendrés par les procédures d'insertion et de désinsertion de cette voie de trafic mixte.

3. Voie dédiée, PL en conduite manuelle : scénario de référence

Après avoir fixé les contraintes garantissant un niveau de sécurité minimal (absence de collision en cas de freinage brusque), les travaux ont porté sur la capacité et notamment les gains qui pourraient être obtenus grâce aux différentes technologies apportées par la route automatisée.

A partir d'un scénario de référence, le modèle permet ainsi d'identifier l'influence des différents paramètres entrant en jeu (longueur des véhicules, temps de réaction, précision des vitesses, dispersion des capacités de freinage...) dans le calcul des gains en capacité.

On appelle ici scénario de référence un choix particulier de paramètres permettant de reproduire des valeurs de capacité proche de la circulation en conduite manuelle actuelle d'une voie autoroutière qui serait spécialisée poids lourds. Après plusieurs essais, le jeu de paramètres retenu est donné dans le récapitulatif 1. La capacité maximale est de 990PL/heure, elle est obtenue à 90km/h.

Pour chacun des trois scénarios de poids lourds automatisés sur voie dédiée, on détermine dans un premier temps, la capacité atteignable en évitant toute collision suite à un freinage brusque, puis on étudie la sensibilité de la capacité en fonction de plusieurs paramètres. On détermine finalement le nombre de collisions contre un obstacle fixe en considérant différentes étendues de détection de l'obstacle.

4. Voie dédiée, Convois

Dans le cas du scénario « convois en statique », nous avons montré que la capacité de 1800véh/h satisfait la contrainte de sécurité de niveau 2, seul le premier convoi (4 PL) est impliqué dans les collisions. Au-delà de cette capacité, les PL doivent être munis de dispositifs de détection permettant d'éviter les collisions sur obstacle fixe.

5. Voie dédiée, PL automatisés autonomes

Le scénario de PL automatisés autonomes permet des gains en capacité plus élevés dans le cas de la sécurité de niveau 1. Par contre, satisfaire à la sécurité de niveau 2 paraît plus complexe. On montre tout de même qu'on améliore les performances capacité-sécurité par rapport au cas du conducteur expérimenté. Les résultats obtenus sont comparables à ceux du scénario précédent puisque le nombre de collisions est de 4 à la même capacité.

2 INTRODUCTION

L'objet de cette étude est de montrer la faisabilité de l'automatisation de poids lourds(PL) sur une voie de circulation. Cette faisabilité est principalement étudiée sous l'aspect du compromis capacité-sécurité atteignable. Après avoir examiné l'apport de l'évolution des PL, nous nous intéressons à la possibilité de faire circuler des PL automatisés en trafic mixte. Par la suite nous étudions trois scénarios de route automatisée PL sur une voie dédiée. Ces scénarios sont examinés et comparés à une situation de référence proche de la situation de conduite manuelle actuelle. Le premier scénario concerne le cas d'une circulation en convois statiques formés hors de la voie de circulation. Dans le second scénario, les convois se forment et se défont en dynamique au grès des entrées et des sorties. Finalement, le troisième scénario étudie le cas des poids lourds automatisés autonomes.

La section suivant (section 2) expose le modèle choisi pour le freinage et le calcul de capacité. Du calcul de la distance minimale de sécurité permettant d'éviter toute collision suite à un freinage brusque, on déduit la capacité en régime stationnaire.

La section 3 présente l'impact de l'évolution des poids lourds en terme de longueur et de charge sur la capacité et la consommation.

On examine dans la section 4, la possibilité d'automatisation d'une voie de circulation en trafic mixte associant PL automatisés autonomes et véhicules légers en conduite manuelle.

Dans la section 5, on définit une situation de trafic PL en conduite manuelle appelée « situation de référence ». Ceci est réalisé grâce à un choix adéquat d'un jeu de paramètre. Cette situation est purement virtuelle car elle correspond au cas d'une voie de circulation en conduite manuelle spécialisée poids lourds, elle sera utilisée comme situation de comparaison des scénarios de poids lourds automatisés. Dans cette section, on examine aussi l'apport d'une réduction du temps de réaction par l'utilisation de moyens de perception ou de communication.

Trois scénarios d'automatisation sont alors examinés dans les sections 6 à 8. Dans les deux premiers scénarios, les poids lourds sont en convois. Pour le premier scénario, les convois sont formés de manière statique avant d'emprunter l'infrastructure automatisée. Dans le second scénario, un centre d'optimisation de convoi détermine l'affectation d'un poids lourd à un convoi à partir de données transmises telle que l'heure d'arrivée ou la destination. Finalement, dans le troisième scénario les poids lourds automatisés sont autonomes. Pour chacun des trois scénarios, on détermine dans un premier temps, la capacité atteignable en évitant toute collision suite à un freinage brusque (sécurité de niveau 1), puis on étudie la sensibilité de la capacité en fonction de plusieurs paramètres. On détermine finalement le nombre de collisions contre un obstacle fixe en considérant différentes étendues de détection.

3 MODELISATION ET CHOIX DES PARAMETRES

3.1 Modèle du freinage

Nous rappelons ici le modèle retenu pour le freinage du poids lourd suiveur suite à un freinage brusque à la décélération Γ_t du poids lourd de tête. Ce freinage est initié avec un temps de retard t_r . La

décélération maximale Γ_s s'établit alors à jerk constant η . Ce jerk sera pris égal à -5m/s^3 dans toutes les simulations qui vont suivre.

En notant v_t et v_s les vitesses initiales respectives du poids lourd de tête et du suiveur. La distance de sécurité minimale d_s est obtenue de la formule

$$d_s = \min\{x_t(0) / \forall t, 0 \leq t \leq t_s, x_t(t) - x_s(t) > 0\}$$

où t_s est l'instant d'arrêt du véhicule suiveur, $x_t(t)$ et $x_s(t)$ sont les positions respectives des poids lourds au cours du temps pendant la phase de freinage. Les positions sont obtenues à partir des équations ci-dessous

Pour le poids lourd de tête

- si $v_t \leq -\frac{\Gamma_t}{2\eta}$, le PL de tête s'arrête avant le temps d'établissement du freinage maximal,

nous avons :

$$\begin{cases} x_t(t) = x_t(0) + \frac{1}{6}\eta t^3 + v_t t \\ t_{at} = \sqrt{2 \frac{v_t}{-\eta}} \end{cases}$$

- si $v_t > -\frac{\Gamma_t}{2\eta}$, le PL s'arrête après le temps d'établissement du freinage maximal, nous avons :

$$\begin{cases} x_t(t) = x_t(0) + \frac{1}{6}\eta t^3 + v_t t & \text{si } t \leq t_{ei} \\ x_t(t) = x_t(0) + \frac{1}{2}\Gamma_t(t - t_{ei})^2 + \left(\frac{1}{2}\eta t_{ei}^2 + v_t\right)(t - t_{ei}) \\ \quad + \frac{1}{6}\eta t_{ei}^3 + v_t t_{ei} & \text{si } t > t_{ei} \\ t_t = \frac{1}{2}t_{ei} - \frac{v_t}{\Gamma_t} \end{cases}$$

Pour le poids lourd suiveur

- si $v_s \leq -\frac{\Gamma_s}{2\eta}$ le PL suiveur s'arrête aussi avant le temps d'établissement du freinage maximal, nous avons :

$$\begin{cases} x_s(t) = v_s t + \frac{1}{6} \eta (t - t_r)^3 \\ t_s = t_r + \sqrt{2 \frac{v_s}{-\eta_s}} \end{cases}$$

- si $v_s > -\frac{\Gamma_s^2}{2\eta}$ le véhicule le poids lourdsuiveur s'arrête aussi avant le temps d'établissement du freinage maximal. En posant $u = t_{es} + t_r$:

$$\begin{cases} x_s(t) = v_s t + \frac{1}{6} \eta (t - t_{rs})^3 & \text{si } t_r \leq t \leq u \\ x_s(t) = v_s u + \frac{1}{2} \Gamma_s (t - u)^2 + \left(\frac{1}{2} \eta t_{es}^2 + v_s \right) (t - u) + \frac{1}{6} \eta t_{es}^3 & \text{si } t > u \\ t_s = t_r + \frac{1}{2} t_{es} - \frac{v_s}{\Gamma_s} \end{cases}$$

Sécurité de niveau 1 La distance de sécurité définie précédemment correspond à la distance inter-véhiculaire minimale qui permet d'éviter toute collision suite à d'un arrêt par freinage brusque. Cette distance de sécurité dépend bien sûr de plusieurs paramètres et des technologies déployées. Ce niveau de sécurité est appelé "sécurité minimale". Un indice de sécurité illustrant ce niveau est donné par le nombre de collisions contre un obstacle fixe.

Sécurité de niveau 2 La distance de sécurité de niveau 1 n'exclut pas les collisions dues à la présence d'un obstacle fixe ou faiblement mobile sur l'infrastructure. On dira que la sécurité est de niveau 2 si toute collision est évitée. Le respect de ce niveau de sécurité contraint fortement la capacité,

3.2 Capacité en régime stationnaire

Afin de simplifier le calcul de la capacité C_b atteignable par le barreau dans le cas d'un indice de sécurité minimale, quelques hypothèses sont nécessaires:

les véhicules sont supposés rouler à la même vitesse v . L'erreur Δv sur la vitesse est pénalisante du fait d'une sous-estimation de la vitesse du véhicule qui précède et d'une surestimation de la vitesse du véhicule courant,

les longueurs des véhicules sont supposées équiréparties entre une longueur minimale l_m et une longueur maximale l_M .

Étant données les hypothèses, en régime stationnaire, la capacité se calcule à partir de la formule suivante:

$$C_b = 3600 \frac{v}{\bar{l} + \bar{d}_s} \quad (1)$$

où \bar{l} et \bar{d}_s sont respectivement les longueurs et les distances de sécurité moyennes.

Exemple : Appliquons la formule pour une vitesse $v=25\text{m/s}$ et une longueur moyenne $\bar{l} = 7.45\text{m}$. Supposons de plus que la distance de sécurité retenue par le conducteur soit égale à une distance minimale, à l'arrêt, à laquelle on ajoute une distance proportionnelle à la vitesse. $d_s = 0.5 + \lambda_v v$. Le paramètre λ_v est équivalent à un temps, nous avons alors :

$$C_b = 3600 \frac{25}{7.45 + (0.5 + 25\lambda_v)} \quad (2)$$

$\lambda_v(\text{sec})$	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
$C_b(\text{véh/h})$	392 2	322 0	273 1	237 1	209 5	187 7	170 0	155 3
<i>Distance de sécurité</i> (m)	15. 5	20. 5	25. 5	30. 5	35. 5	40. 5	45. 5	50. 5

Table 1 : Variation de la capacité à 90Km/h (25m/s) en fonction du temps inter-véhiculaire

Dans cette formule, la variable prépondérante est la moyenne des distances sécurité $E[d_s]$. Rappelons qu'elle dépend des différentes variables précédemment énoncées.

Dans la pratique, le calcul de la capacité se fait comme suit : On choisit d'abord une distribution de véhicules et on calcule les distances de sécurité minimales entre chaque couple de véhicules. On utilise finalement l'équation 1 pour obtenir la capacité.

4 ROUTE ACTUELLE ET EVOLUTIONS

4.1 Influence de l'évolution des longueurs sur la capacité

On considère dans un premier temps une voie de circulation de la route actuelle, sur laquelle, on examine l'évolution de la capacité suite à une modification des types de poids lourds qui seront mis en circulation dans le futur. En effet, des recherches sont actuellement entreprises pour faire évoluer les trois principaux types de poids lourds actuels. Les objectifs sont multiples, ils sont à la fois économiques mais aussi environnementaux comme la réduction de la consommation et de l'agressivité sur la chaussée. Nous rappelons ici les trois principaux types de PL actuels :

- le type 1 à deux essieux isolés, dont la charge utile est de 10 t, le type 4 à quatre essieux répartis de la manière suivante ; le tracteur a deux essieux isolés et la remorque 1 tandem. Sa charge utile est de 25 t,
- le type 5 à 5 essieux, dont deux essieux isolés pour le tracteur et un tridem pour la remorque. Sa charge utile est de 27 t. Ce type représente à lui seul plus de la moitié de poids lourds actuels.

La proportion de chaque type, les tonnages et les longueurs linéiques dans la population des Poids lourds actuellement en circulation apparaissent dans le tableau suivant. Les pourcentages ont été calculés à partir des observations de passage de 5000PL au-dessus d'une boucle SIREDO.

Type 1	Type 4	Type 5
30%	17%	53%
$M_1=10t$	$M_2=25t$	$M_3=27t$
$L_1=9.26$ m	$l_2=16.50$ m	$l_3=16.50$ m

Table 2. Répartition et caractéristiques des PL actuels

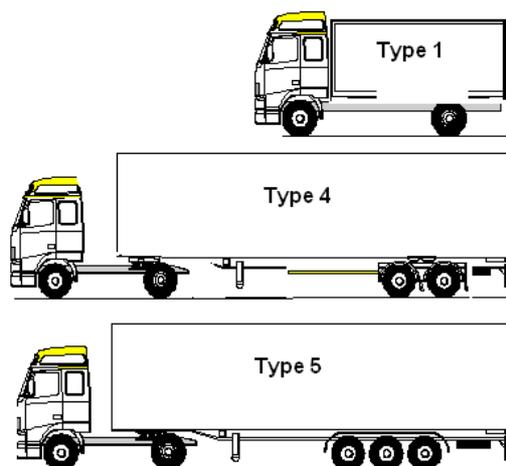


Figure 1. Les poids lourds actuels

Les poids lourds devraient subir plusieurs évolutions à la fois en terme de tonnage, de charge à l'essieu et de longueur. Plusieurs objectifs sont visés par ces évolutions actuellement à l'étude. Les plus importantes parmi celles-ci sont : la réduction, à charge équivalente, de la consommation et des émissions polluantes, la réduction du nombre de poids lourds et de l'agressivité sur l'infrastructure. Des réflexions du groupe de travail sur les poids lourds du futur, ont inféré les évolutions suivantes :

- Le type 1 subsistera, car il concerne les transports de proximité,
- le type 5F aura six essieux : le tracteur présentera un essieu isolé et un tandem, la remorque, un tridem. Sa charge utile sera de 34 t,
- le type 9 aura cinq essieux : le tracteur aura toujours un essieu isolé et un tandem, mais la remorque aura deux essieux isolés. Sa charge utile identique à celle du type 5. le type A aura huit essieux : le tracteur est identique à celui du type 9, la remorque disposera d'un tandem et d'un tridem. Sa charge utile sera portée à 46 t.

Les répartitions qui apparaissent sur la table 2 ont été calculées de la manière suivante : On calcule la charge utile transportée par 5000PL actuels. On garde alors la charge transportée par le type 1 inchangée, la charge utile des PL actuels de type 5 est entièrement affectée au type 5F, la charge utile du type 4 est finalement répartie de manière égale entre le type 9 et le type A.

Type 1	Type 5F	Type 9	Type A
37%	50%	7%	5%
$M_1=10t$	$M_2=34t$	$M_3=34t$	$M_4=46t$
$L_1=9.26$ m	$l_2=22,50$ m	$l_3=24,75$ m	$l_4=37,50$ m

Table 3. Caractéristiques des PL du futur

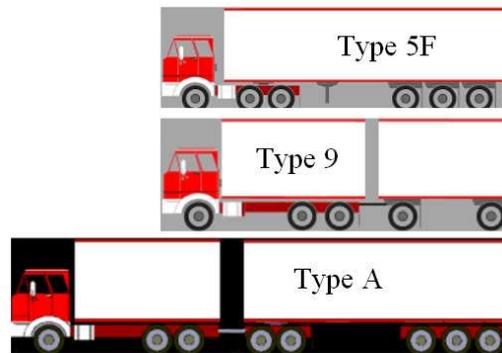


Figure 2. Les poids lourds du futur

Afin d'étudier l'effet de l'évolution des types de PL, on procède en déroulant les étapes suivantes :

On considère d'abord une voie de circulation de 100% de véhicules légers en conduite manuelle. Les caractéristiques du flot sont les suivantes :

- incertitude sur la perception de la vitesse $\Delta v=10\%$,
- Temps de réaction $\tau = 1s$
- Longueur moyenne des véhicules $\bar{l}_{VL} = 4.5m$
- Capacité de freinage minimale $\gamma_{min}=4m/s^2$
- Capacité de freinage maximale $\gamma_{max}=8 m/s^2$
- Vitesse du flot $v=25m/s$
- Inter-distance à l'arrêt $d_{stop}=0.5m$

La capacité correspondant à une sécurité minimale calculée avec les données ci-dessus est de 1386véh/h. Ceci correspond à un temps inter-véhiculaire $T_h = 2.8s$ et une distance de sécurité $d_s=65m$.

On suppose maintenant une concentration de 30% de PL « actuels » dans le trafic, avec la répartition de types décrits ci-dessus. La longueur moyenne de ces PL est de :

$$\bar{l}_{PLM} = 0.3 \times 9.26 + 0.17 \times 16.50 + 0.53 \times 16.50 = 14,33m$$

La longueur moyenne des véhicules du flot (30% de PL et 70% de VL) vaut

$$\bar{l}_{VLPLM} = 0.3 \times 14.33 + 0.7 \times 4.5 = 7,45m$$

La gamme de capacité de freinage de ces poids lourds est moins bonne et est comprise entre $2m/s^2$ et $5m/s^2$.

VL-VL	VL-PLM	PLM-VL	PLM-PLM
65m	51m	137m	126m

Table 4 : Distances de sécurité pour la route actuelle selon les différentes configurations de suivi.

La valeur de capacité à 90km/h pour un flot mixte VL, PL « actuels » est de 990véh/h. On a donc un effet PL sur un calcul brut de capacité dans le sens d'une réduction de 40 %.

Considérons maintenant les types de poids lourd du futur. Pour un tonnage transporté équivalent, moins de poids lourds du futur sont nécessaire. Ceci engendre une chute de la proportion de PL dans le trafic de 30% à 25%. La longueur moyenne de ces PL est de 18,28m. La longueur moyenne des véhicules du flot (25% de PL et 75% de VL) vaut maintenant 7,95m. La distance d'arrêt des PL du futur est supposée identique à celle des PL actuels puisque dans ce cas, seules les longueurs évoluent. Les temps inter-véhiculaires et la capacité s'en déduisent simplement. On obtient **C = 1015véh/h**. On a donc un gain faible en capacité sur la situation actuelle de 2.5%.

Admettons maintenant que l'évolution des PL permettra d'assurer un freinage d'urgence homogène à 5m/s^2 . La distance de sécurité s'en trouvera alors réduite à 38.2m. On en déduit alors un débit de capacité de 1348veh/h. **Le gain en capacité par rapport à la situation actuelle de trafic avec 30% de PL est de 36%.**

4.2 Influence de l'évolution des longueurs sur la consommation

Cette étude se fera sur la base d'une charge transportée constante, choisie égale à 1 million de tonnes. Pour évaluer l'impact du tonnage sur la consommation, on utilise la formule empirique qui lie consommation et tonnage du PL ($C = 0.85\text{masse}+11$). Cette formule est adoptée par les loueurs depuis plusieurs années, elle donne une consommation de 43L/100 pour un poids lourd de 38t.

Etant donné les tonnages et les pourcentages des 3 types de poids actuels, il faudrait, 13915 PL de type 1, 7850 PL de type 4 et 24585 PL de type 5. Pour transporter cette charge utile sur 100km, la consommation totale est donc de 1360m^3 de carburant.

Cette même charge transportée par le poids lourd du futur ne nécessite plus que 39401 PL répartis en 14578 PL de type 1, 19700 PL de type 5, 2758 PL de type 9 et 1970 PL de type A. La consommation totale dans ce cas vaut 1280m^3 de carburant. Ce qui équivaut à un gain en consommation de 6%.

5 POIDS LOURDS AUTOMATISES EN TRAFIC MIXTE

Imaginons une voie de circulation partagée par des véhicules légers en conduite manuelle et des PL automatisés. En faisant fi de la difficulté de la mise en œuvre des échanges entre les autres voies manuelles de la section, examinons simplement les gains en capacité et en sécurité que l'on peut espérer par la mise en place de cette voie de circulation. Nous adoptons pour cela les hypothèses suivantes :

- *les caractéristiques des VL et PL en mode manuel restent inchangées*
- *le temps de réaction des PL automatisés est ramené 0.2sec grâce aux dispositifs de perception*
- *la capacité de freinage des PL automatisés est fixée à $-5m/s^2$*
- *le Jerk maximal reste inchangé*
- *La précision sur la vitesse reste inchangée.*
- *La vitesse est fixée à 90km/h*

Nous avons vu précédemment qu'un véhicule léger en mode manuel laisse un temps inter-véhiculaire de 2.8sec. Le tableau ci-dessous donne les temps inter-véhiculaires selon les différentes configurations de suivi. Notons qu'un VL ou un PL manuel ne sait pas déterminer si le véhicule suivi est automatisé ou pas.

VL-PLM VL-PLA	PLM-VL	PLM-PLA PLM-PLM	PLA-PLA PLA-PLM	PLA- VL
51m	137m	126m	18m	31m

Table 5 : Distances de sécurité selon les différentes configurations de suivi.

La part de poids lourds étant toujours fixée à 30% du trafic, la figure 3 donne la capacité d'une voie de circulation en fonction du taux de pénétration p . On peut en déduire que la capacité maximale que l'on peut escompter est de **1450 véh/h**. Toute fois, cette valeur est purement théorique et ne sera vraisemblablement jamais atteinte étant donné les phénomènes transitoires perturbant qui seront engendrés par les procédures d'insertion et de désinsertion de cette voie de trafic mixte.

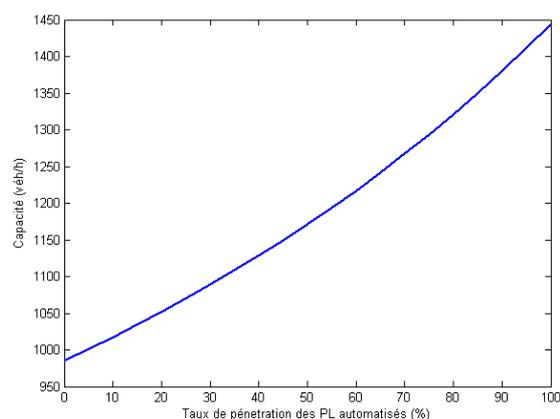


Figure 3. Capacité d'une voie en trafic mixte en fonction du taux de pénétration.

Notons par ailleurs que même s'il a été démontré que des systèmes d'automatisation en trafic mixte améliorent le débit, ils n'améliorent par contre pas le temps de parcours dans les conditions de trafic proches de la saturation. Les ondes de choc se déplacent plus rapidement et l'étendue de la congestion reste-t-elle aussi inchangée, seule la durée de celle-ci est réduite.

Pour un trafic mixte, l'indice de sécurité est difficile à calculer. Si l'on décompose le flot en 2 flots homogènes (PL et VL), à débit maximal, on obtient 4 collisions pour une première collision sur obstacle fixe entre PL automatisés et 3 collisions de VL sur un PL arrêté fixe.

Nous nous intéressons dans les sections suivantes à des scénarios d'automatisation des PL sur voie dédiée.

6 VOIE DEDIEE, SCENARIO DE REFERENCE

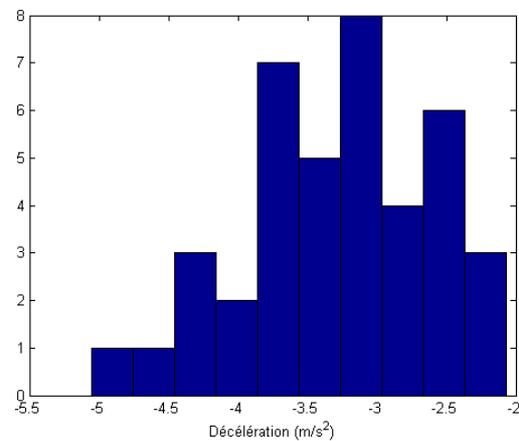
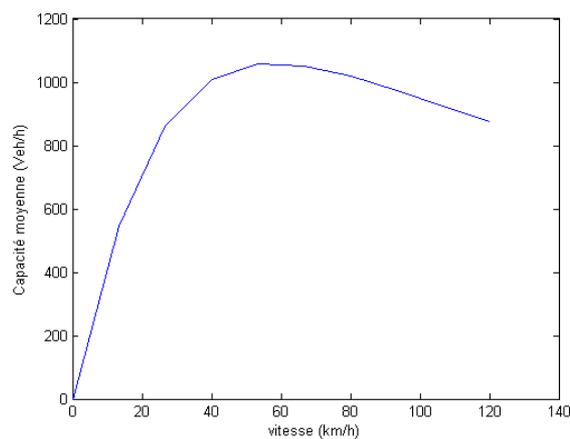
6.1 Capacité nominale à 90km/h

Ce scénario est purement fictif, il correspond au cas où on spécialiserait une voie de circulation pour les poids lourds. Afin de lever l'effet de l'évolution vers de nouvelles dimensions de PL, nous avons volontairement choisi comme longueur moyenne des PL 20m, ce qui correspond approximativement à la longueur moyenne des PL du futur à laquelle nous ajoutons la distance à l'arrêt.

On appelle ici scénario de référence un choix particulier de paramètres permettant de reproduire des valeurs de capacité proche de la circulation en conduite manuelle actuelle d'une voie autoroutière qui serait spécialisée poids lourds. Après plusieurs essais, le jeu de paramètres retenu est donné dans le récapitulatif 1. La distribution de capacité de freinage du véhicule suiveur apparaît sur la figure 4. Le tracé de la capacité en fonction de la vitesse est donné sur la figure 5. La capacité à 90km/h est de 990PL/heure.

Récapitulatif 1 *Circulation de référence*

- temps de réaction : 1sec
- Longueur moyenne (y compris la distance à l'arrêt) $L_{\text{moy}}=20\text{m}$
- Capacité de freinage du véhicule aval : le plu défavorable
- Jerk maximal -5m/s^3
- Distribution normale de capacité de freinage de moyenne -2m.s^{-2} et valeur maximale à -5m.s^{-2}
- précision sur la vitesse $\Delta v=10\%$
- Capacité maximale de 990véh.h^{-1} à 90Km.h^{-1}

*Figure 4 : Distribution des décélérations**Figure 5 : Capacité de la situation de référence*

6.2 Effets de la réduction du temps de réaction

A partir des équations précédentes, on remarque que le temps de réaction intervient en facteur de la vitesse initiale dans l'expression de la distance de sécurité. A vitesse fixée, la capacité est donc inversement proportionnelle au temps de réaction. Actuellement, le temps de réaction d'un conducteur varie entre 0.8sec pour un conducteur très vigilant et 1.5sec pour un conducteur peu vigilant. Dans le cas du scénario de référence, nous l'avons fixée à 1s. Concernant les poids lourds automatisés, leur temps de réaction dépendra principalement des capacités de perception et de communication et des délais d'actionneurs.

Dans un premier temps, les poids lourds sont toujours en conduite manuelle, mais examinons deux cas particuliers : Pour le premier, on considère que les poids lourds sont munis de capacité de perception, de communication et d'assistance au conducteur qui permettent d'abaisser le temps de réaction à 0.4s. Pour le deuxième, l'adjonction d'un frein électrique automatiquement déclenché lors de la détection d'un signal d'urgence. Dans ce cas, le temps de réaction n'est plus que de 0.2s. **Les capacités obtenues sont respectivement de 1170PL/h et 1250PL/h à la même vitesse de 90km/h.** Ceci équivaut à des gains en capacité de l'ordre de 18% dans le premier cas et de 26% dans le deuxième (par rapport à la situation de référence).

7 VOIE DEDIEE, 3 SCENARIOS D'AUTOMATISATION DES PL

Ayant défini la situation de référence sur une voie dédiée, nous évaluons maintenant 3 scénarios d'automatisation des poids lourds.

La vitesse du flot automatisé est fixée à 110km/h. Toute chose égales par ailleurs, la capacité obtenue à cette vitesse pour un temps de réaction de 0.2s n'est plus que de 1170PL/h au lieu des 1250PL/h à 90km/h. Le gain en capacité est réduit à 18%, il équivaut le gain à 90km/h pour un temps de réaction de 0.4s. On peut donc conclure que la seule réduction du temps de réaction ne permet pas de gain significatif en capacité.

Cette évaluation se fera selon le compromis capacité-sécurité, en évaluant à chaque fois l'apport de technologies permettant par exemple de réduire le temps de réaction par l'usage de communication, d'améliorer la précision sur le freinage. Les deux niveaux de sécurité 1 et 2 sont traités.

- **Scénario convoi statique** Les PL sont organisés en convoi avant de rejoindre l'infrastructure automatisée. Le principe de la circulation en convoi consiste à choisir des inter-distances courtes entre PL d'un même convoi et d'espacer le plus possible les convois successifs. Comme nous allons le voir ceci introduit des contraintes fortes sur temps de réaction, sur la précision des variables de freinage mais aussi une coordination entre PL du convoi. Aucune réorganisation des convois n'est envisagée en dynamique. Il sera seulement admis qu'un convoi puisse se scinder ou rejoindre un autre convoi. L'effet de ces réorganisations sur la capacité ne sera pas examiné.
- **Scénario convoi dynamique** Ce scénario a pour objet de gagner en flexibilité par rapport au cas statique. Une plus grande coordination du trafic à plusieurs échelles est nécessaire.
- **Scénario PL automatisés autonomes** Dans ce cas, les PL évoluent de manière autonomes sur l'infrastructure. Les équipements embarqués de perception et de commande permettent d'assurer la sécurité de niveau 1 par gestion des inter-distances. Un signal d'alerte peut quand même être

relayé dans le cas de la détection d'un obstacle fixe. Ceci permet d'assurer une réaction quasi-simultanée dans cette situation critique

7.1 Scénario convoi statique :

Les véhicules sont en convoi formés de manière statique. La distance minimale entre convois est fixée à $L_{ic}=45m$. Le temps de réaction du premier véhicule est fixé à 1sec.

Les véhicules automatisés ont un temps de réaction entre 0.2 et 0.4sec en fonction de possibilité d'usage ou non des freins électriques immédiatement sur activation du signal d'alerte. L'inter-distance entre véhicules d'un même convoi est fixée à $L_{iv}=15m$.

Par ailleurs, les autres données préliminaires de ce scénario sont les suivantes :

Longueur moyenne des PL y compris la distance à l'arrêt $L_{moy}=20m$

Jerk maximal $-5m/s^3$

Le seuil maximal pour la précision sur la vitesse est fixé à $\Delta v=5\%$

Examinant avant toute chose, la capacité atteignable en fonction du nombre N de véhicules par convoi. En utilisant la formule

$$C_1 = \frac{3600vN}{NL_{moy} + (N-1)L_{iv} + L_{ic}}$$

on obtient le tracé de la figure 6. On remarque une croissance de la capacité combinée avec un effet d'écrêtage vers la valeur limite $C_1 = \frac{3600v}{L_{moy} + L_{iv}}$ qui donne 3150véh/h.

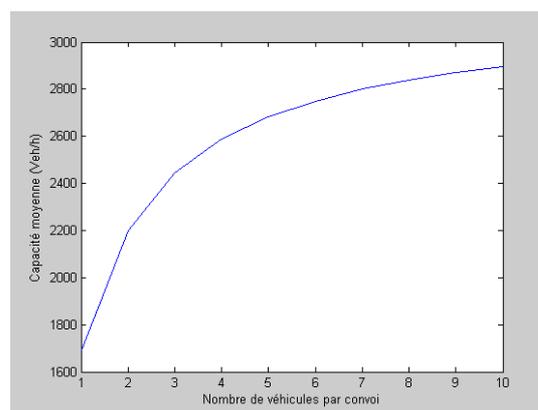


Figure 6. Capacité en fonction du nombre de véhicules par convoi.

Sachant que l'on souhaite multiplier la capacité actuelle par un coefficient de 2 ou 3, on peut fixer le nombre de véhicules par convoi à 4. Ceci donne une capacité de 2600veh/h.

La mise en convoi des PL permet un gain additionnel en consommation obtenu grâce à la réduction de la turbulence de l'écoulement d'air. Pour un convoi donné, ce gain est de l'ordre de 7% pour le PL de tête et 17% pour les 3 PL qui suivent. Le gain global est donc de 14.25%. Rappelons que ce gain en consommation vient s'ajouter au gain déjà obtenu du fait de l'évolution des PL en terme de dimensions et de tonnages.

Ayant choisi de fixer délibérément à 15m l'espacement entre les PL d'un même convoi. Il est nécessaire d'examiner quelles contraintes cela impose entre les capacités de freinage du premier véhicule et des suivants. La figure 7 donne la capacité de freinage minimale du PL suiveur permettant un arrêt sans collision en fonction de celle du PL de tête. Les deux courbes correspondent aux deux temps de réaction considérés. A titre d'exemple pour une capacité de freinage de -9m/s^2 du PL de tête, pour éviter la collision, le PL qui suit à 15m doit disposer d'une plus forte capacité de freinage à -10.6m/s^2 pour un temps de réaction de 0.4s mais seulement de -8.4m/s^2 lorsque le temps de réaction est réduit à 0.2s. On remarque de l'écart peut atteindre les 20% pour certaines valeurs de la décélération du PL de tête, mais se réduit au fur et à mesure que la décélération est moins forte. Cette figure montre aussi qu'un freinage de l'ensemble des PL à une décélération homogène de -5m/s^2 n'est pas réalisable à ce stade la décélération du PL suiveur doit être plus forte.

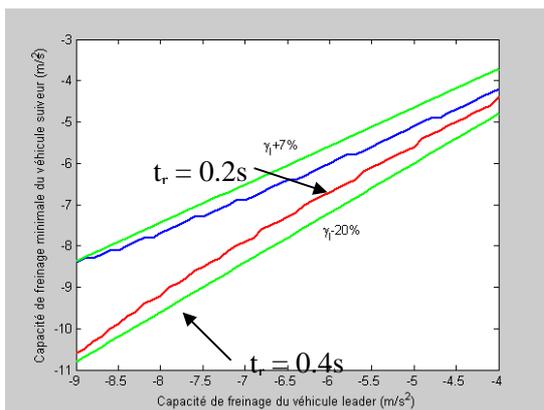


Figure 7. Capacité de freinage minimale du suiveur ($\Delta v=5\%$)

Le seul moyen permettant de satisfaire une condition de freinage homogène à -5m/s^2 est d'améliorer la précision sur la connaissance des vitesses à 1% (figure 8). On remarque en effet que pour un temps de réaction de 0.4s, les deux capacités de freinage du véhicule de tête et du suiveur peuvent être égales à -5m/s^2 , alors que pour un temps de réaction de 0.2s, la capacité de freinage du suiveur peut être plus faible.

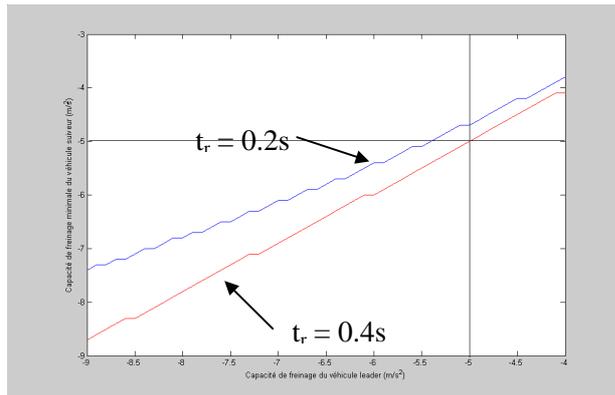


Figure 8. Capacité de freinage minimale du suiveur ($\Delta v = 1\%$)

Ceci permet de résumer les caractéristiques essentielles de ce premier scénario basé sur la formation de convois en statique.

Récapitulatif 2 Scénario de convoi statique (sécurité de niveau 1)

- temps de réaction 0.2sec ou 0.4sec
- Longueur moyenne $L_{moy}=20m$
- Jerk maximal $-5m/s^3$
- Une précision sur la vitesse améliorée $\Delta v=1\%$
- Capacité de freinage des véhicules $-5m/s^2$
- Capacité maximale de $2600véh.h^{-1}$ à $110Km.h^{-1}$

Ayant fixé les caractéristiques permettant d'assurer la sécurité de niveau 1, on examine maintenant le couple capacité-sécurité, c'est à dire le nombre de collisions suite à un crash sur un obstacle ou un PL arrêté. Nous distinguerons deux cas d'étude selon que le premier PL qui entre en collision dispose ou pas de moyen de détection de l'obstacle.

7.1.1 Premier cas : distance de détection nulle

Le PL de tête du convoi heurte un véhicule arrêté. Les autres véhicules du convoi freinent à la capacité de freinage maximale 0.2sec ou 0.4sec plus tard. On suppose que les temps de réaction ne se cumulent pas.

Hors temps de réaction, la distance d'arrêt d'un véhicule dans notre cas est de 108.5m. Selon le temps de réaction, il faut ajouter à celle-ci 6.1m ou 12.2m. La longueur totale est donc de 114.6m ou 120.7m.

A capacité, les trois camions du premier convoi heurtent donc l'obstacle. Le leader du convoi suivant, situé à 45m, détecte et réagit à la situation de freinage au bout d'un temps de retard de 1.2sec ou de 1.4sec. Sa distance d'arrêt, temps de réaction inclus, est donc de 144.7m ou 150.8m. Le leader de ce second peloton ne dispose au maximum que de 90m ($45m + 3 \times 15m$), il entrera donc en collision avec

le dernier PL du premier convoi. Il en est en fait de même de tous les autres camions de ce deuxième peloton, étant donné que le dernier véhicule de ce peloton ne disposeront au maximum que de 135m (90m + 3x15m) pour s'arrêter, ce qui n'est pas suffisant.

La figure 9 donne un aperçu des PL en collision. Les véhicules sont représentés par un rectangle plein. Le nombre total est de 14 véhicules.

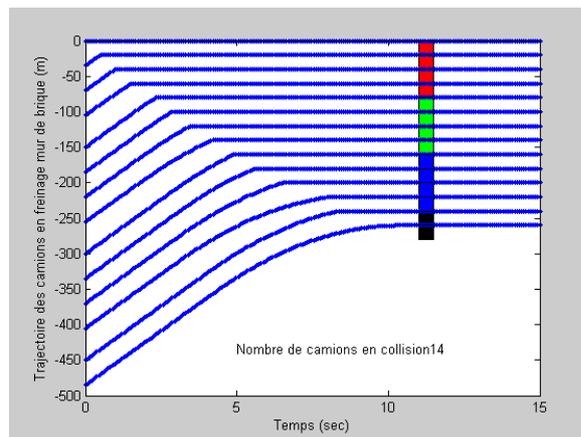


Figure 9. Collisions sur obstacle fixe sans détection

La figure 10 donne le profil de vitesses de l'ensemble des véhicules concernés par les collisions en chaîne. L'instant de chute brutale de la vitesse à zéro est l'instant de collision. A partir de la vitesse relative au moment de l'impact, nous faisons apparaître un indice de gravité du choc. Cet indice est compris en 0 et 1. A 0, le choc n'est pas mortel et à 1, le choc est fatal. On remarquera que dans ce cas, la gravité des chocs est relativement élevée. Notons que cet indice a été établi sur la base des études détaillées d'accidents (EDA) pour des véhicules légers. Nous l'avons simplement transposé pour le cas des PL en admettant que la gravité reste identique dans le cas de chocs PL-PL ou PL contre obstacle fixe.

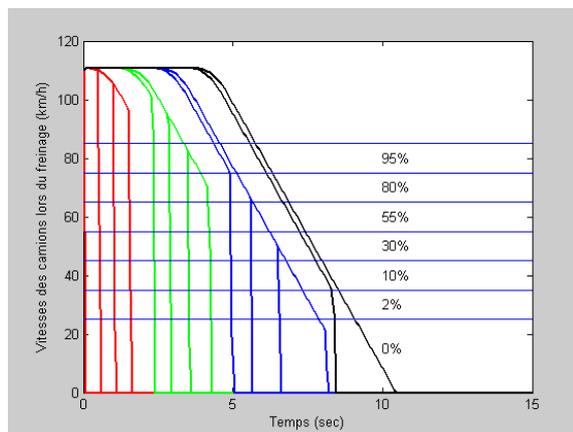


Figure 10. Profils des vitesses et gravité associée suite à une collision sur obstacle fixe, sans détection préalable

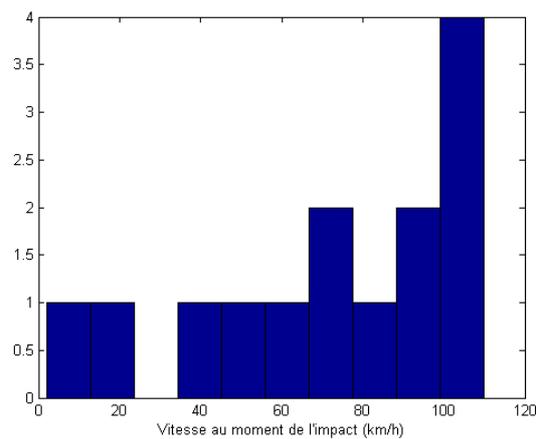


Figure 11. Histogramme des vitesses d'impact sans détection.

Par ailleurs, nous remarquons à partir de l'histogramme de la figure 11 que plus des trois quarts des collisions ont lieu à une vitesse supérieure à 50km/h. Ceci confirme encore une fois la gravité des collisions et la nécessité de disposer d'un horizon de détection.

Sachant qu'il est impossible, d'éviter l'entrée en collision des PL du premier convoi, on peut quand même déterminer la capacité maximale qui assure l'arrêt de tous les PL du second convoi sans collision. Le calcul fournit 1800véh/h. Ce point peut aussi être déterminé graphiquement à partir des tracés plus généraux de la figure 15 ci-dessous.

7.1.2 Deuxième cas : Détection du PL arrêté ou de l'obstacle

On suppose dans ce cas que le PL de tête détecte un PL arrêté ou un obstacle à la distance inter-convois, c'est à dire à 45m. Le nombre de collision recalculé, n'est plus que de 7 PL (figure 12). La gravité associée est, elle aussi, réduite comme on le note sur la figure 13, mais seule 1 collision a lieu à moins de 50km/h (figure 14).

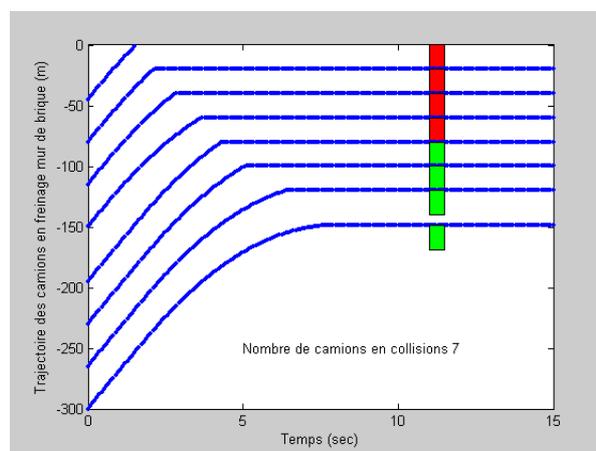


Figure 12. Collisions sur obstacle fixe avec détection à 45m

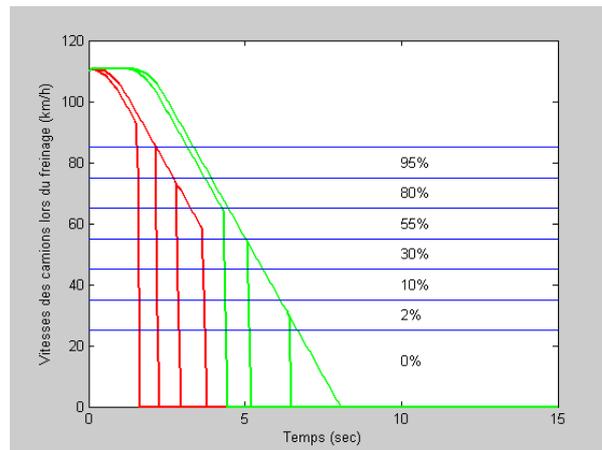


Figure 13. Profils de vitesses et gravité associée lors de collisions avec détection à 45m

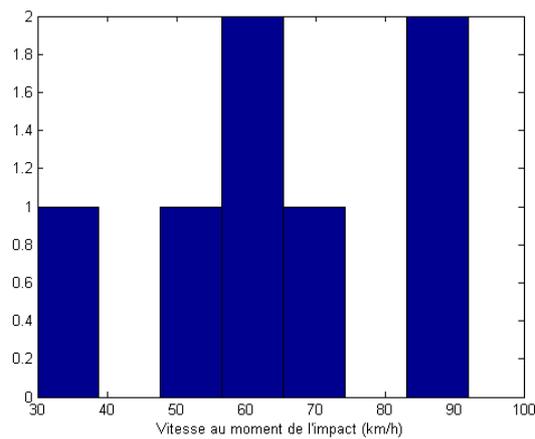


Figure 14. Histogramme des vitesses d'impact avec détection à 45m

Les tracés de la figure 15 donnent le nombre de collisions en fonction de la capacité pour des valeurs de distance de détection allant de 0 à 120m. Il va de soi que cette distance est limitée par l'espacement inter-pelotons.

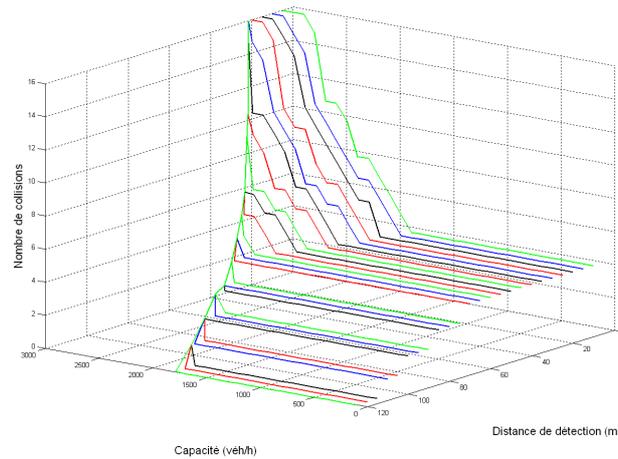


Figure 15 : Nombre de collision en fonction de la capacité et de la distance de détection de l'obstacle fixe.

On montre que l'on peut éviter toute collision si la distance de détection est portée à 120m. On peut alors discuter du couple capacité sécurité. Notons que pour une valeur de capacité donnée, la distance entre convois est déduite de $L_{ic} = \frac{3600v}{C_1} - Nl_v - (N-1)l_{iv}$.

La figure 16 donne le diagramme capacité sécurité, c'est à dire le nombre de collisions dues à la présence d'un obstacle fixe en fonction du débit. On peut noter qu'on évite toute collision si le débit est inférieur à 1800véh/h. Ceci correspond à un espacement entre convois de 120m comme précédemment calculé.

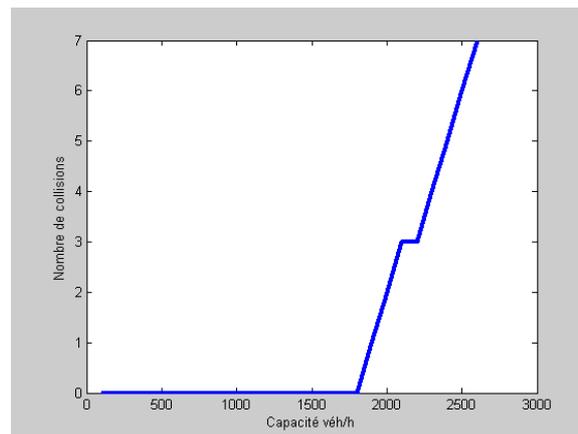


Figure 16. Diagramme Capacité-sécurité (collision sur PL ou obstacle arrêtés)

Les caractéristiques de ce scénario en sécurité de niveau 2 sont les suivantes :

Récapitulatif 3 Scénario de convoi statique (*sécurité de niveau 2*)

- *temps de réaction 0.2sec ou 0.4sec*
- *Longueur moyenne $L_{moy}=20m$*
- *Jerk maximal $-5m/s^3$*
- *Une précision sur la vitesse améliorée $\Delta v=1\%$*
- *Capacité de freinage des véhicules $-5m/s^2$*
- *Capacité maximale de 1800véh/h à 110Km/h*

7.2 Scénario convois dynamiques

Cette fois-ci, les convois sont formés en dynamique. Le poids lourd désirant emprunter l'infrastructure automatisée, communique à un centre d'optimisation des convois un ensemble de données telles que la position actuelle, l'entrée et la sortie souhaitée, la vitesse,.... Le centre lui refuse ou lui accorde l'accès à l'infrastructure. Dans le deuxième cas, un processus de prise en charge est déclenché jusqu'à l'arrivée à la bretelle de sortie. Les différences avec le scénario précédent portent sur l'organisation des convois par origine et par destination. L'étude de la capacité sécurité nécessite la connaissance des compositions des débits par origine et destination, mais aussi une description de la stratégie de régulation utilisée.

7.3 Scénario PL automatisés autonomes

Ce scénario de PL automatisés autonomes suppose que chaque PL dispose de moyens de perception et de commande leur permettant d'évoluer sans système coopérant ou communiquant l'infrastructure automatisée. Comme nous allons le voir ci-après, le manque de coopération entre les PL, rend crucial le niveau de précision de connaissance des grandeurs dynamiques mais aussi la précision des dispositifs de commande, comme la régulation de la décélération par exemple. Nous décidons de prendre comme point de départ les données ci-dessous qui sont reprises du scénario de convois en statique.

- *Temps de réaction 0.2sec ou 0.4sec*
- *Longueur moyenne $L_{moy}=20m$*
- *Jerk maximal $-5m/s^3$*
- *Précision sur la vitesse supposée $\Delta v=1\%$*
- *Capacité de freinage souhaitée $-5m/s^2$*

Nous analysons donc dans un premier temps, l'influence sur la capacité, en sécurité de niveau 1, des précisions sur la vitesse et la capacité de freinage. L'effet d'une dispersion possible des freinages est aussi examiné. Finalement nous déterminerons le nombre de collisions contre un obstacle ou un PL arrêté, ceci nous permettra de proposer une valeur de capacité satisfaisant la sécurité de niveau 2.

7.3.1 Influence de la précision sur les vitesses

Il est clair que pour maximiser la capacité, il faudra éviter tous les états transitoires et faire circuler les véhicules à la même vitesse. Il sera donc nécessaire de disposer de dispositifs de régulation de vitesse précis. Malheureusement même si ceci est le cas, il subsistera forcément une imprécision sur la connaissance de la vitesse du PL aval du fait de la limitation des moyens de perception. Comme nous l'avons signalé, cette imprécision est considérée comme pénalisante pour la capacité, au sens où le véhicule suiveur roule plus vite : il roule à la vitesse $(v+\Delta v)$. Pour simplifier l'interprétation des résultats, on supposera que les véhicules ont une capacité de freinage identique et égale à $-5\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. La figure 17 donne l'évolution de la capacité en fonction de la vitesse pour différentes valeurs de Δv comprises entre 1% et 5%. On remarquera que cette contrainte est d'importance. A titre d'exemple, à $110\text{Km}\cdot\text{h}^{-1}$, la capacité maximale d'une voie diminue de $3900\text{véh}\cdot\text{h}^{-1}$ à $3000\text{véh}\cdot\text{h}^{-1}$ quand on passe d'une erreur de 1% à 5%. Il est donc important d'avoir une bonne précision sur les vitesses, en tout état de cause inférieure ou égale à 5%, car comme nous allons le voir, les autres paramètres vont encore limiter la capacité maximale. Pour la suite de l'étude, elle sera prise égale à 1%.

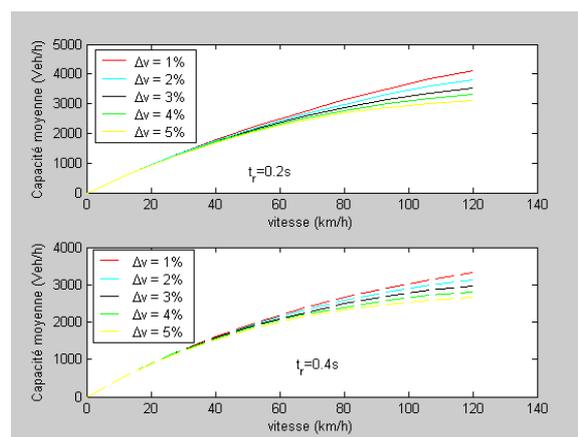


Figure 17. Effets de l'imprécision de la mesure des vitesses

7.3.2 Influence de la dispersion des capacités de freinage

La capacité varie selon que les véhicules ont des capacités de freinage fortement ou faiblement différenciées. Dans le cas où les véhicules n'auraient pas la même capacité de freinage, on suppose que la capacité de freinage suit une distribution gaussienne. La figure 18 donne la capacité en fonction de la vitesse pour différentes valeurs de capacité de freinage, celles-ci étant supposées connues pour chaque véhicule. La figure montre qu'il est préférable d'avoir une capacité de freinage plus faible mais identique pour tous les véhicules plutôt que de fortes capacités différenciées. Par exemple à $110\text{Km}/\text{h}$, des caractéristiques constantes de freinage à $-3\text{m}/\text{s}^2$ permettent d'atteindre une capacité de $3700\text{véh}/\text{h}$, proche de celle obtenue pour $-5\text{m}/\text{s}^2$ alors qu'un parc de véhicules aux caractéristiques de freinage variant entre $-7\text{m}/\text{s}^2$ et $-3\text{m}/\text{s}^2$ ne permettent d'atteindre que $1000\text{véh}/\text{h}$.

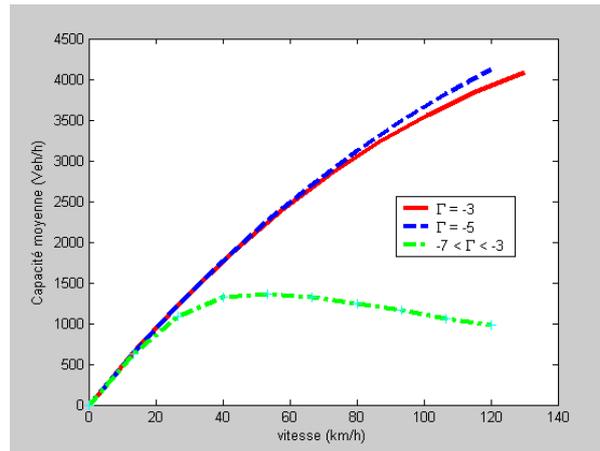


Figure 18. Effets de la dispersion des capacités de freinage

La capacité maximale moyenne atteignable est peu sensible à la valeur de la capacité de freinage si celle-ci est identique pour l'ensemble des véhicules. Ce résultat est rassurant car même pour un parc de véhicules munis de la fonction automatisée et ayant une distribution de capacités de freinage comparable à celles du parc actuel, c'est à dire comprise entre et -7m/s^2 et -3m/s^2 , il sera possible de limiter la capacité de freinage des véhicules sans perte importante de capacité. Ceci signifie aussi que pour des conditions d'adhérence réduite, il est seulement nécessaire de pouvoir mobiliser une capacité de freinage homogène.

Il est par ailleurs clair que la mobilisation d'une décélération fixée à l'avance pour l'ensemble des PL sans coopération et sans connaissance de l'adhérence mobilisable n'est chose acquise. Il est donc nécessaire d'examiner l'influence de la précision sur la capacité de freinage fixée à -5m/s^2 .

7.3.3 Influence de la précision sur les capacités de freinage

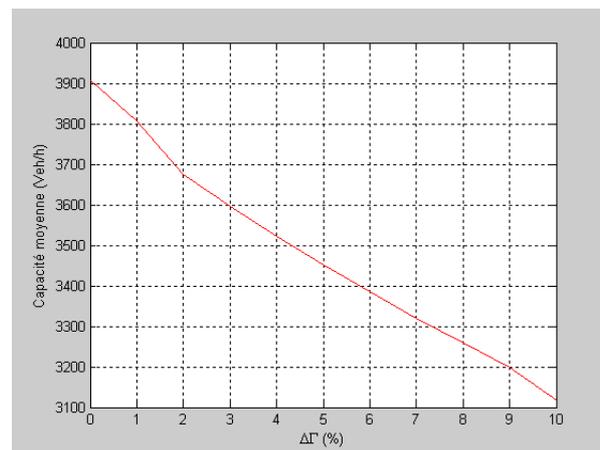


Figure 19. Influence de l'imprécision de la capacité de freinage sur la capacité à 110km/h

Nous avons précédemment établi une capacité moyenne de 3900véh/h en admettant que les freinages s'effectuent exactement à -5m/s^2 . Il apparaît de la figure 18 que précision de 10% sur ce freinage entraîne une baisse de la capacité à 3100véh/h. Cette précision sur le freinage est réaliste, nous retiendrons donc pour ce scénario, cette dernière valeur de capacité en sécurité de niveau 1.

Récapitulatif 4 PL automatisés autonomes (sécurité de niveau 1)

- Longueur moyenne $L_{moy}=20m$
- Jerk maximal $-5m/s^3$
- Précision sur la vitesse supposée $\Delta v=1\%$
- Capacité de freinage souhaitée $-5m/s^2$
- Précision sur les freinages $\Delta \Gamma=10\%$
- Capacité de 3100 véh/h à 110km/h

Examinons maintenant la sécurité de niveau 2 en calculant le nombre de collision sur obstacle fixe. Nous distinguerons deux cas : Dans le premier cas, les PL ne sont pas informés de la situation, ils détectent l'un après l'autre le freinage du PL qui précède et les temps de réaction se cumulent. Dans le second cas, les PL disposent d'un système d'alerte généralisé par communication, déclenché par le premier véhicule qui détecte l'obstacle ou par l'obstacle lui-même. Dans ce cas les temps de réaction ne se cumulent plus.

7.3.4 Détermination du nombre de collisions sur obstacle

Les capacités calculées précédemment permettent de garantir un niveau de sécurité minimal qui correspond à l'absence de collision en cas de freinage brusque. Que se passe-t-il alors dans le cas de la présence d'un obstacle fixe sur la voie ? Quel est le nombre de véhicules impliqués dans les collisions en chaîne qui en découle ? Nous supposons que le déplacement de l'obstacle et la déformation des véhicules sont négligeables.

Le calcul se fait comme suit :

Pour une capacité C donnée à une vitesse v, on calcule la distance moyenne d_m entre les véhicules par l'équation

$$d_m = \frac{3600v}{C} \frac{l_m + l_M}{2}$$

La distance d_m est bien sûr supérieure ou égale à la distance de sécurité minimale.

- On calcule la distance d_{ar} nécessaire à un véhicule pour s'arrêter hors temps de réaction.
- Le nombre total de PL k_c en collision se déduit donc des équations suivantes :
 - chaque PL est informé de l'incident ou le détecte à partir du véhicule qui le précède. Les temps de réaction s'accumulent donc
$$(k_c - 1)d_m = (k_c - 1)v t_r + d_{ar}$$

ce qui donne un nombre de collisions k_{c1}

$$k_{c1} = E \left[1 + \frac{d_{ar}}{d_m - v t_r} \right]$$

- si le premier PL qui heurte l'obstacle fixe alerte simultanément les véhicules en amont, le temps de réaction n'est plus cumulé. Le nombre de collisions k_{c2} dans ce cas vérifie

$$k_{c2} = E \left[1 + \frac{v t_r + d_{ar}}{d_{am}} \right]$$

Nous prenons volontairement une capacité égale à celle du scénario « convois en statique », c'est à dire 2600veh/h. Nous supposons que les PL sont initialement à la vitesse de 110km/h et le temps de réaction est fixé à 0.2s, lorsque le premier PL percute un obstacle fixe supposé de masse infinie (mur de brique). Les trajectoires et vitesses respectives des PL pendant la procédure de freinage apparaissent sur les figures 20 à 23. On dénombre donc 9 collisions lorsque les temps de réaction se cumulent et 7 collisions dans le second cas. Notons que les vitesses d'impact sont majoritairement supérieures à 50km/h. Ces résultats sont comparables à ceux du scénario « convois en statique » lorsque le PL de tête dispose d'un dispositif de détection de l'obstacle.

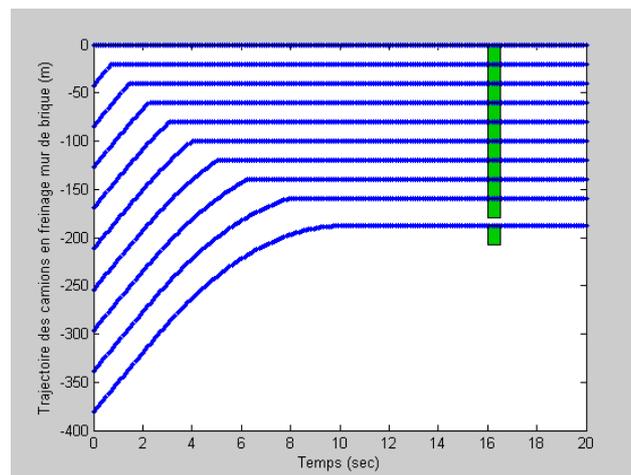


Figure 20. Trajectoires des PL à 110Km/h, C=2600véh/h, $t_r=0.2$ sec cumulés

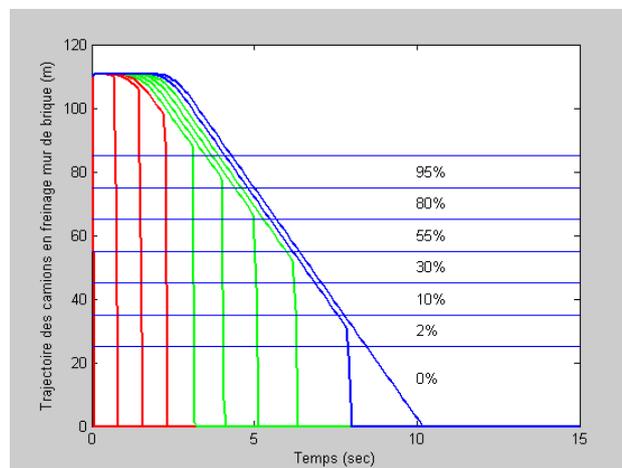


Figure 21. Profils de vitesses et gravité associée lors de collisions sur obstacle fixe avec temps de réaction cumulés

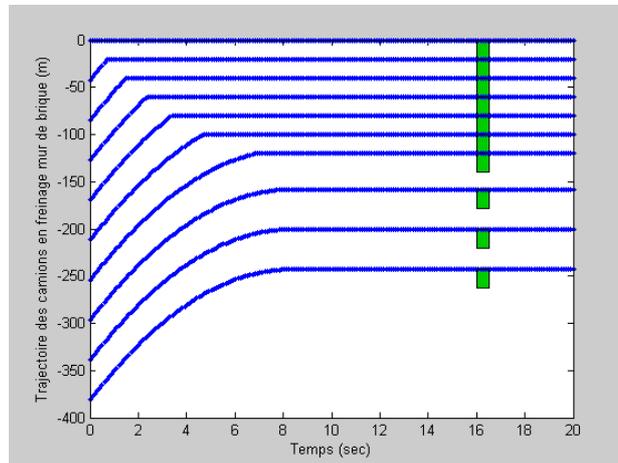


Figure 22. Trajectoires des PL à 110Km/h, $C=2600\text{véh/h}$, $tr=0.2\text{ sec}$ non cumulés

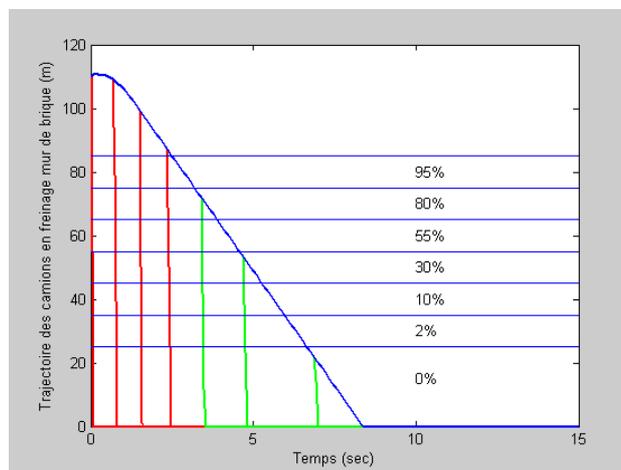


Figure 23. Profils de vitesses et gravité associée lors de collision avec un temps de réaction de 0.2s non cumulé

On fait varier maintenant la capacité et on calcule le nombre de collisions pour un temps de réaction de 0.2s et 0.4s cumulé ou non cumulé. Le nombre de collisions pour chaque cas apparaît sur les figures 24 et 25. Nous faisons aussi apparaître sur l'axe vertical la situation actuelle qui correspond à une moyenne de 2.9 collisions pour les bons conducteurs et 5.4 collisions pour les mauvais conducteurs. Le nombre collisions calculé est bien sûr toujours supérieur à 1 puisque, par hypothèse, le premier PL ne détecte pas l'obstacle. Le bon conducteur regarde à l'horizon infini alors que le mauvais conducteur surveille seulement le véhicule qui le précède. On remarque que l'on reste meilleur que les performances des bons conducteurs jusqu'à 1600veh.h^{-1} . Par ailleurs la différence

entre le nombre de collisions avec ou sans cumul des temps de réaction n'intervient qu'au-delà de ce niveau de capacité, elle est donc sans intérêt dans ce cas. On déduit aussi des figures 24 et 25 que pour une capacité de l'ordre de 1800veh/h, on dénombre 4 collisions, ce qui est donc identique au cas du scénario de circulation en convoi sans détection de l'obstacle fixe.

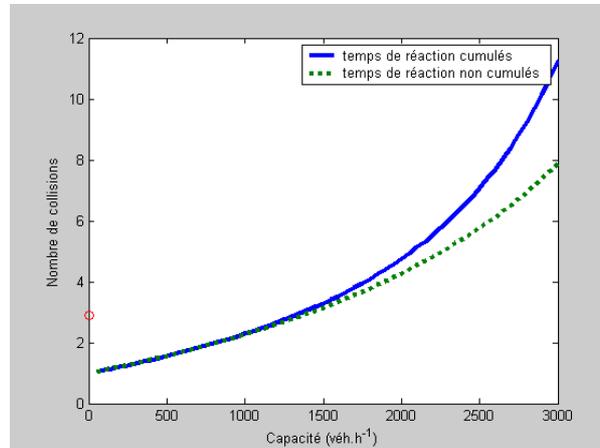


Figure 24. Nombre de Collisions en fonction de la capacité (temps de réaction de 0.2sec)

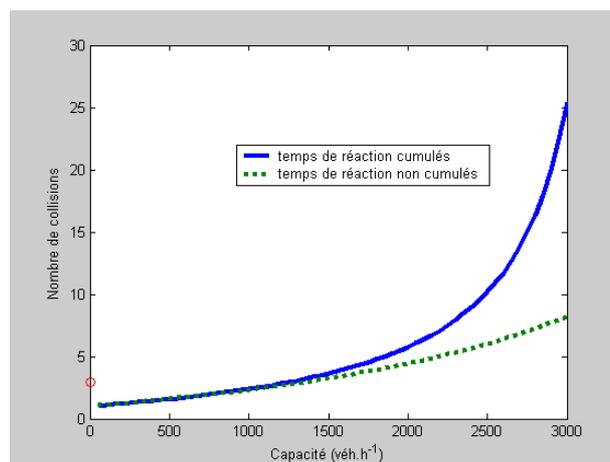


Figure 25. Nombre de Collisions en fonction de la capacité (temps de réaction de 0.4sec)

8 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons, dans un premier temps, évalué les bénéfices de l'évolution des PL sur la capacité et la consommation. Nous avons aussi examiner la possibilité d'utiliser une voie de circulation en trafic mixte associant PL automatisés et VL en conduite manuelle. Dans ce cas, nous avons conclu à un gain en capacité de l'ordre de 50% par rapport à la situation actuelle. Mais ce gain est purement théorique car les nombreux et inévitables phénomènes transitoires qui seront engendrés par les insertions et les sortie limiteront fortement cette valeur. Notons aussi que la disparité des capacités de freinage PL-VL mais aussi les caractéristiques dynamiques militent pour l'abandon de ce scénario. Les scénarios sur voie dédiée montrent que l'on peut plus que doubler la capacité tout en assurant une sécurité de niveau 1.

Dans le cas du scénario « convois en statique », nous avons montré que la capacité de 1800véh/h satisfait la contrainte de sécurité de niveau 2. Au-delà, les PL doivent être munis de dispositifs de détection permettant d'éviter les collisions sur obstacle fixe. Le scénario de PL automatisés autonomes permet des gains en capacité plus élevés dans le cas de la sécurité de niveau 1. Par contre satisfaire à la sécurité de niveau 2 paraît plus complexe. On montre quand même qu'on améliore les performances capacité-sécurité par rapport au cas du conducteur expérimenté.

9 BIBLIOGRAPHIE

- Blosseville J.-M., Mangeas M., Ehrlich J., Mammari S., Fouilloux A., La Route Automatisée, Analyse et évaluation d'un scénario d'autoroutes périurbaines, Convention DSCR, n° 9770013, mars 2000.
- Blosseville J.-M., Aubert D., Mammari S., Les recherches sur l'assistance et l'automatisation de la conduite, Transport Environnement Circulation, n° 141, p. 31-35, mars-avril, 1997.
- Bose and P. Ioannou, " Mixed Manual/Semi-Automated Traffic: A Macroscopic Analysis", Submitted to Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Décembre 2003.
- Broucke M., Varaiya P., A theory of Traffic Flow in Automated Highway Systems, PATH report, 1995.
- Deshpande A., Varaiya P., Design and Evaluation Tools for Automated Highway Systems, PATH Report, 1995.
- Doss E., Hanebutte U., Vitela J., Vanhoozer A.B., Simulation of Highway Traffic with Various Degrees of Automation.
- Fenton R.E., Mayhan R.J., Automated Highway Studies at the Ohio State University, an Overview, IEEE Transactions on vehicular Technology, 40, p. 306-315, 1991.
- Fenton R.E., Melocik G., Olson K., On the steering of automated vehicles: theory and experiment, IEEE Transactions on Automatic Control, 21, p. 306-315, 1976.
- Furukawa Y., Status and Future Direction of Intelligent Drive Assist Technology, IEEE Intelligent Transportation Systems, p. 113-118, 2000.
- La Route Automatisée, Éditions INRIA, ISBN 2-7261-1126-2, 1998.
- Lygeros J., Godbole D.N., An interface between continuous and discrete-event controllers for vehicle automation, PATH report, 1994.
- Michael J.B., Godbole D.N., Lygeros J., Sengupta R., Capacity analysis of traffic flow over single-lane automated highway system, ITS journal, Vol. 4, p. 49-80, 1998.
- Misener J., Deshpande A., Godbole D., Sengupta R., Michael B., Broucke M., Application of Design and Evaluation Tools to the Automated Highway System, Third ITS world congress, Orlando, États-Unis, 1996.
- Ran B., Tsao H.S.J., Traffic Flow Analysis for an Automated Highway System, TRB Annual Meeting 1996.
- Shladover S.E., et al., Steering Controller Design for Automated Guideway Transit Vehicles, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 100, 1978.
- Varaiya P. Smart Vehicles on Smart Roads: Problems of Control, IEEE Transactions on Automatic Control, 38, 1993.
- Zhang Y., Kosmatopoulos E.B., Ioannou A., Chien C.C., Autonomous Intelligent Cruise Control Using Front and Back Information For tight Vehicle Following Manœuvres, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 48(1), p. 319-328, 1999.

ETUDE DE FIABILITE : ETUDE PRELIMINAIRE DE SECURITE DE CONVOIS DE POIDS LOURDS

1 RESUME

L'étude préliminaire de sécurité présentée vise d'une part à déterminer les objectifs de sécurité, en terme de fiabilité, que la conduite automatique intégrale d'un poids lourd sur autoroute française devra atteindre et, d'autre part, à déterminer les parties fonctionnelles critiques de ce système. Dans ce cadre, l'intervention du facteur humain pour la conduite automatique intégrale n'a pas été prise en compte.

Cette approche a permis de définir un besoin important des caractéristiques des capteurs longue portée qui préviendrait d'un obstacle arrêté sur la voie. Etant donné les possibilités technologiques actuelles, seuls les capteurs de type vision ont un prisme de détection capable d'atteindre les objectifs énoncés mais ont une portée de détection efficace moindre que la distance de freinage sur chaussée mouillée. Sans progrès significatif dans le domaine de la détection efficace à longue portée, il est recommandé que la vitesse maximale des poids lourds en conduite automatique sur chaussée mouillée soit diminuée.

Après avoir donné la méthode d'évaluation, elle a été appliquée à notre cas d'étude. Les objectifs de sécurité selon le principe G.A.M.E. (Globalement Au Moins Equivalent) utilisé dans le domaine ferroviaire en France ont été appliqués. **L'objectif minimal selon ce principe évalué pour 100 km de voie équipée avec un débit de 100PL/heure est de $2,13 \cdot 10^{-3}$ collision/heure/100km soit 11,5 collision/an/100km et ce quelque soit le trafic poids lourd.** Ces objectifs ne faisant pas statistiquement décroître ni le nombre d'accidents ni le nombre de victimes, ils sont révisables à la baisse par l'autorité de contrôle selon les objectifs qu'elle veut fixer.

L'architecture fonctionnelle a été réalisée en s'arrêtant à un niveau fonctionnel relativement haut afin de prévenir toute orientation vers une architecture matérielle qui est du ressort du concepteur. Sur la base de cette architecture fonctionnelle, l'analyse et l'évaluation des risques sous forme d'A.M.D.E.C. a été construite. Hormis, les fonctions liées à l'acquisition de l'environnement et à leur traitement qui reste à analyser, cette A.M.D.E.C. a fait ressortir clairement des besoins forts en sécurité pour tous les organes du poids lourd gérant la conduite. La solution en cas de danger détecté étant le freinage d'urgence, tous les traitements et équipements liés à la réalisation d'un freinage d'urgence devront être plus particulièrement sûrs de fonctionnement. Excepté le poids lourd, d'autres fonctions plus liées à l'infrastructure au sens général sont à prendre en compte au niveau de la sécurité comme les fonctions liées à aider le poids lourds à se localiser et à recevoir et émettre des données de communications vers les gestionnaire d'infrastructure et la gendarmerie.

2 INTRODUCTION

L'étude préliminaire de sécurité présentée vise d'une part à déterminer les objectifs de sécurité, en terme de fiabilité, que la conduite automatique intégrale d'un poids lourd sur autoroute française devra atteindre et, d'autre part, à déterminer les parties fonctionnelles critiques de ce système. Dans ce cadre, l'intervention du facteur humain pour la conduite automatique intégrale n'a pas été pris en compte.

Pour cette étude, dans une première partie, le contexte d'un poids lourd sur autoroute est premièrement déterminé en s'attardant sur le poids lourd, l'autoroute, l'environnement autoroutier et

les accidents sur autoroute. Une fois les bases de l'étude définies, une deuxième partie donne brièvement la méthode d'évaluation de la sécurité utilisée. Ensuite, la troisième partie s'attarde sur l'architecture fonctionnelle du système. On y trouve une identification non exhaustive des risques externes susceptibles d'affecter le bon fonctionnement du poids lourd en conduite automatique, la détermination des objectifs de sécurité selon un principe couramment utilisé en France pour les systèmes ferroviaires et l'architecture fonctionnelle en elle-même. Enfin, la quatrième partie donne une première analyse préliminaire des risques et identifie les principales fonctions critiques du système.

3 CONTEXTE DE L'ETUDE

Le but de l'étude est de déterminer la sécurité d'une route automatisée pour les poids lourds pour le transport de marchandises. Il s'agit ici de délimiter le cadre de l'étude en se basant sur les différents acteurs impliqués dans une future route automatisée poids lourds pour le transport de marchandises en France.

Plusieurs acteurs interviennent déjà autour de l'autoroute conventionnelle en France. On peut les regrouper en deux catégories :

Humain : le chauffeurs, l'exploitant de poids lourds, l'exploitant de l'infrastructure et la gendarmerie

Matériel : le poids lourd, l'infrastructure, l'environnement et le trafic.

Chacun de ces acteurs impose certaines contraintes qu'il faut prendre en compte. Néanmoins, l'étude réalisée ici est orientée vers la sécurité "matérielle" sans pour autant oublier les interactions de l'homme. Selon cette approche de la sécurité, on s'intéressera dans un premier temps au poids lourd sur une autoroute française. Puis, dans un deuxième temps, on s'attachera à l'infrastructure. Ensuite, une autoroute étant dans un environnement ouvert, on déterminera les contraintes que cela implique sur la route automatisée poids lourds. Après quoi, nous étudierons les interactions avec trafic autoroutier. Enfin, nous donnerons les bases utilisées pour l'étude de sécurité.

3.1 Le poids lourd sur une autoroute française

Le poids lourd est au cœur du système. Il dispose de tous les moyens nécessaires de contrôle et de commande, pour permettre ou non sa conduite en automatique. Pour définir le poids lourd, la directive 93/53/CE [1], le code de la route [2] et les données de tarification de l'A.S.F.A. [3] ont été utilisés. Pour cette étude, un poids lourd sera considéré comme un véhicule à moteur ou un véhicule articulé ou un train routier à 2 essieux ou plus dont :

- la hauteur est comprise entre 3 et 4 m,
- la largeur est inférieure ou égale à 2,55 m,
- la longueur est inférieure à 18,75 m,
- le poids total autorisé en charge est compris entre 12 et 40 tonnes,
- selon la marchandise transportée, il sera limité à :
 - 80 km/h pour le transport de matières dangereuses,

- 90 km/h pour le transport d'autres types de marchandises,
- et à 50 km/h si la visibilité réelle est inférieure à 50 m quelque soit la marchandise transportée.

3.2 Infrastructure autoroutière

En France, les autoroutes sont réglementées par le code de la voirie routière. D'un point de vue technique, la formalisation de leur construction est assurée par le S.E.T.R.A.. Les recommandations sont disponibles dans une circulaire datée du 12 décembre 2000 intitulée "Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison" (I.C.T.A.A.L.) [4]. Une autoroute y est définie comme "*une route à chaussées séparées comportant chacune au moins deux voies par sens en section courante, à échanges systématiquement dénivelés, sans accès riverains.*"

Les autoroutes ou sections d'autoroutes sont classées en trois catégories différenciées par l'environnement dans lequel s'inscrit l'autoroute :

- **la catégorie L₁**, appropriée en région de plaine ou vallonnée où les contraintes de relief sont modérées ;
- **la catégorie L₂**, mieux adaptée aux sites de relief plus difficile, compte tenu des impacts économiques et environnementaux qu'il implique ;
- **la "hors catégorie"**, franchissant un site de relief particulièrement difficile bénéficie de règles particulières.

Suivant les catégories d'autoroutes, l'I.C.T.A.A.L. donne des recommandations sur :

- le profil en travers en section courante,
- le tracé en plan en section courante,
- le profil en long en section courante,
- les règles de visibilité.

Pour le tracé en plan en section courante, les rayons de courbures minimaux en plan sont résumés dans le tableau suivant :

Catégorie	L ₁	L ₂	Hors catégorie
Rayon minimal déversé (R _m)	600 m	400 m	240 m
Rayon minimal non déversé (R _{nd})	1 000 m	650 m	650 m

Tableau 1 : valeurs minimales des rayons du tracé en plan [4]

L'ICTAAL recommande d'utiliser des rayons égaux ou supérieurs à $1,5.R_{nd}$ afin d'améliorer le confort et faciliter les règles de visibilité.

Les paramètres du profil en long sont limités comme suit dans le tableau 2 :

Catégorie	L ₁	L ₂	Hors catégorie
Déclivité maximale	5 %	6 %	6%
Rayon minimal en angle saillant	12 500 m	6 000 m	2 700 m
Rayon minimal en angle rentrant	4 200 m	3 000 m	1 900 m

Tableau 2 : valeurs limites des paramètres du profil en long [4]

De même, L'I.C.T.A.A.L. préconise l'utilisation de rayons supérieurs aux rayons minimaux. De plus, le tracé en plan et le profil en long sont étudiés dans leur ensemble afin d'assurer une bonne insertion dans le site, une bonne visibilité et, autant que possible, un certain confort visuel. Ainsi, il faut, entre autres, faire coïncider les courbes horizontales et verticales en respectant la condition : $R_{vertical} > 6.R_{horizontal}$, pour éviter un défaut d'inflexion.

En ce qui concerne les règles de visibilité sur autoroute, la distance d'arrêt est à considérer en section courante. Les distances d'arrêt données dans le tableau 3 sont calculées avec une décélération moyenne d'un poids lourd de 6 m/s^2 à laquelle est appliquée un coefficient correcteur de 0,6 sur chaussée mouillée [5]. Le cas d'une chaussée mouillée représente le pire des cas en terme de sécurité. Les temps de perception-réaction considérés sont 0,5 seconde, 1 seconde et 2 secondes.

<i>sur chaussée mouillée</i>		d_a pour décélération $=3,6 \text{ m/s}^2 (6 \times 0,6)$		
vitesse	distance de freinage	t_{pr} de 0,5s	t_{pr} de 1s	t_{pr} de 2s
90 km/h	87 m	100 m	112 m	137 m

Tableau 3 : Distances d'arrêt selon le temps de réaction du système sur chaussée mouillée

A l'aide des distances d'arrêt et des données géométriques des autoroutes, on peut déterminer les angles d'ouverture minimaux pour les capteurs longue portée. Les chiffres correspondants sont indiqués dans les figures suivantes et prennent le cas le plus défavorable : un poids lourd circulant sur

une autoroute "hors catégorie", sur chaussée mouillée, à l'entrée d'une courbe avec rayon déversé et au début ou à la fin d'une pente.

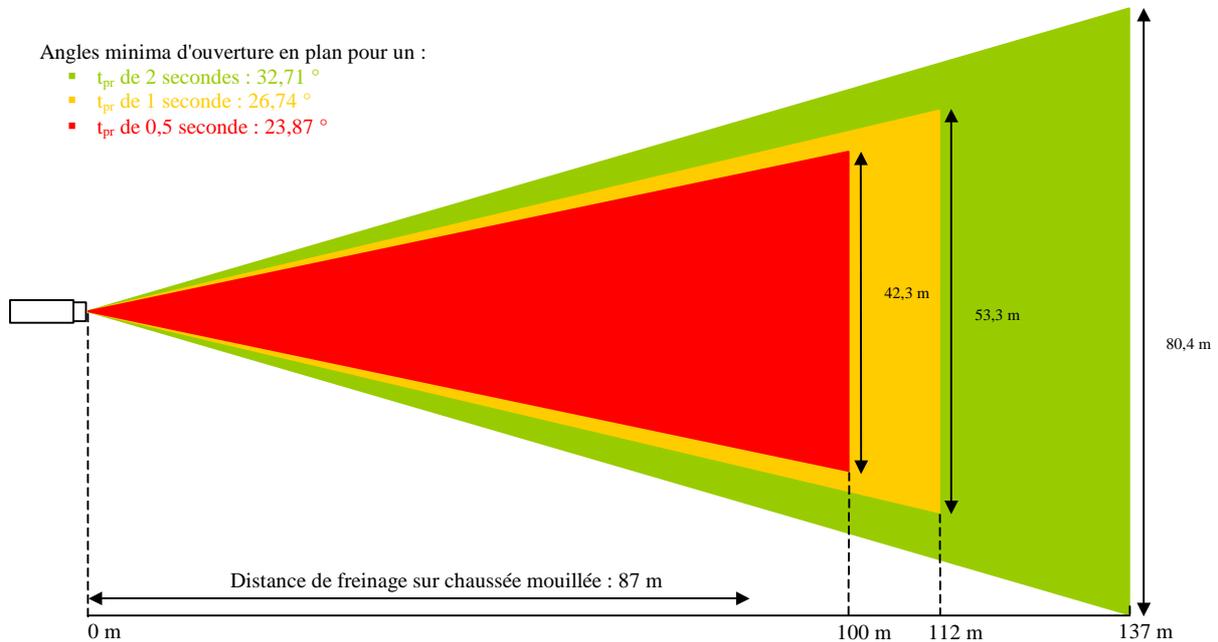


Figure 1 : Angles minima d'ouverture en plan suivant le temps de perception réaction

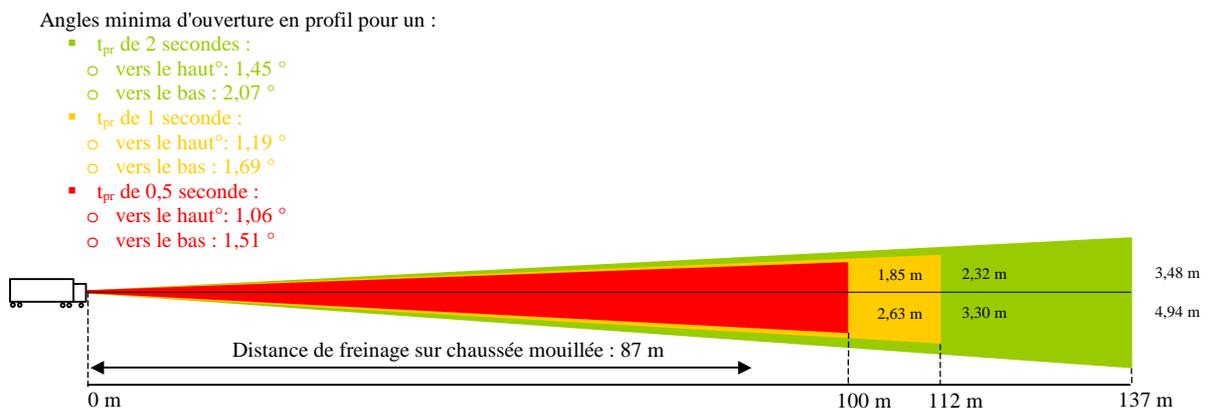


Figure 2 : Angles minima d'ouverture en profil suivant le temps de perception réaction

Ces données donnent les bases d'un prisme de détection d'obstacle à "longue portée" sur la voie. De plus, les capacités à percevoir efficacement tant en fiabilité qu'en rapidité vont fortement influencer sur la vitesse d'un poids lourd en conduite automatique sur autoroute. On peut d'hors et déjà remarquer qu'actuellement seules les technologies de type vision pourrait permettre de répondre à ces besoins de détection longue portée. Néanmoins, les capacités de détection efficaces actuellement disponibles ne

permettent pas une portée aussi importantes que la distance de freinage sur chaussée mouillée d'un poids lourd, estimée à 87 mètres. Sans progrès significatif dans le domaine de la détection efficace à longue portée, il est recommandé que la vitesse maximale des poids lourds en conduite automatique sur chaussée mouillée soit diminuée.

3.3 Environnement autoroutier

L'autoroute est soumise à différentes perturbations en provenance de son environnement immédiat. Ces perturbations peuvent non seulement agir directement sur l'infrastructure en la dégradant, mais parfois et aussi directement (comme le vent) ou indirectement (en cas de verglas, par exemple) sur chaque véhicule. Ces perturbations peuvent être classées en quatre sources de danger potentiel :

- Source atmosphérique : soleil, pluie, brouillard, vent...
- Source en provenance de l'infrastructure :
 - chaussée (mouillée, dégradée), marquage au sol...
 - courbes, ouvrages d'art, entrée et sortie...
- Source "externe" : C.E.M., fumée, feuilles, insectes, animaux...
- Source en provenance du trafic Les interactions du trafic est une source d'accidents non négligeable à prendre en compte. premièrement, le bilan des accidents impliquant au moins un poids lourd sur autoroutes de 1995 à 2000, données obtenues auprès de Jean Chapelon de l'o.n.i.s.r., est le suivant :
 - 6291 accidents corporels dont 622 mortels
 - 788 morts
 - 9290 blessés dont 1977 graves

Deuxièmement, en ce qui concerne les facteurs d'accidents mortels avec poids lourds [6], on constate que beaucoup dépendent du conducteur comme l'inattention, l'assoupissement ou encore la mauvaise appréciation de la vitesse. On peut néanmoins faire ressortir le risque des véhicules arrêtés avec le risque associé de présence de piéton et des autres obstacles sur autoroute. Ce risque avait déjà été identifié dans une étude de l'ASSECAR [7].

Cette constatation nous pousse à envisager un site en trafic mixte avec un trafic hétérogène, augmentant sensiblement les risques.

3.4 Bases de l'étude de sécurité-fiabilité

Pour cette étude, on se base sur le savoir faire acquis par l'INRETS-ESTAS dans le domaine de la sécurité ferroviaire déjà utilisé dans le cadre du programme P.A.T.H. (Partners for Advanced Transit on Highways) [8]. Les normes utilisées sont les suivantes : CENELEC NF-EN 50126 [9], CENELEC NF-EN 50128 [10], CENELEC XP ENV 50129 [11] et CENELEC prR009-004 [12].

Plusieurs aspects motivent cette approche :

- Premièrement ces normes s'appliquent aux transports terrestres guidés.
- Deuxièmement, ces normes laissent un certain degré de liberté puisque la norme NF-EN50126 précise qu'il doit exister un accord tripartite entre le constructeur, le gestionnaire d'infrastructure et l'autorité de contrôle pour la mise en place d'un nouveau système.
- Troisièmement, si l'U.T.A.C. dans la certification et l'homologation dans le secteur automobile. Il lui faudra s'adjoindre des compétences dans le domaine des transports guidés.
- Enfin, le STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés) est l'autorité de contrôle en matière de systèmes de transports guidés de personnes, notamment pour le système de tramway sur pneus guidé CIVIS. Le STRMTG préconisant l'utilisation de normes ferroviaires pour ce qui concerne la sécurité des automatismes d'un système de transport guidé de personnes, cette étude se basera sur ces normes ferroviaires et plus particulièrement la norme CENELEC NF-EN50126 pour le coté fonctionnel de cette étude.

4 METHODOLOGIE D'EVALUATION DE LA SECURITE

La route automatisée poids lourds implique plusieurs fonctions critiques en sécurité telles que le contrôle longitudinal et latéral de chaque poids lourd. Il est nécessaire que le système puisse prévenir ou réduire les conséquences d'une situation dangereuse. De plus, le système doit être capable de tolérer des défaillances et, quand les défaillances ne sont plus tolérables, le système doit être sûr de fonctionnement. Pour vérifier la sécurité d'un système, une méthode d'évaluation doit être développée et mise en place avant toute implémentation de nouvelles technologies de manière à ce que des erreurs dans les processus de spécification, de conception, de développement et d'intégration puissent être révélées afin de prévenir toute conséquence des risques.

L'approche pour conduire cette évaluation de la sécurité contiendra les étapes suivantes :

1. L'identification des principaux problèmes et les objectifs de sécurité.
2. Décomposition fonctionnelle du système.
3. Evaluation et analyse du risque.

4.1 Détermination des objectifs de sécurité

Nous suggérons l'adaptation des principes de sécurité utilisés dans le domaine du ferroviaire au système de la route automatisée poids lourds. Ces principes servent de guide afin de déterminer les objectifs de sécurité au niveau global du système. L'approche la plus largement préférée pour la gestion de la sécurité moderne est orientée vers les objectifs, où les buts à atteindre sont décrits mais pas de méthode détaillée pour y parvenir.

La manière de formuler ces objectifs est différente suivant les pays. Cependant, de manière générale, les formulations reflètent plusieurs facettes d'une même idée. En Europe, trois approches sont à considérer : le principe anglais A.L.A.R.P., le principe allemand M.E.M. et le principe français G.A.M.E. C'est sur ce dernier principe que nous nous basons. Ce principe est basé sur la comparaison avec d'autres systèmes qui fournissent un ensemble de services comparable. G.A.M.E. pour

"Globalement Au Moins Equivalent" est utilisé en France [10-12-13]. La formulation complète de ce principe est la suivante :

"Tout nouveau système de transport guidé doit offrir un niveau de sécurité globalement au moins équivalents que celui des systèmes de transports guidés existants comparables".

Cette formulation prend en compte l'expérience passée et requiert implicitement un progrès en terme de sécurité pour tout nouveau système par l'expression "au moins". Le terme "globalement" signifie que le G.A.M.E. ne considère pas un risque particulier.

4.2 Décomposition fonctionnelle

La décomposition fonctionnelle est basée sur une méthode de modélisation hiérarchique descendante des spécifications fonctionnelles d'un système. La technique de modélisation permet d'évaluer si les spécifications systèmes remplissent les exigences de sécurité d'un équipement. L'outil A.S.A. (Automata and Structured Analysis) de Verilog, basé sur S.A.D.T., est utilisé afin de décrire les aspects statiques du système.

4.3 Evaluation et analyse du risque

La description fonctionnelle du système est le point de départ pour plus de considérations. L'identification et l'analyse des risques visent à couvrir tous les comportements vis à vis de la sécurité. Cette activité débute par l'identification du système et des limites de sécurité qu'on se fixe. Il faut ensuite identifier les risques, actuels et potentiels possibles dans les limites qui ont été fixées. Une analyse alloue alors à chaque risque ou groupe de risques une catégorie de sévérité. La combinaison de la conséquence d'un évènement ou d'une combinaison successives d'évènements et leur probabilité d'occurrence détermine la classification du risque.

Cette analyse sera faite sous la forme d'une Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (A.M.D.E.C.) [14]. Elle indiquera les conséquences en terme de sévérité de chaque risque identifié au niveau de chaque fonction de l'analyse fonctionnelle.

L'analyse du risque aboutit au Niveau d'Intégrité de Sécurité. Le Niveau d'Intégrité de Sécurité détermine un ensemble de mesures de sécurité qui doivent être satisfaites. Si les mesures de sécurité issues des standards sont appliquées correctement, alors le système peut être considéré comme sûr du point de vue des standards.

5 ARCHITECTURE FONCTIONNELLE DU SYSTEME D'UN PL EN CONDUITE AUTOMATIQUE SUR ROUTE AUTOMATISEE

L'établissement de l'architecture fonctionnelle se fait après l'identification des risques et la détermination des objectifs de sécurité qui sont donnés dans ce qui suit.

5.1 Identification des risques

Le système de conduite automatique fonctionne en environnement ouvert. Autrement dit, des éléments externes non contrôlables ou modifiables (tel que l'infrastructure en elle-même ou la pluie) peuvent être des sources de perturbation dans le bon fonctionnement du système. On peut classifier les sources de perturbation en quatre familles : atmosphériques, infrastructure, éléments externes et trafic. Cette dernière ne sera pas pris en considération compte tenu des hypothèses d'étude, mais est donnée à titre d'information.

- *Source atmosphérique* : position du soleil, pluie, humidité, neige, verglas/givre, vent, brouillard, orage,...
- *Source provenant de l'infrastructure* :
 - Etat de la chaussée : chaussée mouillée, visibilité du marquage au sol, bosses / cavités, Gravier, Huile, Feuilles, débris divers,...
 - Géométrie de la route : courbes, début ou fin de côte, inclinaison, largeur des voies de circulation, entrées/sorties d'autoroute, ouvrages d'art, stations de péage, éclairage (absence ou présence).
- *Source externe* : aspect CEM, fumée, animaux, salissures et autres projectiles, dégradations volontaires.
- *Source en provenance du trafic* : véhicules environnant, phares des véhicules, accidents.

5.2 Détermination des objectifs de sécurité

Les objectifs de sécurité d'une route automatisée poids lourds sont, selon le principe G.A.M.E. [9], de ne pas engendrer plus de victimes qu'il n'y en a actuellement sur les autoroutes. Il est donc indispensable d'examiner le taux d'accidents lié aux poids lourds. De 1995 à 2000, le bilan des accidents impliquant au moins un poids lourd sur autoroute est de 6291 accidents avec 10078 victimes (morts et blessés) selon l'O.N.I.S.R. Le nombre de kilomètres parcourus pendant cette même période par les poids lourds sur autoroutes est 99,8 milliards de kilomètres [15]. Le réseau des autoroutes concédées et non concédées cumulé sur ces 6 années représente 54665 km [3, 16]. La vitesse moyenne des poids lourds de quatre essieux et plus sur autoroute de 1995 à 2000 est de 87 km/h [17, 18]. Il est par contre impossible d'avoir des données claires sur le débit horaire ou la densité. On obtient alors :

- Le nombre de collision moyen (1 accident = 1 collision) par an est 1048,5 collision/an sur l'ensemble du réseau. Il a été convenu lors des réunions du projet que les poids lourds circulent en moyenne 300 jours par an et 18 heures par jour. A partir de ces données, le nombre de collision par heure sur l'ensemble du réseau autoroutier est de 0,19 collision/heure.
- Le taux de victime par collision est $n_c = 1,6$ victimes/collision.
- Le taux de collision par kilomètre parcouru est de $6,3 \cdot 10^{-8}$ collision/km parcouru soit une collision tous les 15,86 millions de km parcourus.
- Le taux de collision par kilomètre de réseau par heure est de $2,13 \cdot 10^{-5}$ collision/km/h.

Pour le calcul des objectifs de sécurité afin de ne pas faire abstraction de la taille du réseau et induire implicitement un accroissement du nombre d'accidents lors de l'accroissement du trafic poids lourds, on se base sur la taille moyenne du réseau de 1995 à 2000, on obtient les objectifs G.A.M.E. suivants :

- $2,13 \cdot 10^{-3}$ collision/heure/100km soit 11,5 collision/an/100km
- $3,41 \cdot 10^{-3}$ victime/heure/100km soit 18,5 victimes/an/100km (avec un nombre de victime par collision constant)

Ces objectifs de sécurité établis à partir des chiffres entre 1995 et 2000 sont ensuite à répartir entre l'infrastructure et les différents poids lourds. Il faut noter que les objectifs ci-dessus, s'ils sont tout justes respectés, ne feront pas statistiquement décroître le nombre d'accidents. C'est pourquoi ces objectifs sont révisables par l'autorité de contrôle selon les objectifs qu'elle veut fixer.

A titre de comparaison, le taux d'accident collectif pour le système de transport collectif MAGGALY de 14 km du métro automatique de Lyon a été fixé à $5,5 \cdot 10^{-3}$ accident par an ce qui équivaut à peu près à une catastrophe tous les 200 ans [19]. Cependant, un système de transport guidé collectif de personne ne correspond donc pas exactement aux mêmes objectifs qu'une route automatisée poids lourds par la taille de son réseau et par d'un le plus grand nombre de victimes dans une collision. Selon les statistiques de la R.A.T.P. [19], le nombre de blessés par accident est de 20 alors que pour le système de route automatisé poids lourds, nous avons considéré une victime par accident. Il paraît alors raisonnable pour notre cas de proposer d'une part un taux d'accident 20 fois supérieur par rapport aux accidents et, d'autre part, de prendre un coefficient de 7,14 (100/14) pour la taille du réseau. Pour 100 km de réseau R.A.P.L., on obtiendra alors :

- $7,86 \cdot 10^{-1}$ collision/an/100km, soit $1,46 \cdot 10^{-4}$ collision/heure/100km.
- 1,26 victime/an/100km, soit $2,33 \cdot 10^{-4}$ victime/heure/100km.

En prenant une répartition équivalente à MAGGALY qui est de $1,2 \cdot 10^{-3}$ accident par an pour l'infrastructure et de $4,3 \cdot 10^{-3}$ accident par an pour le matériel roulant, avec une densité de 115 poids

lourds sur 100 km, chaque poids lourd en conduite automatique intégrale devrait avoir un taux de fiabilité de $10,7.10^{-7}$ /heure.

5.3 Décomposition fonctionnelle [20]

Le contexte de l'étude de la route automatisées poids lourd a été décrite dans le paragraphe correspondant. La problématique est, suivant ce contexte, de permettre une conduite automatique sûre d'un poids lourd sur autoroute. Cette conduite automatique intégrale remplace les actions du conducteur telles que le contrôle longitudinal et le contrôle latéral de la trajectoire du poids lourd. En partant du poids lourd, on exprime un besoin principal : Conduire le poids lourd. On définit alors plusieurs fonctions de base pour la fonction "Conduire le poids lourds. Cette fonction a elle-même plusieurs besoins en terme de flux de données. On définit ainsi de manière récursive les besoins et la fonction associée à chaque besoin afin de former l'architecture fonctionnelle du système. Le cas échéant quand la connaissance d'une fonction système est connue, il est possible de la décomposer et d'affiner ainsi l'architecture fonctionnelle obtenue. Les planches de la décomposition fonctionnelle représentant les fonctions et les flux de données entre les fonctions sont données dans l'annexe 2 de ce document.

il a été choisi d'arrêter la décomposition fonctionnelle de la conduite d'un poids lourd en conduite automatique intégrale a un niveau système assez haut afin de ne pas s'orienter vers des solutions matérielles pouvant être très limitatives et très contraignantes une fois fixées. on y retrouve néanmoins trois entités principales :

- "conduire le poids lourd", fonction décomposée qui rassemble toutes les fonctions et moyens permettant de la conduite automatique du poids lourd.
- "systèmes de communication et de localisation", décomposée en :
 - "envoyer des données de localisation", fonction qui concentre tous les moyens externes envoyant des données au poids lourd lui permettant de se localiser sur le réseau routier
 - "gérer les communications" entre le poids lourd et les différents intervenants et inversement
- "gérer avec les intervenants humains", décomposée en :
 - "gendarmerie", qui gère les appels d'urgence en cas d'accident
 - "exploitant d'infrastructure", qui reçoit des données de chaque poids lourd et leur envoie des informations et des consignes
 - "exploitant poids lourds", qui gère une flotte de poids lourds.

la décomposition fonctionnelle d'un poids lourd en conduite automatique intégrale disponible, on analyse ensuite fonction par fonction les risques sous la forme d'a.m.d.e.c.

6 ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES D'UN PL SUR ROUTE AUTOMATISEE [20]

L'A.M.D.E.C. réalisée est fournie en annexe 3 de ce document. L' A.M.D.E.C. possède plusieurs colonnes :

- Sous-système, le cas échéant
- Sortie, de la fonction étudiée
- Mode de défaillance, pour la sortie de la fonction
- Cause possible, du mode de défaillance
- Effet, du mode de défaillance
- Danger potentiel
- Condition nécessaire, au danger potentiel
- Sévérité, quatre catégories sont données [9]: Catastrophique, Critique, Acceptable et Négligeable

L'A.M.D.E.C. fait ressortir des parties critiques en sécurité qu'il faudra étudier avec une attention toute particulière. Pour la partie "Conduire le Poids lourd", on peut citer aisément les fonctions de "Actionner", avec principalement la fonction "Freiner" qui va notamment conditionner la réussite du freinage d'urgence.

La fonction "Gérer la conduite" de la fonction "Traiter" est elle-aussi critique puisque c'est elle qui va élaborer les commandes relatives aux actionneurs. D'une manière générale toutes les fonctions liées par un flux de données à la gestion conduite du poids lourd ont un caractère critique plus ou moins grand, le freinage d'urgence étant le dernier rempart pour parer toute défaillance du système. D'un autre côté, les fonctions de communication et d'envoi de données de localisation, ainsi que leur réception par le poids lourd sont aussi des fonctions critiques dans certains cas. Les risques pour les communications infrastructure-véhicule sont que les consignes (vitesse, conditions météorologiques, autorisation de passage en mode automatique...) ne soient pas transmises ou soient erronées et engendrent ainsi des accidents.

Pour les communications en provenance de l'infrastructure, le risque réside principalement dans de l'appel d'urgence lors de l'accident du poids lourd surtout si le chauffeur du poids lourd est blessé et qu'il ne peut pas prévenir la gendarmerie de l'accident. Il conviendra donc d'avoir une redondance dans les moyens de communication afin de s'assurer que les communications critiques arrivent correctement.

Pour ce qui concerne les systèmes de localisation, l'un des risques, comme pour la communication, est que la localisation en cas d'accident du poids lourd soit impossible ou fortement dégradée. L'autre risque, est que le système de conduite automatique soit mis en marche sur un réseau inadapté comme l'autoroute en cours de maintenance, ou pire sur le réseau secondaire. Le contrôle de la position du poids lourd devra donc être impérativement contrôlé de manière fiable pour permettre ou non le passage en mode de conduite automatique et soumis à une autorisation de l'infrastructure.

7 CONCLUSIONS

L'étude préliminaire d'un poids lourd en conduite automatique a été menée en déterminant premièrement son contexte : un poids lourd en conduite automatique intégrale sans intervention d'un chauffeur en section courante d'une autoroute française. Cette approche a permis de définir un besoin important des caractéristiques des capteurs longue portée qui préviendrait d'un obstacle arrêté sur la voie. Etant donné les possibilités technologiques actuelles, seuls les capteurs de type vision ont un prisme de détection capable d'atteindre les objectifs énoncés mais ont une portée de détection efficace moindre que la distance de freinage sur chaussée mouillée. Sans progrès significatif dans le domaine de la détection efficace à longue portée, il est recommandé que la vitesse maximale des poids lourds en conduite automatique sur chaussée mouillée soit diminuée.

Après avoir donné la méthode d'évaluation, elle a été appliquée à notre cas d'étude. Les objectifs de sécurité selon le principe G.A.M.E. (Globalement Au Moins Equivalent) utilisé dans le domaine ferroviaire en France ont été appliqués. L'objectif minimal selon ce principe évalué pour 100 km de voie équipée avec un débit de 100PL/heure est de $2,13 \cdot 10^{-3}$ collision/heure/100km soit 11,5 collision/an/100km et ce quelque soit le trafic poids lourd. Ces objectifs ne faisant pas statistiquement décroître ni le nombre d'accidents ni le nombre de victimes, ils sont révisables à la baisse par l'autorité de contrôle selon les objectifs qu'elle veut fixer.

L'architecture fonctionnelle a été réalisée en s'arrêtant à un niveau fonctionnel relativement haut afin de prévenir toute orientation vers une architecture matérielle qui est du ressort du concepteur. Sur la base de cette architecture fonctionnelle, l'analyse et l'évaluation des risques sous forme d'A.M.D.E.C. a été construite. Hormis, les fonctions liées à l'acquisition de l'environnement et à leur traitement qui reste à analyser, cette A.M.D.E.C. a fait ressortir clairement des besoins forts en sécurité pour tous les organes du poids lourd gérant la conduite. La solution en cas de danger détecté étant le freinage d'urgence, tous les traitements et équipements liés à la réalisation d'un freinage d'urgence devront être plus particulièrement sûrs de fonctionnement. Excepté le poids lourd, d'autres fonctions plus liées à l'infrastructure au sens général sont à prendre en compte au niveau de la sécurité comme les fonctions liées à aider le poids lourds à se localiser et à recevoir et émettre des données de communications vers les gestionnaire d'infrastructure et la gendarmerie.

En perspective de cette étude, l'analyse des fonctions liées à l'acquisition de l'environnement et à leur traitement reste à faire. L'établissement des Niveaux d'Intégrité de Sécurité de chaque fonction sera étudié en fonction de la disponibilité des chiffres concernant la fréquence de chacun des risques identifiés. Enfin, l'étude sera élargie au cas d'un convoi de camion selon les caractéristiques des scénarii étudiés dans le thème 5 du projet en s'attardant plus particulièrement sur les besoins en termes de communications générés par les convois de poids lourds.

ETUDE DE FIABILITE DE LA FONCTION "GESTION DE L'INTERDISTANCE" DANS LE CADRE DE LA RAPL

1 RESUME

Quel que soit le scénario choisi pour la RAPL, la fonction de gestion de l'interdistance est essentielle à la sécurité. Que les véhicules soient en convoi ou en mode automatique, il est important de conserver une distance de sécurité entre les véhicules. Notre objectif dans cette étude est de savoir si les mêmes conditions de sécurité que celles offertes sur la route actuelle peuvent être atteintes lorsque la gestion de l'interdistance (perception et contrôle) est réalisée par un système automatique.

Le risque moyen de collisions sur les autoroutes actuelles a été évalué à $1,17 \cdot 10^{-5}$ collisions/h. Notre étude nous permet de proposer une architecture matérielle (utilisant des composants actuellement disponibles) susceptible de répondre à ces contraintes sécuritaires dans le cas où l'interdistance serait contrôlé par un système automatique.

L'automatisation du pilotage des poids lourds nécessite la mise en œuvre d'une fonction de gestion d'interdistance qui permet de conserver entre les véhicules, une distance de sécurité. Cette fonction peut être plus ou moins automatisée.

- Le niveau d'automatisation le plus faible correspond à un système d'assistance au conducteur. La fonction de gestion d'interdistance a pour objectif d'estimer la distance entre le véhicule équipé de celui qui le précède et d'informer le conducteur, qui a la possibilité de respecter (ou non) l'interdistance.
- Le deuxième niveau impose le respect de l'interdistance. Le système peut agir sur le système de frein du véhicule dès que l'interdistance atteint une valeur trop basse et dangereuse vis-à-vis d'une consigne fonction de la vitesse du véhicule.
- Le troisième niveau d'automatisation correspond à une chaîne complète de régulation automatique de l'interdistance. On pourra souhaiter par exemple maintenir une distance de sécurité constante entre deux véhicules. Deux possibilités sont à envisager :
 1. une conduite semi-autonome, dans laquelle on réalise un asservissement de l'interdistance par l'actionnement du système de freinage ou de l'accélération, le conducteur assurant le contrôle latéral en agissant sur la direction,
 2. une conduite toute automatisée dans laquelle l'asservissement de l'interdistance est complété d'une fonction de maintien du véhicule sur sa voie.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la fonction "perception d'interdistance" incluant les sous-systèmes : mesure de l'interdistance (à l'aide de capteurs passifs tels les caméras ou de capteurs actifs tels les radars), mesure de la vitesse propre et signalisation du danger. Pour privilégier l'aspect sécuritaire, nous avons considéré que chacun des trois

éléments avait un taux de défaillance (nombre de défaillances par heure) identique et égal à celui de l'élément le moins fiable : le capteur d'interdistance. Nous montrons alors qu'il est a priori possible d'atteindre technologiquement l'objectif de fiabilité (**$1,17 \cdot 10^{-5}$ défaillances/heure**) fixé dans la mesure où il existe déjà sur le marché des capteurs d'interdistance (radar, lidar, ...) répondant à des exigences encore plus fortes. Cependant, afin d'éviter les effets des défaillances "externes" (conditions climatiques par exemple) il est nécessaire d'avoir une redondance des moyens de mesure c'est à dire d'implanter plusieurs capteurs de technologies différentes qui ne sont pas sensibles aux mêmes défaillances.

Dans la dernière partie du document, nous considérons la fiabilité du système d'asservissement de l'interdistance. L'étude des causes et de la criticité des défaillances conduit à proposer une architecture d'asservissement d'interdistance répondant aux contraintes de sécurité suivantes : **la panne d'un seul composant peut conduire au désengagement automatique du système (avec une poursuite de la conduite en mode manuel) et seule la défaillance simultanée de deux composants conduit à une situation à risque avec un comportement dangereux du véhicule.**

Whatever the considered scenario for the Automated Highway System, the management of vehicles inter-distance is very important for security reasons. Whether trucks are in convoys or in automatic mode, it is necessary to keep a secure distance between the vehicles. The objective of this study is to know if we can reach at least the same security level as the one of the actual highways when the inter-distance management is made by an automatic system.

The mean collision risk on actual highways has been evaluated to $1,17 \cdot 10^{-5}$ collisions/h. Our study allows to propose a material architecture (using actual available components) that permits to answer to these safety constraints when the inter-distances are controlled by an automatic system.

The automatic driving of trucks requires the implementation of a function that allows to manage a safety distance from the preceding vehicle. Different levels of automation may be identified.

- The first level of automation corresponds to a driving assistance to the driver. The objective of the function "management of vehicles inter-distance" is to estimate (measure) the distance and to inform the driver who can reduce the speed.
- The second level impose to respect a given inter-distance. The system checks the front vehicle distance and when the value becomes too small, the speed is automatically decreased by acting on the brakes or the retarders.

- The third level corresponds to a complete automatic distance control. It could be aimed for instance to respect a given security distance between vehicles. Two cases may be envisaged:
 1. A semi-automatic driving in which the speed is automatically adjusted by controlling brakes or throttle. The lateral control of the vehicles stands to the driver.
 2. A complete automatic driving (longitudinal and lateral control) of the vehicle.

In a first time, we study the first level of automation that needs the three sub-functions: distance measurement, speed measurement and danger signalling. We consider for security reasons that the rate of failure (number of failures per hour) of all components are the same and equal to the highest rate, i.e. the failure rate of the inter-distance sensor. We show that it is possible to reach the reliability objective (**$1,17 \cdot 10^{-5}$ fault/hour**) insofar as actual sensors like radars or lidars respects actually stronger reliability constraints. However, in order to avoid external failures effects, it is necessary to have a redundancy of sensors that are not all sensitive to the same failures.

Finally, we consider the reliability of the automatic control system (third level of automation). From the analysis of failures causes and criticality, we propose an architecture of interdistance servo-control that respects the following safety constraints : **the failure of one component induces the automatic disengagement of the distance control system (with the possibility to continue in manual mode) and only the simultaneous failure of two components leads to a risked situation.**

2 INTRODUCTION GENERALE

L'évaluation de la Sûreté de Fonctionnement d'un système complexe est une tâche difficile. Elle nécessite des outils et méthodes d'analyse mais aussi de nombreuses expérimentations et retours d'expérience. La tâche est encore plus ardue lorsque le système n'est pas complètement et précisément défini comme c'est le cas pour la Route Automatisée Poids lourd. La Sûreté de Fonctionnement entre alors comme un critère du cahier des charges de conception. Afin d'évaluer cette sûreté de fonctionnement, un certain nombre d'hypothèses doivent être formulées en terme de coût, de complexité, d'architecture, de politique de maintenance. Ces hypothèses ne sont pas à l'heure actuelle bien définies. L'objectif de cette étude ne peut donc pas être d'évaluer la fiabilité de la RAPL. Il s'agit plutôt de proposer des pistes de réflexions, de présenter une méthodologie générale d'analyse, de mettre en évidence un certain nombre points sur lesquels une vigilance sera nécessaire lors de la conception.

Dans un premier temps, les principes généraux relatifs à la sûreté de fonctionnement des systèmes sont très brièvement rappelés. Il ne s'agit pas ici de détailler l'ensemble des méthodes et concepts relatifs à la Sûreté de Fonctionnement mais uniquement les quelques notions nécessaires à la compréhension de l'étude effectuée par la suite. Dans une deuxième partie, nous nous intéressons à la SdF d'une fonction essentielle de la RAPL : l'estimation (ou la mesure) de l'interdistance. Une étude des causes de défaillance d'un capteur particulier : le radar, est proposée. La connaissance de

l'interdistance a elle seule ne suffit pas pour effectuer le suivi automatique de véhicules. L'estimation de l'interdistance n'est qu'un élément qui s'intègre dans un système plus complexe. Nous proposons dans une troisième partie une étude de SdF de la fonction "asservissement d'interdistance". Cette étude pourrait être prolongée en suivant la même méthodologie au système complet de contrôle longitudinal en tenant compte des actionneurs (Freins et Moteurs).

3 LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

3.1 Définition de la SdF

On trouve dans la littérature plusieurs définitions de la Sûreté de Fonctionnement (SdF). Ainsi, la SdF est définie dans [Villemeur 88] comme *l'aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données*.

Dans [Laprie 95], la définition suivante est donnée et concerne les systèmes informatiques : *La SdF d'un système est la propriété qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre*. Enfin dans [Zwingelstein 96], on trouve : *La sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des systèmes*.

3.2 Déclinaisons de la SdF

La sûreté de fonctionnement se décline en deux critères principaux : la disponibilité et la crédibilité.

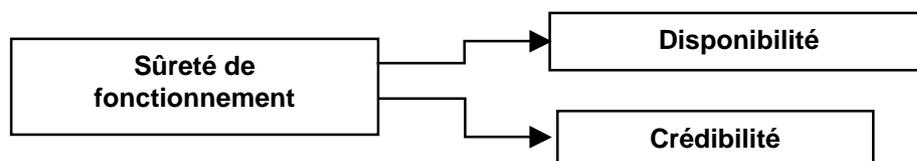


Figure 1 : critères principaux de la sûreté de fonctionnement

La *disponibilité* est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise [AFNOR X60-010]. Elle est exprimée par la probabilité de bon fonctionnement d'un dispositif à l'instant t. Elle est reliée à la fiabilité et à la maintenabilité.

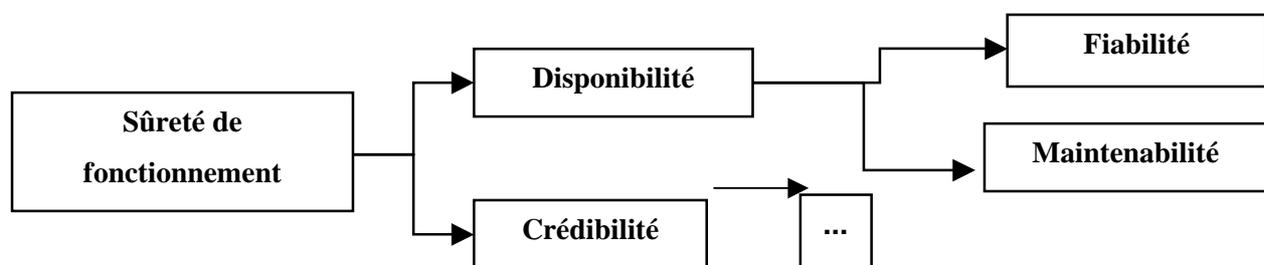


Figure 2 : Décomposition de la fonction "disponibilité"

La **fiabilité** est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée déterminée [AFNOR X60-500].

Différentes grandeurs permettent de caractériser la fiabilité d'une entité. Les plus classiques sont :

- • **La MTTF** (Mean Time To Failure) : durée moyenne jusqu'à défaillance de l'entité. Cette valeur est souvent assimilée à la durée moyenne entre deux défaillances consécutives (MTBF),
- • **Le taux de défaillance** : c'est la probabilité ramenée à l'unité de temps qu'une entité subisse une défaillance.

La connaissance de ces valeurs provient de sources bibliographiques, de recueil de données en exploitation, d'essais spécifiques ou d'évaluation par jugement d'experts.

La **maintenabilité** est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise [AFNOR X60-010].

Elle est caractérisée par la MTTR (Mean Time To Repair) : moyenne des Temps Techniques de Réparation.

Cette valeur peut être évaluée à partir de critère de maintenabilité, tels que :

- l'interchangeabilité, la normalisation des composants,
- la modularité de l'architecture,
- le type de technologie utilisée (classique ou non) et leur nombre
- les temps de localisation, de diagnostic, de dépannage,
- ...

La **crédibilité** est l'assurance fournie par le système de sa capacité à reconnaître et signaler son état (correct ou non) et à résister à des entrées non autorisées. Elle regroupe les notions d'intégrité et de sûreté.

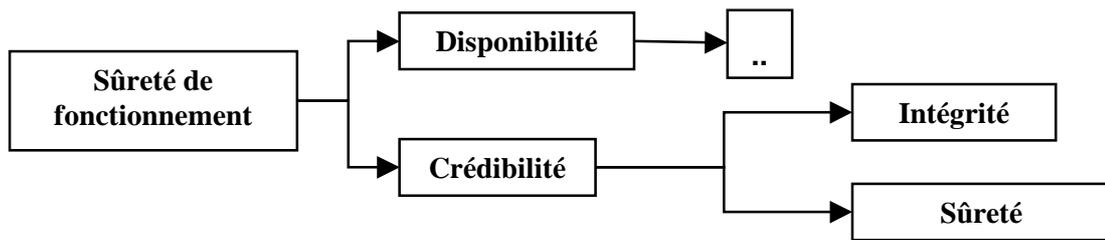


Figure 3 : Décomposition de la fonction "crédibilité"

L'*intégrité* est l'assurance fournie par le système de sa capacité à exécuter correctement ses tâches qui lui sont attribuées et à informer d'un quelconque de ses états pouvant conduire à une situation contraire.

La *sûreté* est l'assurance fournie par le système de sa capacité à refuser toute entrée non autorisée ou incorrecte et à pouvoir éventuellement en informer.

D'autres attributs sont également utilisés pour décrire la sûreté de fonctionnement en particulier pour des systèmes intégrant des logiciels, il s'agit de ceux relatifs à la sécurité.

3.3 Notions de sécurité

La *sécurité* est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques

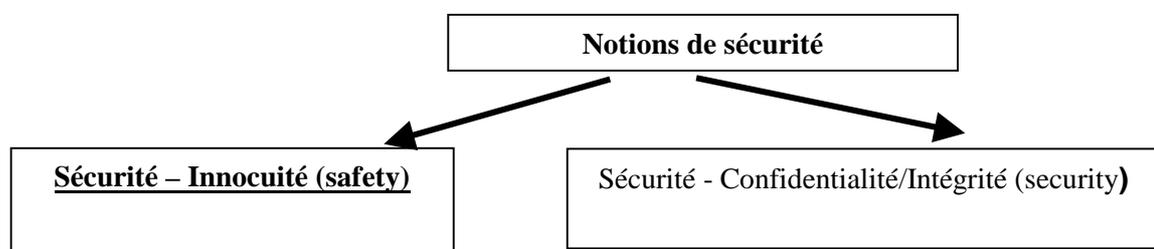


Figure 4 : Notion de sécurité"

Elle se décompose en :

Sécurité – Innocuité (safety)

C'est l'aptitude d'un dispositif à accomplir sa fonction, (à être mise au point, entretenue, démontée et mise au rebut) dans les conditions normales d'utilisation spécifiées dans la notice d'instructions sans causer de lésion ou d'atteinte à la santé.

Sécurité - Confidentialité/Intégrité (security)

La sécurité-intégrité est l'aptitude à prévenir l'occurrence d'altérations inappropriées de l'information.

La sécurité – confidentialité est l'aptitude à prévenir l'occurrence de divulgations non-autorisées de l'information

Dans la norme "IEC 61508, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems" [Norme IEC], relative à la sécurité fonctionnelle est introduite une démarche de conception de systèmes de manière à se prévenir de dangereuses défaillances ou de les contrôler le cas échéant. Pour chaque défaillance deux éléments sont déterminés :

- *Safety Function* : la fonction à réaliser pour se prévenir des risques au niveau matériel.
- *Safety Integrity* : le niveau de sécurité associé à la fonction.

La norme spécifie ainsi quatre niveaux de sécurité (*safety integrity level* : SIL 1 à SIL 4), le niveau 1 étant le plus bas. Elle détaille les contraintes nécessaires pour satisfaire ces différents niveaux de sécurité. Les contraintes seront d'autant plus rigoureuses que le niveau est élevé.

Niveau de sécurité intégrée (SIL)	Probabilité pour qu'une fonction accomplisse sa mission lors de la sollicitation -	Taux de défaillance maximum pour un mode continu de fonctionnement par heure	Type d'application
1 (blessure)	10^{-1}	10^{-5}	Tableau de supervision du trafic aérien
2	10^{-2}	10^{-6}	Système de contrôle intégré pour métro, Equipement électrique de stations de métro
3	10^{-3}	10^{-7}	Boîtier de sécurité pour centrale électrique
4 (mort)	10^{-4}	10^{-8}	Freinage d'urgence pour les trains

Figure 6 : Niveau de sécurité intégrée selon la norme IEC 61508

3.4 Quantification de la fiabilité d'un élément

La fiabilité $R(t)$ d'un élément est la probabilité que cet élément soit non défaillant sur la durée $[0, t[$, en supposant qu'elle n'est pas défaillante à l'instant $t=0$.

Deux lois sont classiquement utilisées pour modéliser la fiabilité $R(t)$:

La loi exponentielle pour laquelle on ne tient pas compte de l'usure (systèmes électroniques par ex). Dans ce cas, son seul paramètre est le taux de défaillance λ considéré constant. La loi s'écrit :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

La loi de Weibull permet de prendre en compte l'usure (systèmes mécaniques par ex). Elle fait intervenir 3 paramètres α , β et γ . Elle s'écrit :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2)$$

Quelle que soit la loi employée, la connaissance de l'évolution de $R(t)$ permet de calculer le taux de défaillance et le MTTF de l'entité ainsi modélisée :

$$\lambda(t) = \frac{-dR(t)/dt}{R(t)} \quad (3)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (4)$$

On montre facilement que

- Pour la loi exponentielle, on a : $MTTF_1 = 1/\lambda$
- Pour la loi de Weibull, on a $MTTF_2 = \gamma + \alpha \cdot \Gamma(1/\beta + 1)$

D'autres notions peuvent également être introduites:

- MTBF (Mean Time Between Failure) : temps moyen de fonctionnement entre deux défaillances consécutives.
- MTTR (Mean Time To Repair) : temps moyen pour une réparation
- MUT (Mean Up Time) : temps moyen de fonctionnement après réparation
- MDT (Mean Down Time) : Temps moyen d'indisponibilité : détection de la défaillance, réparation, redémarrage

La figure suivante situe ces différentes notions les unes par rapport aux autres.

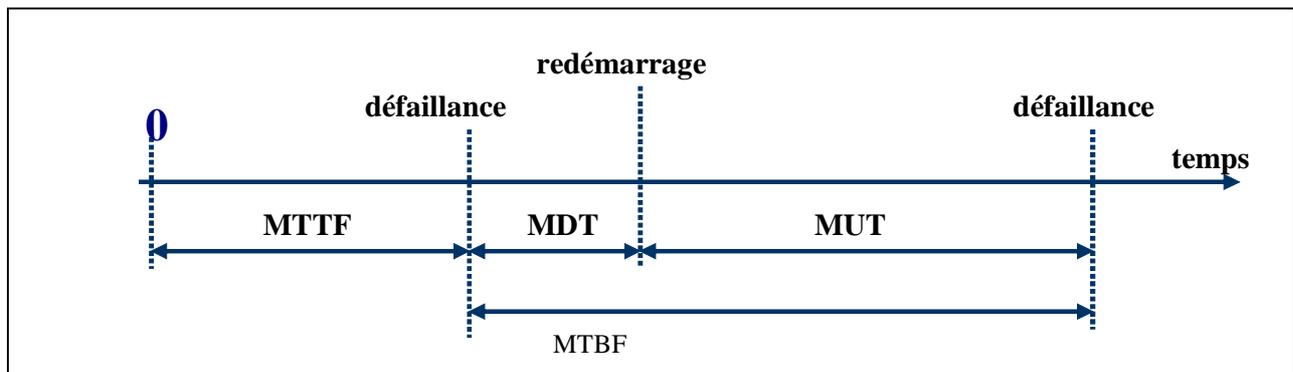


Figure 7 : relation entre paramètres MMTF, MDT, MUT, MTBF

Lors d'un remplacement à neuf, quand une défaillance survient, si on néglige le temps de maintenance, on a :

$$\text{MTTF} = \text{MTBF}$$

3.5 Etude de la fiabilité d'un système

L'étude de la fiabilité d'un système nécessite d'utiliser des outils et méthodes d'analyse. Celles-ci sont nombreuses et le choix de l'une d'entre elles dépend essentiellement des hypothèses employées et des objectifs à atteindre. Dans la suite de ce rapport, deux d'entre-elles seront utilisées:

- Les arbres de défaillances (Fault Tree) : il s'agit d'une représentation statique. Elle consiste à considérer une défaillance donnée du système et à construire d'une manière

arborescente descendante l'ensemble des combinaisons de défaillances des composants mis en jeu ou l'ensemble des causes de défaillances possibles. Les arbres de défaillance seront utilisés dans la suite de ce rapport pour caractériser les défaillances du radar.

- L'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité : AMDEC. Elle consiste à inventorier de manière qualitative les différents modes de défaillance de chaque composant, puis à estimer la gravité de leurs effets associés pour enfin effectuer une classification suivant une échelle en criticité. Une AMDEC sera construite dans la suite de ce rapport pour étudier les effets et la criticité (ou gravité) des défaillances survenant sur un élément du système d'asservissement de la distance inter-véhiculaire.

3.6 Détection et diagnostic des défaillances

Afin de maintenir un niveau de sécurité optimal même en présence de défaillance, un module de surveillance doit être implanté sur le système. Ce module doit permettre:

- la détection précoce des défaillances,
- la localisation du défaut c'est à dire l'identification du composant défaillant
- le diagnostic de la défaillance, c'est à dire la détermination précise des causes de cette défaillance.

Tout système de surveillance repose sur la redondance d'information. Cette redondance peut être physique (plusieurs éléments remplissent la même fonction) ou peut reposer sur une connaissance supplémentaire que l'on a du système : données statistiques, modèle analytique, domaines d'appartenance de certains paramètres, ...

L'implantation de cette couche logicielle de surveillance permet d'éviter les effets des défaillances en déterminant précocement les causes.

4 LA FONCTION "ESTIMATION D'INTERDISTANCE"

4.1 Différents niveaux d'automatisation

L'automatisation du pilotage d'un poids lourd peut être réalisée à différents niveaux. Ces niveaux relèvent d'un choix qui fixe les parts respectives dans l'activité de conduite entre le système automatique et le conducteur. Ainsi, on peut distinguer les solutions suivantes où l'automatisation prend une part croissante dans la fonction de pilotage :

1. Simple surveillance de l'interdistance
2. Maintien d'une interdistance minimale
3. Asservissement de l'interdistance ou pilotage longitudinal
4. Pilotage automatique complet (longitudinal et latéral)

1. Simple surveillance de l'interdistance

Ce système est le plus simple. Il ne fait que surveiller la distance avec le véhicule précédent. Lorsque que cette distance devient trop faible (limite variant avec la vitesse absolue du véhicule), le conducteur est averti par un signal (sonore, lumineux...).

2. maintien d'une interdistance minimale

Ce système est un premier pas vers une automatisation active. A la surveillance de l'interdistance, le système possède une capacité de freinage. Ainsi lorsque que la distance avec le véhicule précédent devient trop faible (valeur toujours liée à la vitesse absolue du véhicule, mais aussi à celle du véhicule précédent), le système intervient en diminuant la vitesse du véhicule (éventuellement par l'utilisation du frein moteur ou par l'actionnement des freins).

3. Asservissement de l'interdistance ou pilotage longitudinal

Ce système est une première forme de conduite semi-autonome. Le système de commande a ici en charge l'asservissement de l'interdistance. Le système possède des capacités d'accélération et de freinage, de sorte qu'il s'adapte à la vitesse du véhicule précédent afin de maintenir une distance minimale de sécurité. Le rôle du conducteur se limite à maintenir le véhicule dans sa voie en agissant uniquement sur la direction.

4. Pilotage automatique complet (longitudinal et latéral)

Ce système constitue une forme de conduite autonome. Au système précédent d'asservissement de l'interdistance, le système de commande a ici en charge le maintien du véhicule sur sa voie. Ainsi le système agit sur la direction et effectue un contrôle latéral du véhicule. Le conducteur est ainsi passif et n'intervient que lors de l'arrivée dans la voie ou de la sortie.

Les fonctions requises pour la mise en œuvre de ces différents niveaux d'automatisation peuvent être résumées dans la figure suivante :

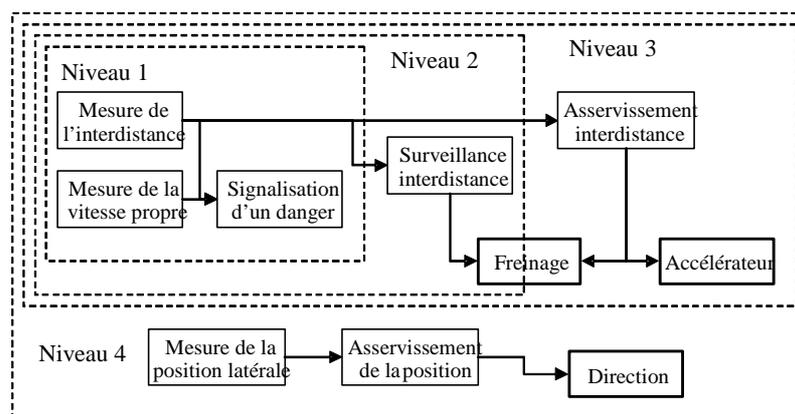


Figure 8 : Différents niveaux d'automatisation pour la fonction gestion de l'interdistance

On pourrait encore étendre le rôle du système de commande de sorte que le véhicule soit automatiquement piloté depuis son lieu de départ jusqu'à son lieu d'arrivée. Mais le nombre de paramètres à prendre en compte et la complexité du système à mettre en œuvre dépassent le cadre de cette étude.

4.2 Les différents capteurs d'interdistance

Chacun des niveaux d'automatisation nécessite une mesure de l'interdistance entre deux véhicules. Des capteurs passifs (récepteurs uniquement) ou actifs (émetteurs/récepteurs) existent. Les capteurs passifs sont typiquement des caméras (associées à un système de traitement d'image), les capteurs actifs sont les radars, les lidars ou les sonars. Certaines solutions (radars) sont d'ores et déjà commercialisées et intégrées dans les systèmes de régulation de vitesse adaptatifs : ACC : Adaptive (ou Autonomous) Cruise Control

D'autres solutions peuvent être envisagées en particulier l'utilisation des systèmes GPS ou la communication de données (odométriques ou vitesses) entre véhicules.

Certaines de ces solutions ont été étudiées et utilisées dans les projets CHAUFFEUR II [Chauffeur 2] et PATH [projet Path] avec pour objectifs le suivi automatique de véhicules ou la détection d'obstacles.

4.2.1 Les capteurs passifs

La caméra est un capteur permettant de mesurer un éclaircissement dans une direction donnée. Il existe plusieurs types de caméra : la caméra vidéo classique, la caméra IR (Infrarouge) la caméra CCD (Couple Charged Device ou Appareil à Transfert de Charge).

Associée à une mire (la plaque d'immatriculation par exemple), l'interdistance entre deux véhicules peut être déterminée par un traitement d'image adapté.

Dans le projet CHAUFFEUR II une caméra CCD associée à une mire infrarouge a été utilisée pour le contrôle latéral du véhicule suiveur:



Figure 9 : Mire infrarouge utilisée dans le projet Chauffeur 2

Les caméras sont aussi largement utilisées pour la détection d'obstacles fixes et la perception de l'environnement du véhicule (voir les projets CARSENSE (Sensing of CAR Environment at Low Speed Driving) et MICADO (Multi Instrumentation Capteurs pour la Détection d'Obstacle).

La qualité de l'information fournie par un système de vision dépend bien entendu de la qualité de la caméra mais aussi et surtout des algorithmes de traitement d'image utilisés. Il est donc impossible de donner des caractéristiques techniques générales (précision, fiabilité, ...)

4.2.2 Les capteurs actifs

Le radar est un dispositif formé d'un émetteur et d'un récepteur embarqué générant des ondes hyperfréquences ou des micro-ondes permettant ainsi la mesure de la distance latérale des véhicules ou encore la distance longitudinale, il consiste à émettre une onde électromagnétique dans une direction donnée et à détecter en retour cette onde réfléchiée par un obstacle.

Le radar est principalement utilisé pour le contrôle longitudinal. Ainsi les radars ont été intégrés dans les systèmes commercialisés d'anti-collision (Collision warning or avoidance) ou dans les systèmes ACC (Addaptive Cruise Control).

Il existe de nombreux types de radar. Ceux-ci diffèrent par la technologie utilisée. Les plus classiques sont :

- *le radar à impulsions,*
- *le radar à ondes entretenues et à modulation de fréquences FM-CW (Frequency Modulated Continuous Wave),*
- *le radar bimode,*

- ■ *le radar à corrélation.*
- ■ *le radar FSK (Frequency Shift Keying),*
- ■ *le radar classique pulse Doppler,*

Le radar utilisé dans le projet CHAUFFEUR II (voir photographie ci-dessous) fonctionne à 77GHz



Figure 10 : Radar utilisé dans le projet Chauffeur 2

Les performances des radars sont différentes suivant la technologie utilisée.

Pour fixer les idées, le radar utilisé dans le système ACC développé par la société Autocruise (TRW) a les spécifications suivantes :

- L'erreur de mesure est inférieure à 5 m, dans une gamme de distances comprise entre 30 et 150 m.
- La portée angulaire (angle de détection) est d'environ 11°,
- et la distance de détection supérieure à 150 m.
- La vitesse relative de détection (vitesse entre le radar et la cible) est de plus ou moins 180 km/h.
- De plus, les contraintes automobiles s'appliquent : **10 000 cycles on/off, 150 000 heures de fonctionnement continu** en particulier pour les camions, et des contraintes de corrosion.
- L'encombrement global du radar est inférieur à 200 cm³, pour un poids de l'ordre de 500 g.

Le Lidar (Laser Imaging Radars) est l'équivalent du radar pour la radiation optique. La portée des lasers est comprise entre 10m et 150m avec une erreur sur les données qui est proportionnelle à la distance mais aussi à l'angle d'incidence et à la nature de la surface visée (si la surface est sombre (noire) elle absorbe le rayon)

Le sonar (ou capteur à ultrasons) a un principe de fonctionnement quasi identique aux radars. La différence réside dans la nature de l'onde émise. Les sonars ont une courte portée ce qui a limité leur utilisation à l'évitement local d'obstacles (manœuvres de parking par exemple).

4.2.3 Communication inter-véhicules.

Un autre moyen de connaître la distance intervéhiculaire consiste à utiliser la communication entre les véhicules pour transmettre des données propres à chaque véhicule : distance parcourue (mesurée par odomètre) ou vitesse.

L'interdistance est alors obtenue par différence des distances propres ou intégration de la différence de vitesse.

La communication inter véhiculaire n'a pas toujours été utilisée dans les démonstrations de suivi de véhicules. Le système vidéo réalisé aujourd'hui sur les camions des projets Chauffeur I et II détecte un changement de vitesse du premier véhicule avec un retard de 80 msec. La communication est introduite dans le projet Chauffeur I puis chauffeur II pour une question de sécurité, en particulier lors d'un freinage brutal mais aussi pour avoir des informations supplémentaires, par exemple, sur l'angle de braquage du camion précédent doivent être transmises afin d'appréhender au mieux le profil de la route (et notamment les virages).

La communication est également utilisée pour un contrôle permanent du système. Les deux camions échangent constamment des messages sur leur état. Le moindre problème est alors immédiatement répercuté aux systèmes de contrôle des deux camions.

Dans le projet initial il était prévu d'utiliser des ondes radios de 5.8 Ghz. Le système radio consiste en un récepteur/émetteur pour chaque camion qui échangent des messages toutes les 10msec afin de s'assurer du bon fonctionnement du module de communication.

Pour assurer un minimum d'interférence entre les services et pour permettre d'obtenir un "lien" radio aussi robuste que possible il a été décidé d'utiliser la technologie Spread Spectrum. Cela permettra aussi des opérations futures sur un nombre plus élevé de camions et sur des convois faisant apparaître des interférences mutuelles.

La technologie de communication Spread Spectrum à l'origine développée par les militaires est une technique de transmission radio pour laquelle la FCC (Federal Communications Commission) a alloué, en 1985 aux USA, 3 fréquences : 902-928 MHz, 2400-2438.5 MHz et 5752.5-5850 MHz. En Europe, seules les bandes 2.4-2.4835 GHz et 5.725-5.850 GHz font l'objet de normalisation. En effet l'utilisation de la bande 902-928 MHz n'est pas autorisée du fait du recouvrement partiel de la bande GSM (890-915 MHz).

Cette technologie a une plus grande immunité en ce qui concerne les interférences et le bruit que les communications radios conventionnelles. De plus, un nombre important d'utilisateurs

peuvent utiliser la même fréquence sans occasionner aucune gêne. Ces règles sont bien entendues valables pour des communications à courte distance.

Spread Spectrum utilise une large bande et des signaux comparables à un bruit. En raison de ces signaux proches de bruits, ils sont très difficiles à détecter. Ces signaux sont aussi très difficiles à capter ou à démoduler. De plus ils sont aussi plus difficiles à brouiller et à pirater. Ces différentes caractéristiques sont les raisons pour lesquelles, la technologie Spread Spectrum a longtemps été une technologie militaire.

L'utilisation d'un codage de l'information spécial permet aux signaux spread spectrum de ressembler beaucoup plus à un bruit qu'à une réelle information. Et c'est d'ailleurs cette particularité qui fait que ces signaux sont si difficiles à pirater avec un matériel amateur. Par contre il faut s'assurer que les récepteurs et émetteurs ont la possibilité de recevoir des signaux à bande large.

4.3 Etude des causes de défaillance d'un capteur : le radar

A partir des études déjà menées dans ce domaine (Projet Path, projet chauffeur) et du document [Agogino and all., 98], nous pouvons établir les arbres de défaillance du radar.

Trois types de défaillances peuvent survenir sur un système physique tel le radar :

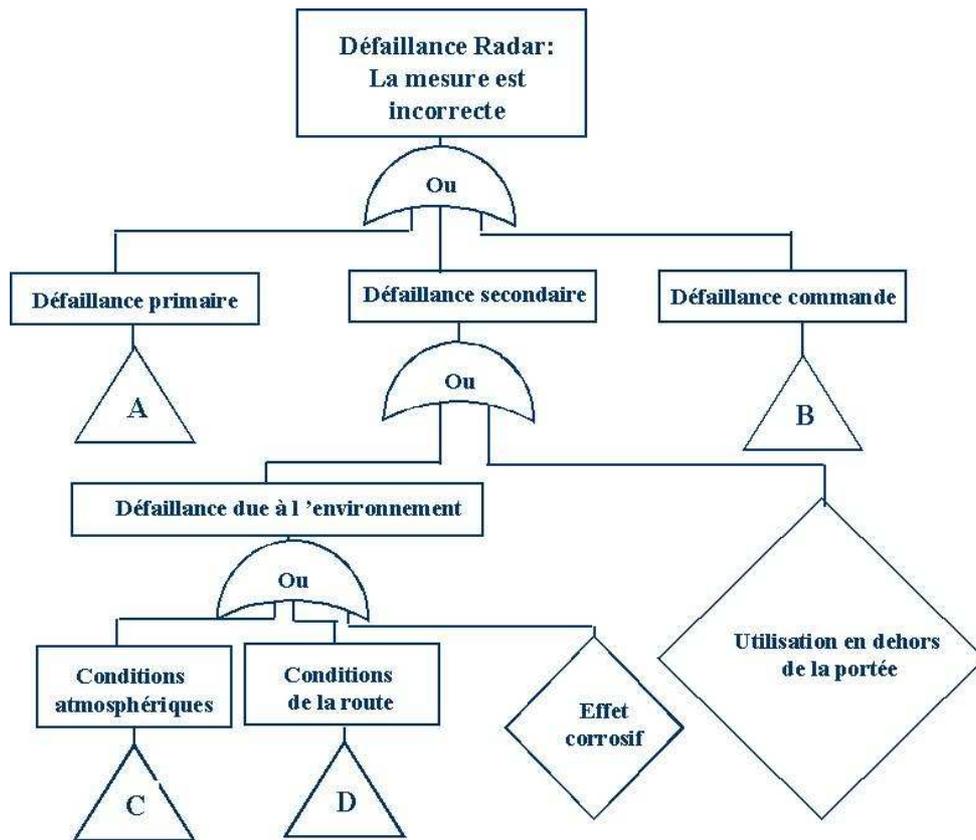
Les défaillances internes (ou défaillances primaires). Il s'agit pour le radar de défaillances de composants électroniques interne. Ces défaillances ont pour effet de bloquer la sortie du capteur (la mesure) à sa valeur maximale ou à sa valeur minimale.

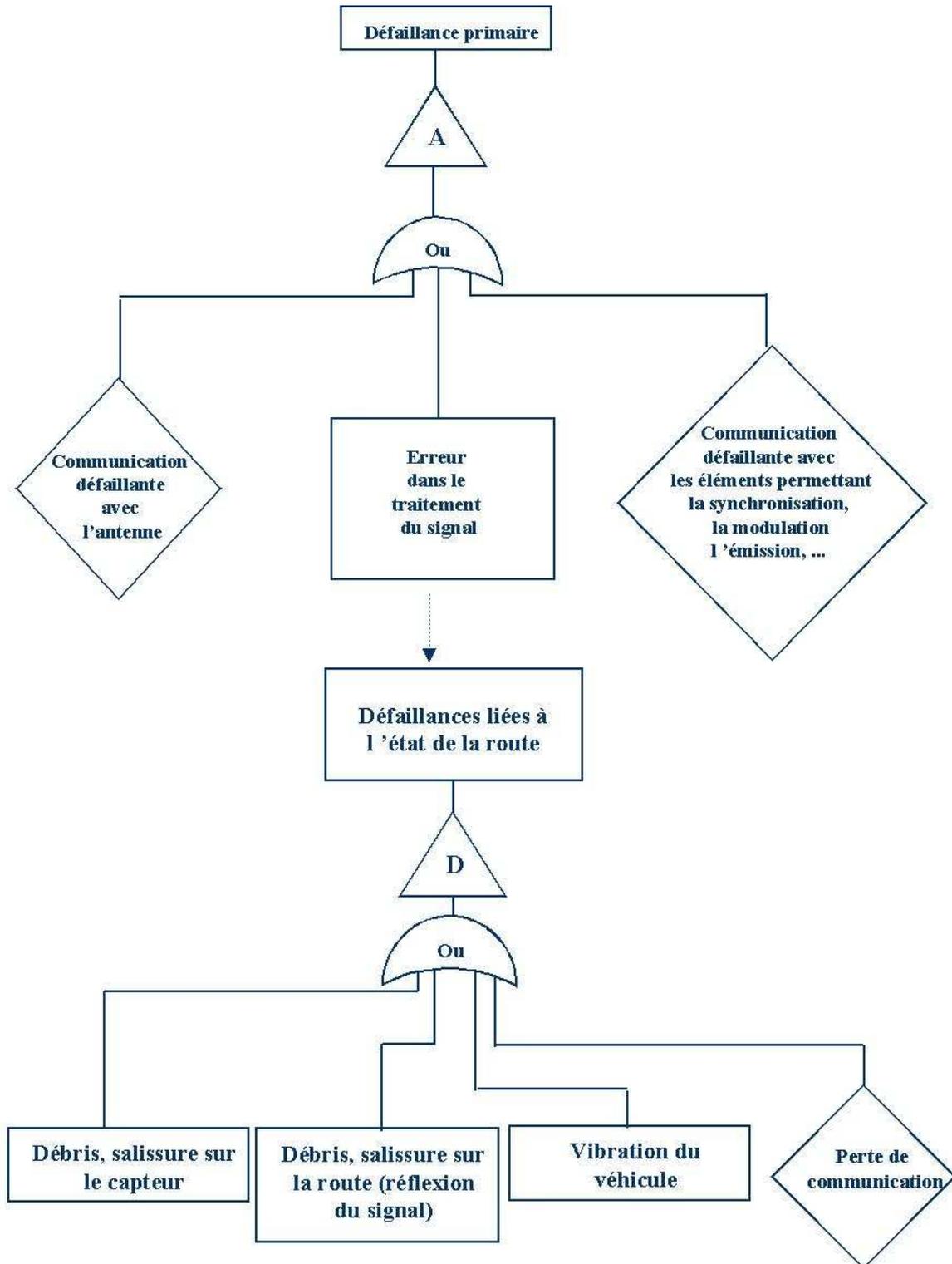
Les défaillances externes (ou défaillances secondaires) : Les conditions environnementales et climatiques peuvent venir perturber le comportement du radar. Suivant la perturbation, l'effet sur la valeur fournie par le radar, peut être différent.

Les défaillances de la commande : défaillances de l'alimentation, du système d'acquisition, de la communication.

Pour un événement redouté, les arbres de défaillance permettent de remonter à la cause de défaillance. Il s'agit d'une étude exhaustive qui est menée soit expérimentalement soit en utilisant les caractéristiques techniques du système.

Le premier arbre donne ainsi les trois causes de défaillance du radar. Les triangles A, B, C et D sont des renvois et indiquent qu'un arbre décrit ce type de défaillance plus en profondeur. Ces 4 arbres sont donnés ci-après. Un losange signifie que la cause de défaillance n'est pas détaillée par la suite (cas marginaux).





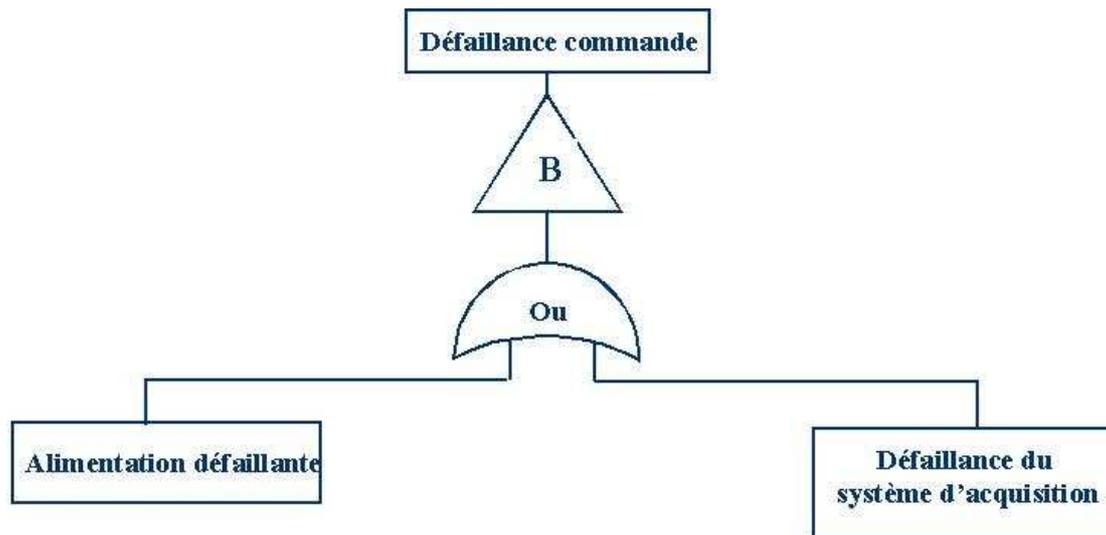


Figure 11 : Arbres de défaillance du radar

4.4 Etude des causes de défaillance de la communication

Le système de communication inter-véhiculaire permet l'échange d'information entre les véhicules par une liaison "sans fil". Chaque véhicule est équipé d'un module réalisant les fonctions de transmission et de réception d'information selon un protocole établi. Le lien entre deux systèmes peut être schématisé par :

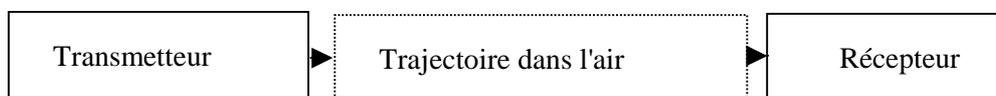


Figure 12 : modélisation du système de communication

Chaque élément est sujet à défaillance. Au niveau des modules de transmission et de réception, on dispose d'unités matérielles pour lesquelles on peut garantir une certaine fiabilité. Pour ce qui concerne la trajectoire dans l'air, celle-ci peut être perturbée par des interférences, ou obstruée. La probabilité de ces défaillances est liée à la distance qui sépare l'émetteur et le récepteur. Dans Chauffeur 1, les échanges d'information se faisaient à une fréquence importante de manière à palier les pertes d'informations.

En cas de défaillance de la fonction communication, il est nécessaire de se mettre en position de sécurité, celle-ci peut être différente selon le cas : la sécurité peut être obtenue en augmentant l'inter-distance et reprise en manuel, par exemple ou par arrêt du convoi si le second véhicule est en mode automatique. Par ailleurs, le système devra être capable de détecter cette défaillance (Fonction surveillance).

5 FIABILITE DE LA FONCTION D'ASSERVISSEMENT DE L'INTERDISTANCE

5.1 Estimation d'une valeur de fiabilité

Quel que soit le degré d'automatisation choisi, le système doit offrir une fiabilité équivalente à celle des autoroutes actuelles. Une connaissance préalable du risque de collision est nécessaire à la spécification de la sûreté de fonctionnement du système de pilotage.

On ne s'intéresse ici qu'à l'estimation du risque de collision longitudinale.

Les données considérées sont les suivantes :

De source [Rapport RAPL1] :

- il y a (N_a) 6291 accidents par an impliquant un poids lourd
- les poids lourds parcourent (D) $26,5 \cdot 10^9$ km/an
- il y a (N_v) 563 000 poids lourds en France soit 2,1% des véhicules

De l'observatoire de la sécurité routière :

- les collisions longitudinales de véhicules circulant dans le même sens représentent 54% des collisions

Enfin :

- On considère que la vitesse moyenne des poids lourds est de (V) 90 km/h

On en déduit :

- la durée cumulée de circulation des poids lourds est de ($T=D/V$) 296 106 h/an
- la distance moyenne parcourue est de ($d=D/N_v$) 47 069 km/an/véhicule
- la durée d'utilisation moyenne d'un poids lourd est de ($n_h=d/V$) 523 h/an/véhicule
- la durée d'utilisation cumulée est de ($N_h=n_h \cdot N_v$) 2,9 108 h/an
- le nombre de collisions longitudinales est de ($N_{cl}=54\% \cdot N_a$) 3400 coll./an
- le temps de bon fonctionnement (MTTF) est donc de 85 000 h
- le taux de collision longitudinale est de ($\lambda_a=N_{cl}/N_h$) $1,17 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

Ainsi, l'implantation d'un système automatique de pilotage ne doit pas engendrer un risque de collision supérieure à $1,17 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$.

5.2 Application à un système de surveillance de l'interdistance

De l'étude précédente, l'implantation d'un système de surveillance de l'interdistance devrait avoir une fiabilité de $1,17 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ (λ_a).

En reprenant le schéma fonctionnel précédent, le système est constitué de trois fonctions dont la défaillance d'une seule entraîne la défaillance de l'ensemble.

On peut donc en déduire que la fiabilité de chaque composant doit être 3 fois supérieure à $1,17 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ (λ_a), sous l'hypothèse d'avoir choisi des composants d'égale fiabilité.

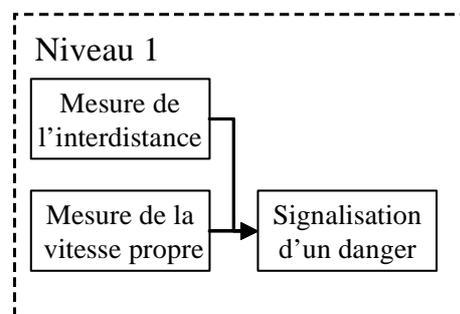


Figure 13 : Fonction interdistance de niveau 1

Ainsi la fiabilité de chaque élément dont le capteur d'interdistance doit être de :

$$\lambda_{c,1} = \lambda_a / 3 = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$$

Une façon d'amoinrir cette spécification de fiabilité consiste à redonder les éléments. Ainsi il pourrait être souhaitable de doubler le capteur de mesure de l'interdistance. On obtient alors un système équivalent au schéma ci-dessous :

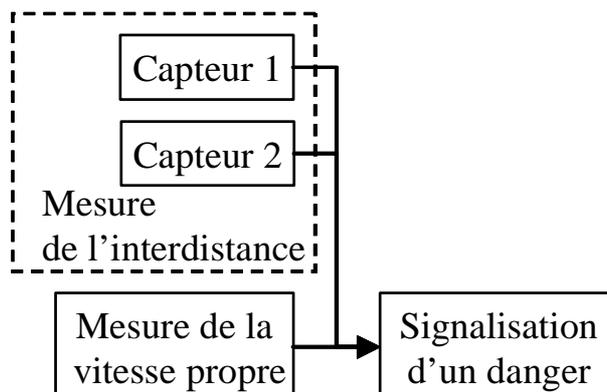


Figure 14 : Fonction interdistance intégrant une redondance de la mesure

Dans cette configuration, la mesure d'interdistance est défaillante uniquement si les deux capteurs sont défaillants. Avec cette redondance dite « active » où les deux composants fonctionnent parallèlement, le taux de l'ensemble n'est plus constant dans le temps. Sous l'hypothèse que les défaillances des capteurs sont indépendantes (pas de cause commune) et qu'ils sont identiques, la relation entre le taux de fiabilité du système et celui des capteurs est la suivante :

$$\lambda_s(t) = 2\lambda \frac{1 - e^{-\lambda t}}{2 - e^{-\lambda t}} \quad (5)$$

Par ailleurs, si l'on raisonne en terme de temps moyen de bon fonctionnement, on obtient :

$$MTTF_{\text{Système de mesure}} = \frac{3}{2} MTTF_{\text{capteur}} \quad (6)$$

L'évolution du taux de défaillance dans le temps nécessite de prendre en compte la période de maintenance (ou d'entretien) qui consiste à tester périodiquement les éléments et à remplacer ceux défectueux. Ainsi pour obtenir un taux moyen de défaillance égal à celui voulu de $\lambda_c = \lambda_a/3 = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, on obtient selon la période de maintenance :

période de maintenance	taux de défaillance requis d'un capteur	taux par rapport à un seul capteur
5000 km (\equiv 56h)	$2,7 \cdot 10^{-4}$	1 / 69
10000 km (\equiv 111h)	$1,9 \cdot 10^{-4}$	1 / 49
25000 km (\equiv 278h)	$1,2 \cdot 10^{-4}$	1 / 30
50000 km (\equiv 556h)	$8,6 \cdot 10^{-5}$	1 / 22

Tableau 1 : Taux de défaillance requis selon la période de maintenance pour avoir un $\lambda_c = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$

Cette politique de maintenance dite périodique peut éventuellement être remplacée par une maintenance conditionnelle. Dans ce cas un système de surveillance compare les signaux fournis par les deux capteurs et indique toute anomalie, généralement la panne d'un capteur. Dès lors c'est le choix du délai entre le signal d'anomalie et la remise en état qui détermine le taux de défaillance requis pour les capteurs.

délai avant réparation	taux de défaillance requis d'un capteur	taux par rapport à un seul capteur
100 km (\equiv 1,1h)	$4,0 \cdot 10^{-3}$	1 / 1000
1000 km (\equiv 11h)	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1 / 330
5000 km (\equiv 56h)	$5,8 \cdot 10^{-4}$	1 / 150

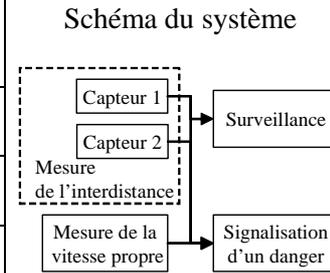


Tableau 2 : Taux de défaillance requis pour une maintenance conditionnelle pour avoir un $\lambda_c = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$

Nota :

1. Il est à noter que l'étude considère que l'on est constamment dans une situation à risque (un véhicule est devant avec une interdistance proche de la limite de sécurité). En fait, ce cas ne représente qu'une partie du temps de circulation du poids lourd.
2. La comparaison du taux de défaillance du système de surveillance avec le taux de risque de collision n'est pas particulièrement bien adaptée puisque le système de surveillance ne fait qu'avertir d'un risque et c'est au conducteur de réagir en conséquence et d'éviter la collision.
3. De nombreux autres paramètres mériteraient d'être pris en compte. Parmi eux, on pourra noter une possible hypovigilance du conducteur par un excès de confiance envers le système anticollision. Ceci entraîne un accroissement de la probabilité d'être dans une situation à risque, c'est-à-dire avec une interdistance trop faible.

5.3 Fiabilité du système d'asservissement de l'interdistance

Nous nous intéressons dans cette section au niveau 3 d'automatisation décrit précédemment. Le système peut être représenté par le schéma rappelé ci-dessous. Celui-ci fait apparaître 4 types d'éléments (ou systèmes) physiques:

- Le système de mesure d'interdistance,
- Le système de commande (réalisé à l'aide de calculateurs),
- Le système de mesure de la vitesse absolue du véhicule,
- Les organes d'actionnement sur le freinage et l'accélération.

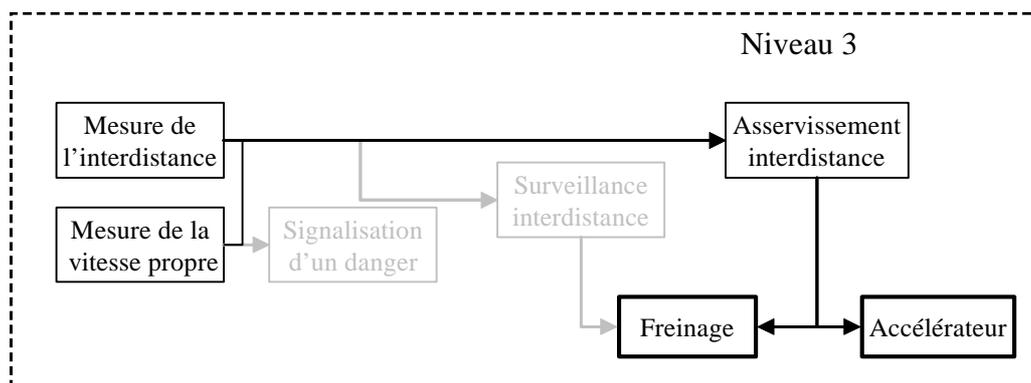


Figure 15 : Fonction interdistance de niveau 3

Une AMDEC simplifiée a été réalisée afin de mettre en évidence pour chacun des sous-systèmes les causes de défaillance et leur gravité vis-à-vis des conséquences sur le système.

Remarque : Nous nous intéressons uniquement à la fonction perception et asservissement de la fonction interdistance. Nous ne considérons pas ici l'ensemble complet de la boucle de contrôle longitudinal. Ainsi, les organes de freinage (plaquette, disques de frein...) et d'accélération (moteur, carburateur...) sont exclus puisque étant de la même nature que ceux utilisés lors du pilotage manuel, leur étude n'apporte rien à la comparaison entre pilotage automatique et manuel.

Fonction	Mode de défaillance	Effet	Gravité
Mesure de l'interdistance	- Pas de mesure (défaut alimentation, défaut interne)	Désarmement du système de commande (passage en manuel)	1
	- Mesure fausse mais panne détectée (pas diagnostiquée)		
	- Mesure fausse non détectée	Mauvais comportement, risque important de collision	3
Système de commande ou Asservissement de l'interdistance	- Arrêt ou mise en repli	Désarmement du système de commande (passage en manuel)	1
	- Comportement incohérent, défaillance non détectée	Risque de comportement très dangereux : accélération et freinage simultanés, ordre contraire à celui voulu, ...	4

Mesure de la vitesse propre	- Capteur déconnecté, non alimenté (panne totale détectée)	Désarmement du système de commande (passage en manuel) Eventuellement, passage dans un mode de fonctionnement différent (réduction de la vitesse, reconfiguration de la commande, ...)	1
	- Mesure fausse mais défaillance non détectée	Risque de vitesse excessive	2
Actionnement des freins	- Actionnement inopérant (faute détectable)	Emission d'une alarme (avertissement du conducteur), risque de collision en l'absence de réaction	2
	- Freinage intempestif (faute détectable)	Risque d'un comportement dangereux du véhicule	3
Actionnement de l'accélération	- Actionnement inopérant (faute détectable)	Désarmement du système de commande (passage en manuel)	1
	- Accélération intempestive (faute détectable)	Risque d'un comportement dangereux du véhicule, l'actionneur doit se désarmer	3

Tableau 3 : AMDEC simplifiée de la fonction interdistance de niveau 3

Dans cette table, la gravité de chaque incident a été estimée sur une échelle de 1 à 4 et exprime le risque que la situation considérée mène à un accident. La valeur 1 correspond à la plus faible probabilité (le conducteur est prévenu qu'un incident se produit et le système n'a pas un comportement dangereux), tandis que la valeur 4 correspond au risque le plus fort (le système se comporte d'une manière dangereuse et ne prévient pas le conducteur pour qu'il intervienne).

Dans le mode de fonctionnement considéré, le conducteur est à son poste et gère la position latérale du véhicule. On suppose donc qu'il est suffisamment attentif pour éventuellement pouvoir reprendre le contrôle, sous réserve que l'incident n'arrive pas de manière trop brusque et que le conducteur soit prévenu d'un désarmement du système automatique.

Dans ces circonstances et pour chaque valeur de l'échelle de gravité, un risque d'accident a été évalué. Il exprime la probabilité qu'un accident survienne pour chaque occurrence d'un incident de gravité fixé. Les valeurs suivantes ont été choisies (de manière arbitraire) :

Gravité	Risque d'accident
1	0.01%
2	1%
3	50%
4	80%

Tableau 4 : Relation entre Gravité – Risque d'accident

La probabilité d'avoir un accident est alors donnée par la relation suivante où λ_n représente la probabilité d'occurrence d'un incident de gravité n :

$$\lambda = \lambda_1 \times 0,01\% + \lambda_2 \times 1\% + \lambda_3 \times 50\% + \lambda_4 \times 80\% \quad (7)$$

De ceci, connaissant les taux de défaillance de chaque composant, on peut déduire celle du système complet :

Elément et mode de défaillance	t. de def.
Interdistance : défaillance détectée avec mise en repli	$\lambda_{inter,1}$
Interdistance : défaillance non détectée par le système	$\lambda_{inter,2}$
Syst. de commande : défaillance détectée avec mise en sécurité	$\lambda_{comm,1}$
Syst. de commande : défaillance non détectée avec un comportement hasardeux	$\lambda_{comm,2}$
Mesure vitesse : défaillance détectée	$\lambda_{mvit,1}$
Mesure vitesse : défaillance non détectée par le système	$\lambda_{mvit,2}$
Actionneur frein : demande d'actionnement inopérant	$\lambda_{frein,1}$
Actionneur frein : Actionnement intempestif	$\lambda_{frein,2}$
Actionneur accélérateur : demande d'actionnement inopérant	$\lambda_{accé,1}$
Actionneur accélérateur: Actionnement intempestif	$\lambda_{accé,2}$

Tableau 5 : Taux de défaillance des éléments du système

On obtient :

$$\lambda = (\lambda_{\text{inter},1} + \lambda_{\text{comm},1} + \lambda_{\text{mvit},1} + \lambda_{\text{accé},1}) \times 0,01\% + (\lambda_{\text{mvit},2} + \lambda_{\text{frein},1}) \times 1\% + (\lambda_{\text{inter},2} + \lambda_{\text{accé},2} + \lambda_{\text{frein},2}) \times 50\% + \lambda_{\text{comm},2} \times 80\% \quad (8)$$

Connaissant les taux de défaillances des divers éléments du système, la relation (8) permet de connaître le taux de défaillance du système global. Ans le cadre d'une réalisation, il sera nécessaire de vérifier que le choix des composants est tel, que ce taux est inférieur à la valeur actuelle qui est de $1,17 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$.

5.4 Implications sur la réalisation d'un asservissement de l'interdistance

De la représentation des fonctions principales du système d'asservissement, une représentation fonctionnelle plus détaillée (et très proche de son implémentation matérielle) peut être établie. Cet approfondissement a pour objet de montrer le niveau de sûreté requis par chaque composant du système en vu de sa réalisation.

L'échelle suivante est utilisée pour juger de la gravité de l'occurrence de chaque mode de défaillance :

- 1 : Désarmement du système suite à une défaillance, détecté presque immédiatement
- 2 : Désarmement du système suite à une défaillance, dont la détection est faite par un autre composant et pouvant nécessiter un certain délai entre l'instant de défaillance et sa détection.
- 3 : Désarmement du système suite à une défaillance dont la détection peut être tardive et pouvant éventuellement conduire à une situation dangereuse.
- 4 : Comportement très dangereux ayant une forte probabilité de conduire à une collision ou un accident

Mesure de l'interdistance :

Afin de fiabiliser la mesure d'interdistance, il est préférable d'employer une combinaison de systèmes de mesure redondants (la panne de l'un d'entre eux peut alors être compensée par un autre). Quelle que soit leur nature, trois grandes classes de chaîne de traitement peuvent être identifiées :

Cas 1 : Le sous-système est composé d'un capteur (par ex. un radar) et retransmet au travers d'un lien de communication la distance d'un objet face au véhicule.

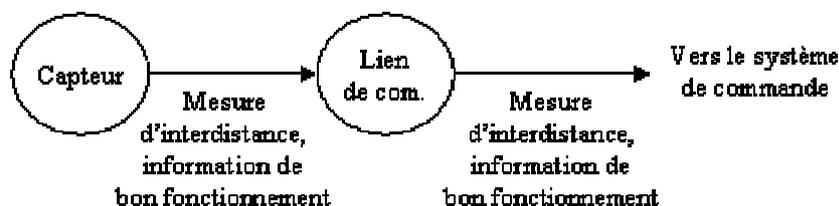


Figure 16 : Capteur + communication

Du point de vue sécurité, on déduit :

Elément	Mode de défaillance	Effet	Niveau SdF
Capteur	Absence de mesure avec ou sans signal de mauvais fonctionnement	Détection de l'absence de mesure entraînant le déclenchement d'une alarme et le désarmement du système	1 ou 2 selon signal de mauvais fonctionnement
	Emission d'une information fausse	Mauvais comportement du système d'asservissement, risque de collision	3
Lien de communication	Non retransmission de la mesure ou trop tardivement	Détection de l'absence de mesure entraînant le déclenchement d'une alarme et le désarmement du système	1
	Corruption de l'information (information délivrée fausse)	Mauvais comportement du système d'asservissement, risque de collision	3

Tableau 6 : AMDEC du système capteur + communication

Cas 2 : Le sous-système est composé d'un capteur (par ex. une caméra) fournissant un ensemble d'informations permettant l'évaluation d'une mesure d'interdistance. Un traitement de ces données est nécessaire et peut être fait localement au capteur ou par une unité distante (le calculateur de

l'asservissement d'interdistance). Selon le cas, un lien de communication est nécessaire soit entre le capteur et le calculateur soit entre l'unité de traitement locale au capteur et le calculateur d'asservissement.

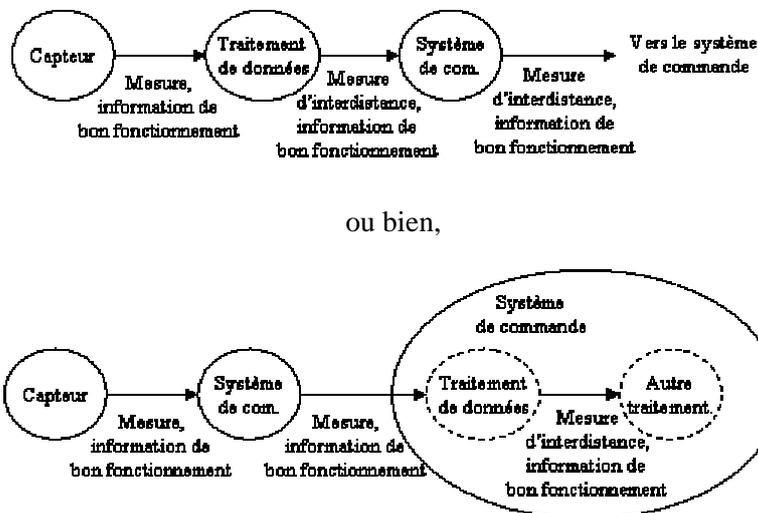


Figure 17 : Capteur + communication et traitement de l'information

Afin d'améliorer les performances du capteur, une partie active peut lui être associée. Ce peut être la motorisation de l'élément de mesure (direction de la caméra, direction du radar, zoom de la camera, direction du télémètre laser...). Les ordres de commande de cet élément sont évalués par le traitement de données. On obtient le schéma suivant :

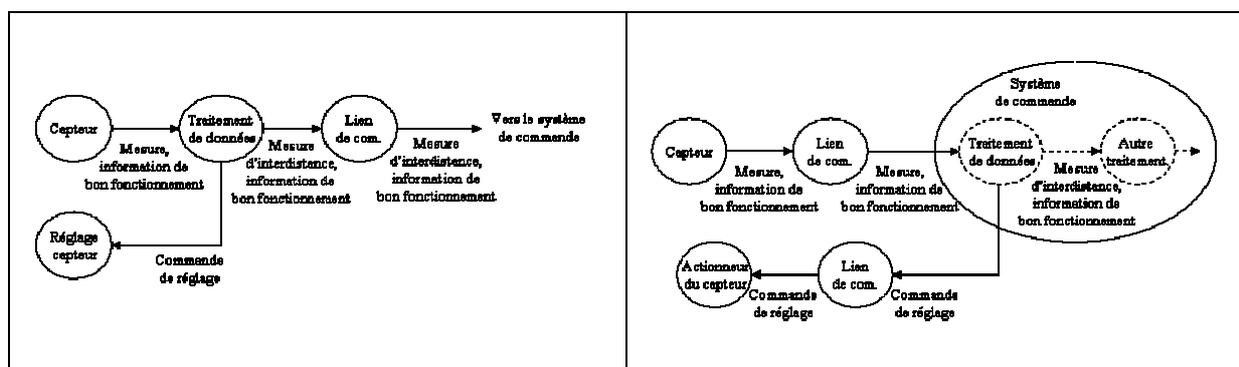


Figure 18 : Capteur + communication et traitement de l'information + réglage

Du point de vue sécurité, on déduit :

Elément	Mode de défaillance	Effet	Niveau SdF
Capteur	Absence de mesure avec ou sans signal de mauvais fonctionnement	Détection de l'absence de mesure entraînant le déclenchement d'une alarme et le désarmement du système	1 ou 2 selon signal de mauvais fonctionnement
	Emission d'une information ne permettant pas l'évaluation de l'interdistance	Le traitement de données doit détecter cette situation et déclencher une alarme	2
	Emission d'une information fausse	Mauvais comportement du système d'asservissement, risque de collision	3
Lien de communication	Non retransmission de la mesure ou trop tardivement	Détection de l'absence de mesure entraînant le déclenchement d'une alarme et le désarmement du système	1
	Corruption de l'information (information délivrée fausse)	Mauvais comportement du système d'asservissement, risque de collision	3
Unité de traitement	Incapacité à évaluer la mesure ou trop tardivement	Signalisation de l'absence de mesure entraînant le déclenchement d'une alarme et le désarmement du système	1
	Evaluation d'une mesure fausse ou incapacité à détecter une situation ne permettant pas la mesure	Mauvais comportement du système d'asservissement, risque de collision	3
Actionneur de réglage	Absence de réaction ou réaction incorrecte à celle demandée	Risque de rencontrer une situation ne permettant pas d'effectuer la mesure	2

Tableau 7 : AMDEC du capteur de mesure intégrant les fonctions de réglage, communication et traitement d'information

Cas 3 : Le sous-système est composé de plusieurs capteurs (par exemple deux caméras pour une vision stéréoscopique) dont la comparaison de leurs données produites permet l'évaluation de la mesure d'interdistance. Un traitement de ces données est nécessaire et est réalisé par une unité séparée (le calculateur de l'asservissement d'interdistance ou un calculateur spécialisé). Un lien de communication est nécessaire soit entre chaque capteur et le calculateur.

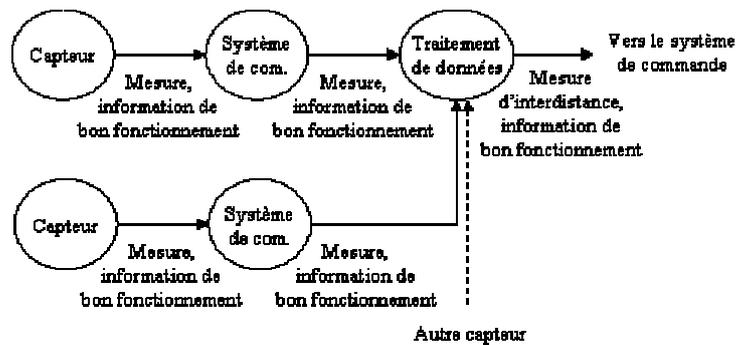


Figure 19 : système d'interdistance avec redondance de capteurs

Du point de vue sécurité, on a :

Elément	Mode de défaillance	Effet	Niveau SdF
Capteur	Absence de mesure avec ou sans signal de mauvais fonctionnement	Détection de l'absence de mesure entraînant le déclenchement d'une alarme et le désarmement du système	1 ou 2 selon signal de mauvais fonctionnement
	Emission d'une information ne permettant pas l'évaluation de l'interdistance	Le traitement de données doit détecter cette situation et déclencher une alarme	2
	Emission d'une information fausse	Mauvais comportement du système d'asservissement, risque de collision	3
Lien de communication	Non retransmission de la mesure ou trop tardivement	Détection de l'absence de mesure entraînant le déclenchement d'une alarme et le désarmement du système	1
	Corruption de l'information (information délivrée fausse)	Mauvais comportement du système d'asservissement, risque de collision	3

Unité de traitement	Incapacité à évaluer la mesure ou trop tardivement	Signalisation de l'absence de mesure entraînant le déclenchement d'une alarme et le désarmement du système	1
	Evaluation d'une mesure fausse ou incapacité à détecter une situation ne permettant pas la mesure	Mauvais comportement du système d'asservissement, risque de collision	3

Tableau 8 : AMDEC du système d'interdistance avec redondance de capteurs

Association de plusieurs systèmes de mesures

Afin de fiabiliser la mesure et de diminuer le risque de situation dangereuse, il est préférable d'employer plusieurs sous-systèmes. En effet, la comparaison des indications fournies par chacun d'eux permet en cas de désaccord de détecter une défaillance ou tout au moins une situation à risque. Par ailleurs, ces systèmes devraient être de technologie et de principe de fonctionnement différents de sorte à diminuer les risques d'erreur de mode commun, cas où le mécanisme de redondance est mis en échec.

Différentes structures sont possibles. Vu la nature et les contraintes du système, on optera pour la suivante :

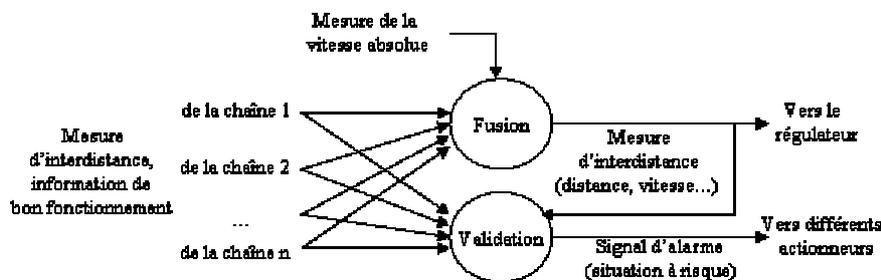


Figure 20 : Chaîne d'élaboration et de validation de l'interdistance

Le rôle de ces deux éléments est le suivant :

- "**Fusion**" : construire un ensemble de données sur l'interdistance (distance de l'objet, vitesse relative, vitesse absolue...) sur la base des différentes mesures reçues, des informations sur le bon fonctionnement de chaque chaîne de mesure et des capacités connues de chacune de ces chaînes (portée, précision...).

- "**Validation**" : déterminer si une situation à risque est rencontrée (incohérence des informations, ou informations trop peu nombreuses pour en déduire une mesure d'interdistance de qualité suffisante) sur la base des différentes mesures reçues, des informations sur le bon fonctionnement de chaque chaîne de mesure et des capacités connues de chacune de ces chaînes (portée, précision...)

Du point de vue sécurité, on déduit :

Elément	Mode de défaillance	Effet	Niveau SdF
Fusion	Absence d'évaluation d'une estimation de l'interdistance	Aucune estimation d'interdistance n'est générée, une alarme doit être déclenchée	1
	Emission d'une information incorrecte (ne correspondant pas aux mesures)	Le mécanisme de validation doit détecter cette incohérence et déclencher une alarme	3
Validation	Emission d'une alarme injustifiée	Désarmement du système, perte en terme disponibilité	1
	Non détection d'une situation de carence en mesures et en information	Risque d'une mesure imprécise de l'interdistance et de l'occurrence de situation à risque	3
	Non détection d'une situation d'incohérence des mesures	Risque d'utilisation d'une mesure incorrecte de l'interdistance et risque de collision	4

Tableau 9 : AMDEC des fonctions d'élaboration et de validation de l'interdistance

Mesure de la vitesse absolue :

La vitesse absolue (ou propre) est nécessaire au système d'asservissement de l'interdistance pour adapter la distance de sécurité selon la vitesse du convoi. Par ailleurs, elle permet de moduler les ordres d'accélération et/ou de freinage de sorte à éviter des accélérations ou des freinages trop ou pas assez forts. Enfin, cette information permet de valider le système en contrôlant que les ordres de d'accélération ou de freinage ont bien eut un effet.

Le même principe que pour la mesure de l'interdistance peut être employé.

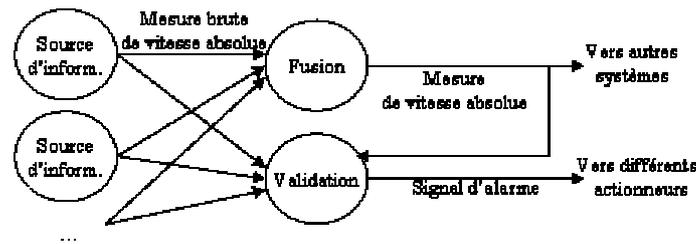


Figure 21 : Fonctions d'élaboration et de validation de la vitesse

Du point de vue sécurité, on déduit :

Elément	Mode de défaillance	Effet	Niveau SdF
Source d'information	Silence ou absence de mesure	Eventuellement émission d'un signal d'alarme ou poursuite avec d'autres mesures	1
	Mesure fausse	Le mécanisme de validation doit détecter cette incohérence et déclencher une alarme	2
Fusion	Emission d'une information incorrecte (ne correspondant pas aux mesures)	Le mécanisme de validation doit détecter cette incohérence et déclencher une alarme	2
Validation	Emission d'une alarme injustifiée	Désarmement du système, perte en terme de disponibilité	1
	Non détection d'une situation de carence en mesures et en information	Risque d'une mesure imprécise et de prendre une distance de sécurité inadéquate	2
	Non détection d'une situation d'incohérence des mesures	Risque d'utilisation d'une mesure fausse et de prendre une distance de sécurité trop faible avec une mise en danger du véhicule	2

Tableau 10 : AMDEC des fonctions d'élaboration et de validation de la vitesse

Evaluation de la commande :

Ce système détermine la commande à appliquer (quantité d'accélération ou de freinage à utiliser) selon la mesure d'interdistance, la mesure de vitesse absolue et d'informations sur les capacités du véhicule (puissance, capacité des freins, charge...).

Ce système se doit d'être sûr et de ne pas avoir un comportement susceptible de mener à une situation dangereuse. Sous cette contrainte, la structure suivante semble la plus adéquate :

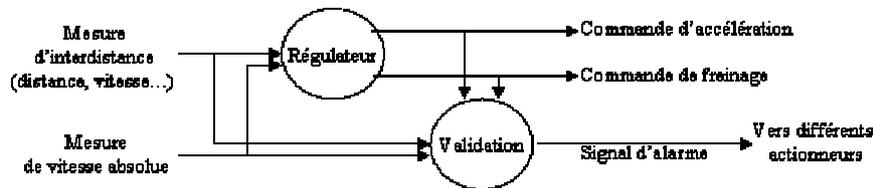


Figure 22 : Réalisation de la fonction commande

Du point de vue sécurité, on déduit :

Elément	Mode de défaillance	Effet	Niveau SdF
Régulateur	Mauvais réglage ou mauvaise connaissance des caractéristiques du véhicule	Risque d'un mauvais comportement du véhicule susceptible de mener à l'accident. Pour une part, le mécanisme de validation peut détecter cette situation	3
	Commande aberrante ou ne correspondant pas aux mesures	Le mécanisme de validation doit détecter ce dysfonctionnement et déclencher une alarme	3
Validation	Emission d'une alarme injustifiée	Désarmement du système, perte en terme de disponibilité	1
	Non détection d'une situation dangereuse (mauvaise commande, incohérente,...)	Mauvais comportement et mise en danger du véhicule, risque de collision	4

Tableau 11 : AMDEC de la fonction Commande

Actionneurs (accélérateur et frein) :

Ce système applique la commande évaluée par les calculateurs sur les organes mécaniques.

Une de leurs caractéristiques est de pouvoir se désarmer au moindre signal d'alarme (ou à la perte d'alimentation). Ainsi la technologie employée doit faciliter la mise en repli de l'actionneur.

Dans le contexte présent, la structure d'un actionneur peut être la suivante :

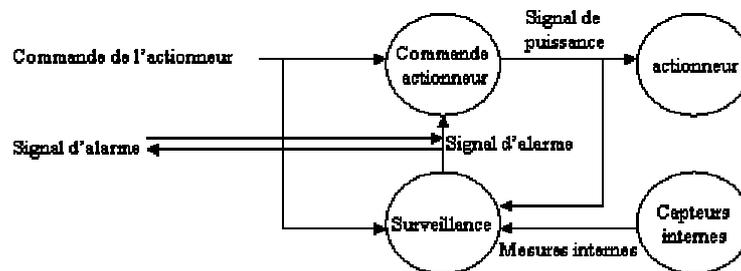


Figure 23: Fonctions de l'actionneur (frein ou accélération)

Elle se compose :

- d'une conversion de la commande en signal de puissance (commande actionneur) susceptible d'être inactivé par un signal d'alarme,
- d'une conversion le signal de puissance en puissance mécanique réalisée par l'actionneur proprement dit,
- de capteurs internes chargés de surveiller la partie mécanique de l'actionneur,
- d'un système de surveillance, destiné à détecter et à signaler tout comportement anormale et/ou ne correspondant pas à la commande reçue.

Du point de vue sécurité, on déduit :

Elément	Mode de défaillance	Effet	Niveau SdF
Commande Actionneur	Absence de signal de puissance produit	Désarmement de l'actionneur, et indirectement émission d'une alarme par la surveillance	1
	Signal de puissance ne correspondant pas à la commande reçue	Mauvais comportement de l'actionneur ; la surveillance doit alors désarmer l'actionneur	2
	Non prise en compte d'un ordre d'arrêt (commande ou alarme)	Mauvais comportement et mise en danger du véhicule, risque de collision	4
Actionneur	Mise en repli (ou au repos) intempestive	Désarmement de l'actionneur, et indirectement émission d'une alarme par la surveillance	1
	Gèle dans une position active	Mauvais comportement de l'actionneur et du véhicule. Emission d'une alarme par la surveillance mais éventuellement sans effet	4
Capteurs internes	Mauvaise mesure ou absence de mesure	Détection de la défaillance par la surveillance avec désarmement du système suite à une alarme	2
Surveillance	Emission d'une alarme injustifiée	Désarmement du système, perte en terme de disponibilité	1
	Non détection d'une situation dangereuse	Mauvais comportement de l'actionneur et risque de mise en danger du véhicule	4

Tableau 12 : AMDEC des fonctions actionneur (frein ou accélération)

Synthèse

En conclusion, un système d'asservissement de l'interdistance susceptible de répondre aux contraintes sécuritaires souhaitées pourrait avoir la structure suivante :

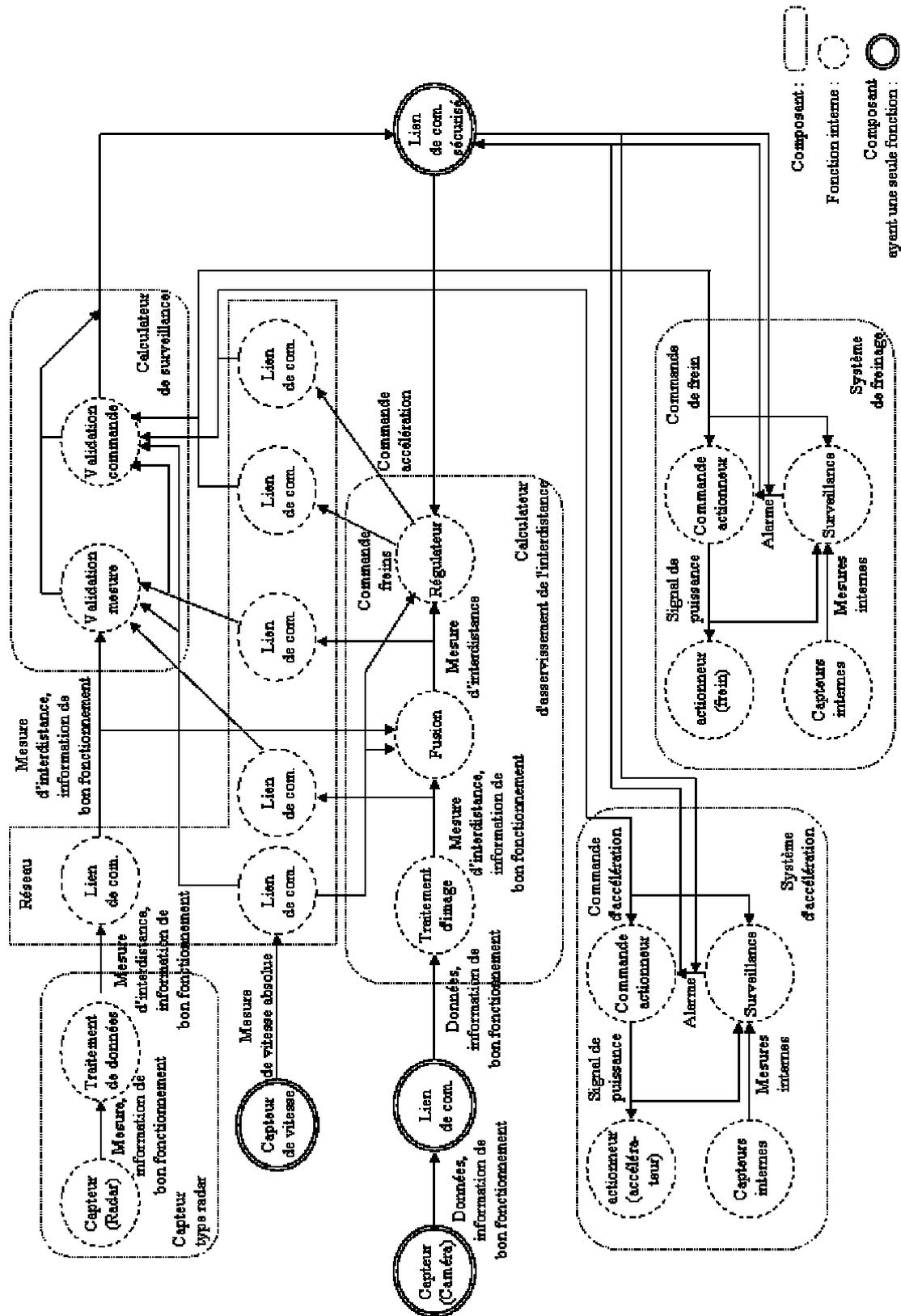


Figure 24 : architecture globale de la fonction de gestion de l'interdistance

Un tel système se composerait des éléments suivants :

- un capteur actif de distance (radar, télémètre...)
- un capteur passif de distance (caméra)
- un éventuel lien de communication spécialisé entre un capteur et le calculateur, dans le cas de traitement déporté et de transmission de données particulières (ex. : flux vidéo entre une caméra et le calculateur)
- un calculateur d'asservissement d'interdistance, chargé d'évaluer la commande selon les mesures recueillies,
- un calculateur de surveillance, chargé de signaler toute anomalie quand à la mesure et aux traitements des données d'interdistance,
- un actionneur pour l'accélération, chargé de moduler la puissance du moteur
- un actionneur de freinage, chargé de moduler le freinage
- un capteur de vitesse absolue, dont l'information fournie sert entre autre à fixer la distance de sécurité, à valider l'effet du freinage ou de l'accélération
- un réseau de communication, chargé de diffuser l'information entre ces différents éléments
- un réseau de sécurité, chargé de diffuser tout signal d'alarme (détection d'une anomalie, même concernant lui-même) à l'ensemble du système.

D'un point de vue sûreté de fonctionnement, ce système présente les caractéristiques suivantes :

- il suffit d'un seul composant en panne pour que le système ne puisse pas être utilisé. La surveillance renforcée au sein de cet ensemble n'autorise pas son utilisation en présence d'une panne. Cette caractéristique nuit fortement à la disponibilité du système, mais la conduite manuelle et traditionnelle permet cependant au véhicule d'être toujours utilisable.
- lors de l'utilisation du système, il faut au moins la défaillance presque simultanée de 2 composants pour que le système mène à une situation à risque, c'est-à-dire à un comportement dangereux sans avertissement du chauffeur de cette situation. Cette caractéristique permet d'assurer une forte sécurité au système.

6 AMELIORATION DE LA SECURITE

L'étude des causes de défaillances effectuée grâce aux arbres des défaillances et l'analyse de risques (criticité) permet de mettre en évidence certaines défaillances ayant un impacte considérable sur la sécurité du système. Un effort important doit être fait afin de réduire au maximum ces causes de défaillances. Le choix des composants est alors crucial. Ceci entraînera bien entendu un surcoût pour l'installation. Afin de réduire, voire annuler l'effet de ces défaillances un module de surveillance doit être implanté. Le rôle de celui-ci est de détecter précocement toute anomalie de fonctionnement et si possible de diagnostiquer la cause précise de ce dysfonctionnement. Les techniques de surveillance reposent toutes sur la redondance d'information. La technique la plus simple consiste à utiliser une redondance d'équipement : capteurs par exemple. Ces équipements peuvent être de même technologie ou de technologie différente. Pour la mesure de la distance intervéhiculaire, il peut être envisagé d'utiliser par exemple un (ou plusieurs) radar, un (ou plusieurs) lidar, une (ou plusieurs) caméra embarquée. Afin d'éviter les défaillances de mode commun, une redondance d'équipements de technologie différente peut être un critère de choix important mais des critères de coût ou des contraintes techniques interviennent aussi pour le choix des équipements.

La redondance peut aussi être analytique. Lorsqu'un modèle du système est connu, il est possible de construire des estimateurs ou des observateurs permettant de reconstruire la valeur d'une variable en utilisant les informations délivrées par des capteurs non dédiés à cette tâche. On parle alors de capteurs logiciels.

Par exemple, connaissant le modèle cinématique de suivi de deux véhicules (voir Ndoudi-Likoho 1997) et connaissant les angles de roues, les angles de lacet, les angles de direction ainsi que les vitesses des 2 véhicules, il est possible de construire un observateur (capteur logiciel) permettant d'estimer la distance intervéhiculaire.

Le système considéré permettant l'estimation (ou l'asservissement) de la distance intervéhiculaire est un système multicapteur. Certains sous-ensembles de capteurs permettent de réaliser l'estimation avec la précision souhaitée. Ces sous-ensembles de capteurs sont appelés SECR : Sous-ensembles de capteurs redondants. Un cas particulier de SECR concerne les Sous-Ensembles de Capteurs Minimaux (SECM). Ceux-ci ont pour particularité de permettre l'estimation de l'interdistance mais de ne plus le permettre si un seul capteur est perdu (non utilisable car défaillant).

A partir des algorithmes de surveillance, il est nécessaire de définir des modes dégradés, qui déterminent l'action à entreprendre compte tenu d'une défaillance, soit pour poursuivre la mission, si c'est possible, soit pour mettre le système en sécurité.

7 CONCLUSIONS

Cette présentation n'aborde qu'un aspect de la sécurité, celui lié à l'équipement des véhicules. La sécurité doit aussi prendre en compte l'environnement du système, à savoir l'influence du trafic et celle de l'environnement (CF rapport intermédiaire 1, Etude d'E. Lemaire).

Nous avons montré à partir de l'exemple du radar, une analyse des défaillances. Elle devra être faite dans la globalité en prenant en compte les défaillances de l'électronique et de la communication. Les algorithmes de surveillance permettent de détecter et isoler certaines défaillances. Les résultats sont utilisés pour définir les actions à mettre en œuvre pour poursuivre la mission ou pour atteindre une position de sécurité.

8 BIBLIOGRAPHIE

[Villemeur 88] VILLEMEUR A., *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels:Fiabilité-Facteurs humains-Informatisation*, Editions Eyrolles, 1988.

[Laprie 95] LAPRIE J.-C. & al., *Guide de la sûreté de fonctionnement*, éditions Cepadues, 1995

[Zwingelstein 96] D. Zwingelstein, Diagnostic des défaillances, Théorie et Pratique pour les systèmes industriels, Hermès, Paris, 1996.

[AFNOR X60-010]

[AFNOR X60-500] Norme AFNOR X60-500, "Terminologie relative à la Fiabilité - Maintenabilité - Disponibilité", 1988.

[RAPL rapport 1] Rapport intermédiaire RAPL, Février 2003.

[Norme IEC 61508] , Norme sur la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques / électroniques / électroniques programmables relatifs à la sûreté (Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related-systems) (7 tomes) 1997 - 2000:

[Chauffeur 2] http://www.cordis.lu/telematics/tap_transport/research/projects/chauffeur.html

[Rapport PATH] <http://www.path.berkeley.edu/>

[Agogino and all., 98]. A. Agogino, S. Chao, K. Goebel, S. Alag, B. Cammon, J. Wang, "Intelligent Diagnosis Based on Validated and Fused Data for Reliability and Safety Enhancement of Automated Vehicles in an IVHS", *University of California, Berkeley*, California PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-98-17

SYSTEME DE PREDICTION DE PANNES DE CAPTEURS DE CAMIONS EN CONVOIS

1 RESUME

L'objectif des travaux présentés est d'augmenter la sécurité d'un système par l'ajout d'une connaissance qui permet de prédire les anomalies de ses capteurs. Le comportement d'un système est généralement observé par un ensemble d'instruments de mesures. L'information de prédiction sera calculée directement à partir d'un traitement temps-réel des signaux de mesures. Cette information de prédiction permet au système de commande de faire de l'anticipation pour l'application de procédures d'urgences afin que le système reste dans un état fonctionnel sûr. Pour élaborer cette information de prédiction, le principe que nous utilisons est basé sur une extrapolation dans le temps d'un modèle de tendance obtenu par une régression linéaire. Une approche par intervalles est utilisée pour l'estimation des coefficients de la régression. L'information de prédiction délivrée par cette approche représente la durée qui reste au système pour qu'il sorte de son état de fonctionnement nominal. Cette prédiction permet aussi d'évaluer les performances temporelles de la reconfiguration du système dans le cas où ses capacités temporelles de réaction sont connues.

Le système de prédiction que nous développons est destiné à être utilisé dans le suivi automatique de véhicules. Il s'agit de surveiller le signal de mesure de la distance inter-véhiculaire. Parmi les spécifications fonctionnelles du système de suivi, un écart constant doit toujours être maintenu entre les véhicules. Ceci implique que le signal de mesure de la distance inter-véhiculaire peut être considéré comme un signal constant auquel sont superposés des bruits de mesures, et que ce signal ne doit comporter des sauts ou des pics que dans le cas où une défaillance surgit dans le système de mesures. Pour élaborer la prédiction, une modélisation linéaire de la tendance de ce signal est donc suffisante. Ce choix est justifié par la nature du signal traité, et aussi par la simplicité du modèle linéaire et par la facilité de son implémentation algorithmique pour des objectifs temps-réel.

Dans un système d'instrumentation, il existe deux types de connaissances qui appartiennent à deux niveaux d'abstraction différents. Le premier niveau est purement technologique. Il est obtenu à partir des propriétés physiques des capteurs telles que la sensibilité aux bruits, la précision...etc. Ces paramètres sont indépendants de l'application dans laquelle le capteur sera fonctionnel. Leurs variations sont seulement dues aux dérives dans le temps causées par le vieillissement des composants. Le deuxième niveau de connaissance est de type fonctionnel. Ce niveau est lié directement à l'application pour laquelle le capteur est installé. Cette connaissance est souvent fournie sous forme de contraintes d'inégalités qui décrivent le fonctionnement normal du système.

Nous commençons par présenter l'environnement dans lequel le système de prédiction sera installé. Ensuite nous donnons une description de l'approche de prédiction par intervalles. Nous terminons par une simulation de cette méthode.

2 INTRODUCTION

L'objectif des travaux présentés est d'augmenter la sécurité d'un système par l'ajout d'une connaissance qui permet de prédire les anomalies de ses capteurs. Le comportement d'un système est généralement observé par un ensemble d'instruments de mesures. L'information de prédiction sera calculée directement à partir d'un traitement temps-réel des signaux de mesures. Cette information de prédiction permet au système de commande de faire de l'anticipation pour l'application de procédures

d'urgences afin que le système reste dans un état fonctionnel sûr. Pour élaborer cette information de prédiction, le principe que nous utilisons est basé sur une extrapolation dans le temps d'un modèle de tendance obtenu par une régression linéaire. Une approche par intervalles est utilisée pour l'estimation des coefficients de la régression. L'information de prédiction délivrée par cette approche représente la durée qui reste au système pour qu'il sorte de son état de fonctionnement nominal. Cette prédiction permet aussi d'évaluer les performances temporelles de la reconfiguration du système dans le cas où ses capacités temporelles de réaction sont connues.

Nous commençons par présenter l'environnement dans lequel le système de prédiction sera installé. Ensuite nous donnons une description de l'approche de prédiction par intervalles. Nous terminons par une simulation de cette méthode.

3 ENVIRONNEMENT ET OBJECTIF DU SYSTEME DE PREDICTION

Le système de prédiction que nous développons est destiné à être utilisé dans le suivi automatique de véhicules. Il s'agit de surveiller le signal de mesure de la distance inter-véhiculaire. Parmi les spécifications fonctionnelles du système de suivi, un écart constant doit toujours être maintenu entre les véhicules. Ceci implique que le signal de mesure de la distance inter-véhiculaire peut être considéré comme un signal constant auquel sont superposés des bruits de mesures, et que ce signal ne doit comporter des sauts ou des pics que dans le cas où une défaillance surgit dans le système de mesures. Pour élaborer la prédiction, une modélisation linéaire de la tendance de ce signal est donc suffisante. Ce choix est justifié par la nature du signal traité, et aussi par la simplicité du modèle linéaire et par la facilité de son implémentation algorithmique pour des objectifs temps-réel.

Dans un système d'instrumentation, il existe deux types de connaissances qui appartiennent à deux niveaux d'abstraction différents. Le premier niveau est purement technologique. Il est obtenu à partir des propriétés physiques des capteurs telles que la sensibilité aux bruits, la précision...etc. Ces paramètres sont indépendants de l'application dans laquelle le capteur sera fonctionnel. Leurs variations sont seulement dues aux dérives dans le temps causées par le vieillissement des composants. Le deuxième niveau de connaissance est de type fonctionnel. Ce niveau est lié directement à l'application pour laquelle le capteur est installé. Cette connaissance est souvent fournie sous forme de contraintes d'inégalités qui décrivent le fonctionnement normal du système.

Dans le but de réaliser le système de prédiction qui sera appliqué au système de suivi de véhicules, nous allons exploiter ces deux niveaux de connaissances. Le premier niveau correspond à la précision des capteurs qui délivrent la distance inter-véhiculaire, leurs sensibilités aux bruits et leurs variances. Par contre, en ce qui concerne le deuxième niveau, nous exploiterons deux contraintes fonctionnelles. La première contrainte exprime le fait que l'espacement entre deux véhicules doit être toujours supérieur à un certain seuil minimal pour éviter les collisions. La deuxième contrainte est que cet espacement doit être toujours inférieur à une certaine limite maximale de sorte que le véhicule suiveur ne décroche pas du convoi.

La figure 1 montre le positionnement du système de prédiction dans l'application du suivi automatique de véhicules. L'information délivrée par ce système de prédiction servira à générer une alarme après une phase de décision. Cette alarme signale soit une collision très probable, soit un décrochage fort probable. L'alarme sera suivie par un changement de mode de fonctionnement du système, soit en imposant une procédure d'urgence dans le cas où le contrôle automatique du système est toujours possible, soit en passant à une conduite manuelle du véhicule suiveur.

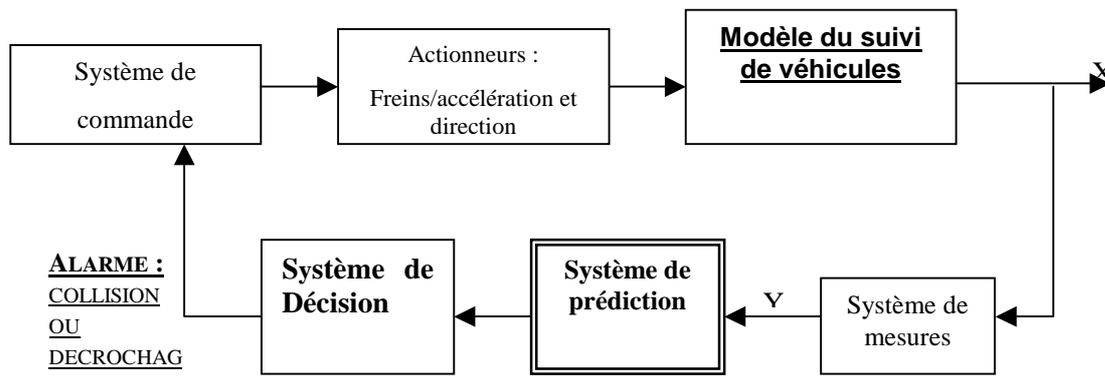


Figure 1 : Application du système de prédiction dans le suivi automatique de véhicules

Nous introduisons le principe de l'approche de prédiction que nous avons développée. Durant le fonctionnement normal du système de suivi, l'espacement inter-véhiculaire est obtenu par une camera, un télémètre laser et analytiquement en prenant en considération la cinématique du système de suivi, c'est à dire par la théorie des observateurs. Nous allons traiter en temps-réel ce signal de mesure en tenant compte de ses paramètres, notamment, sa précision et sa sensibilité. Nous considérons que ce signal est une suite d'observations quantifiées et ordonnées dans le temps. L'approche de prédiction consiste donc à déterminer la tendance de ce signal qui pourrait nous fournir une connaissance sur l'évolution du signal dans le futur, et ainsi prédire l'instant de dysfonctionnement du système.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons l'approche de prédiction que nous avons développée pour réaliser le système de prédiction destiné au système de suivi automatique de véhicules routiers.

4 LE SYSTEME DE PREDICTION

L'objectif est de présenter une solution théorique à un problème de prédiction qui concerne en particulier : le suivi automatique de véhicules sur autoroutes. Nous considérons seulement les signaux de mesure de la distance entre les véhicules. L'idée est de déterminer, à chaque instant, la tendance d'un signal de mesure à partir de la régression linéaire d'un certain nombre de ses échantillons. Il s'agit d'une régression linéaire d'une fenêtre d'échantillons de taille fixe et glissante dans l'axe du temps. Une fois que la régression est élaborée, on fait une extrapolation de cette droite de régression jusqu'à son intersection avec un des seuils du domaine qui décrit le bon fonctionnement du système. Cette opération permet de calculer la durée passée entre l'instant d'élaboration de cette droite et l'instant de son intersection avec un des deux seuils. Cette durée représente en effet le temps qui reste au signal pour déborder un des seuils, s'il garde le même comportement.

Dans le but d'arriver à cet objectif, nous modélisons la tendance du signal de la mesure de distance entre les véhicules. Ceci consiste à déterminer une relation qui décrit l'évolution de ce signal en fonction du temps.

4.1 Modélisation de la tendance

Un signal issu de mesures, après son échantillonnage, peut être représenté par une série chronologique. Cette dernière est généralement décrite par le modèle de tendance suivant :

$$y_t = f(t) + \varepsilon_t \quad (1)$$

Où :

- y_t est la valeur de la mesure à l'instant t ,
- $f(t)$ est sa tendance,
- ε_t est le terme d'erreur.

Le modèle de tendance que nous considérons est linéaire. La fonction $f(t)$ est un polynôme du premier ordre. La figure 2 montre le principe de la prédiction dans lequel la technique de la fenêtre glissante est utilisée. Il s'agit de considérer, à chaque instant, une seule section du signal. On construit son modèle de tendance, puis on élabore la prédiction. La section du signal qui sera considérée à l'instant t est constituée des mesures qui sont observées de l'instant $t-(n-1)\Delta t$ à l'instant t , où Δt est la période d'échantillonnage des mesures et n est un nombre entier. Le choix de n est réalisé en tenant compte de la variance du signal.

L'information de prédiction P_t sera obtenue en suivant les trois étapes ci-dessous :

- La construction de la droite de régression qui décrit le mieux la tendance de la fenêtre considérée à l'instant t . Il s'agit de chercher à estimer la droite qui passe au mieux par un ensemble de points espacés dans le temps.
- L'extrapolation de cette droite jusqu'à son intersection avec un seuil.
- Calculer la différence de temps entre l'instant t et l'instant de l'intersection. Cette différence de temps représente le temps prédit P_t (figure 2).

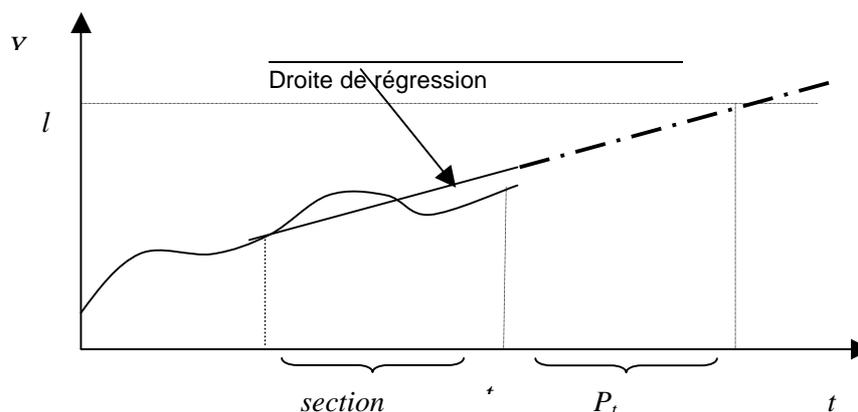


Figure 2 : Le principe de la prédiction

Le signal de prédiction est alors obtenu en faisant glisser la fenêtre d'observations sur l'axe temporel. L'objectif principal de cette méthode de prédiction est de prédire l'instant pour lequel la mesure sera égale à une valeur bien déterminée.

4.2 Estimation des coefficients du modèle de régression linéaire

En observant le système de suivi de véhicules, on remarque qu'il tend vers les mauvais fonctionnements suivants :

- Une tendance vers une collision : Elle se traduit par la décroissance de la distance qui sépare les deux véhicules qui se suivent. Lorsque cette distance atteint un seuil de sécurité prédéfini, la collision ne sera plus évitable.
- Une tendance vers un décrochage : Elle se traduit par la croissance de la distance qui sépare les deux véhicules qui se suivent. Lorsque cette distance atteint un seuil prédéfini, le décrochage ne sera plus évitable. Ce seuil est élaboré à partir des spécifications fonctionnelles et technologiques du système de suivi.

Nous rappelons que l'objectif est de donner une information de prédiction qui aura pour rôle de signaler si une collision, ou bien un décrochage, est fort probable avant que l'on perde complètement le contrôle du système de suivi. Cette information sera donc obtenue à partir du traitement du signal de mesure de la distance inter-véhiculaire. Pour élaborer cette prédiction, notre méthode consiste donc à construire la régression linéaire présentée dans la section précédente. Celle-ci nécessite l'estimation des paramètres de la régression. Ces paramètres seront estimés pour chaque fenêtre d'observation. Pour cela, nous avons adopté une méthode d'estimation basée sur une représentation par intervalles [Attouche, 2000b].

4.2.1 Approche par intervalles

Nous présentons une approche basée sur l'arithmétique des intervalles, dans laquelle chaque mesure est considérée comme une variable bornée. L'intervalle qui contient cette variable est obtenu en exploitant la précision du capteur qui est fournie par ses caractéristiques techniques.

Ainsi, le signal de mesure peut être écrit :

$$X_k = y_k (1 + \xi) \quad (2)$$

Où :

- X_k est la quantité à mesurer à l'instant kT , avec T qui représente la période d'échantillonnage du système de mesure, et k un entier naturel,
- y_k est la mesure effectuée à l'instant kT ,
- $\xi \in [-\delta, \delta]$ est l'intervalle qui représente la précision du capteur, et. $\delta \in]0,1]$

Pour modéliser la tendance du signal de mesure, nous utilisons la même technique qui est présentée dans le paragraphe 3.1. Une fonction linéaire de X_k doit donc être identifiée pour chaque section du signal. On utilise aussi le principe de fenêtre glissante. La section du signal qui sera considérée à l'instant t est constituée des mesures observées de l'instant $t-(n-1)T$ à l'instant t , où T est

la période d'échantillonnage des mesures. L'équation (2) montre que chaque observation à l'instant k doit satisfaire l'inégalité suivante :

$$y_k(1 - \delta) \leq X_k \leq y_k(1 + \delta) \quad (3)$$

Dans ce cas, la variable X_k peut être vue comme une variable bornée. Tout ce qui est connu sur X_k est seulement l'intervalle dans lequel elle est contenue. Cette intervalle est appelé l'espace abstrait de X_k . Il est noté $A(X_k)$, et défini de la façon suivante :

$$A(X_k) = [y_k(1 - \delta), y_k(1 + \delta)] \quad (4)$$

Ou encore par la notation suivante :

$$A(X_k) = [\underline{X}_k, \overline{X}_k] \quad (5)$$

Avec :

- \underline{X}_k est la borne inférieure de $A(X_k)$,
- \overline{X}_k est la borne supérieure de (X_k) .

Cette représentation par intervalles est très efficace dans le cas où les caractéristiques des capteurs sont bien connues. Nous ne cherchons pas à trouver comment se comporte la variable dans ce domaine, comme c'est le cas de la représentation stochastique où des hypothèses sur la distribution de la variable sont faites. Ce qui est indispensable et suffisant pour nous c'est seulement de bien définir ce domaine.

Les coefficients de régression du modèle doivent être déterminés en considérant toutes les mesures qui appartiennent à la fenêtre d'observations considérée à l'instant k . Ceci nous permet d'introduire le modèle de la façon suivante :

$\forall i \in \{k-n+1, \dots, k\}$, nous avons :

$$X_i = b_k i + a_k \quad (6)$$

où a_k et b_k sont les paramètres recherchés du modèle.

En utilisant cette représentation par intervalle, l'estimation de a_k et b_k revient donc à déterminer leurs espaces abstraits. Il s'agit ici, pour l'espace abstrait, de trouver directement le domaine qui contient ces variables. Notons que la détermination de l'espace abstrait de $A(P_k)$ nous fournit directement les erreurs de prédiction.

Formulation du problème du calcul de $A(a_k)$ et $A(b_k)$:

Les espaces abstraits $A(a_k)$ et $A(b_k)$ pour chaque section du signal, considérée à l'instant k , doivent être trouvés tels que :

$\forall i \in \{k-n+1, \dots, k\}$ alors :

$$A(b_k i + a_k) = [y_k(1 - \delta), y_k(1 + \delta)] \quad (7)$$

Ce problème peut être présenté de la façon suivante :

Les paramètres a_k et b_k doivent satisfaire pour chaque i appartenant à $\{k-n+1, \dots, k\}$ les inégalités suivantes :

$$y_i(1 - \delta) \leq b_k i + a_k \leq y_i(1 + \delta) \quad (8)$$

Pour résoudre ce problème, l'idée de base est d'exploiter une relation qui relie les deux paramètres. Il suffit de rechercher seulement l'espace abstrait d'un des deux paramètres, ensuite déterminer l'espace abstrait du deuxième paramètre en utilisant la fonction qui les relie. En exploitant l'équation (7), et en utilisant l'arithmétique des intervalles, le problème peut alors être réduit à rechercher, premièrement l'espace abstrait du paramètre b_k , et puis l'utiliser pour déterminer celui de a_k . Afin de déterminer $A(b_k)$, l'hypothèse qui doit être satisfaite est que l'espace abstrait $A(a_k)$ existe et qu'il vérifie toutes les inégalités (8).

Pour bien comprendre cette démarche, prenons par exemple deux inégalités de (8) exprimées pour i et $i-1$ appartenant à l'intervalle $\{k-n+1, \dots, k\}$. Ces deux inégalités sont :

$$y_i(1 - \delta) \leq b_k i + a_k \leq y_i(1 + \delta) \quad (9)$$

$$y_{i-1}(1 - \delta) \leq b_k (i - 1) + a_k \leq y_{i-1}(1 + \delta) \quad (10)$$

En soustrayant (10) et (9), et en utilisant les propriétés de l'arithmétique des intervalles, nous obtenons donc :

$$y_i(1 - \delta) - y_{i-1}(1 + \delta) \leq b_k \leq y_i(1 + \delta) - y_{i-1}(1 - \delta) \quad (11)$$

L'inégalité (11) représente un des espaces abstraits possibles du paramètre b_k . Nous pouvons déterminer tous les espaces abstraits possibles de b_k en appliquant la même procédure à toutes les combinaisons possibles de couples d'inégalités qui vérifient (8). En suivant cette démarche, nous obtenons $n(n-1)/2$ espaces abstraits possibles du paramètre b_k . Ceci peut être formulé comme suit :

$\forall i \in \{1, \dots, n-1\}$ et $\forall j \in [i, \dots, n-1]$,

$$A_{ij}(b_k) = \left[\frac{\overline{X_{k-i+1}} - \overline{X_{k-j}}}{j-i+1}, \frac{\overline{X_{k-i+1}} - \overline{X_{k-j}}}{j-i+1} \right] \quad (12)$$

avec : $j - i + 1 \neq 0$.

Finalement, l'espace abstrait qui contient le paramètre b_k et qui vérifie toutes les inégalités (8) est défini comme étant l'intersection de tous les espaces abstraits possibles obtenus à partir de chaque inégalité. Ceci peut être exprimé comme suit :

$$A(b_k) = \bigcap_{i=1}^{i=k-1} \bigcap_{j=i}^{j=k-1} A_{ij}(b_k) \quad (13)$$

Ceci nous permet donc de trouver les deux bornes du domaine d'appartenance de b_k qui sont notés :

$$A(b_k) = [\underline{b}_k, \overline{b}_k] \quad (14)$$

L'espace $A(b_k)$ existe si et seulement si l'intersection (2.20) n'est pas vide. La situation, où l'intersection est l'ensemble vide, correspond à un mauvais choix de la taille de la fenêtre des échantillons, et exprime aussi que la modélisation linéaire de la tendance du signal n'est pas adéquate.

L'espace abstrait du deuxième paramètre a_k peut être alors déduit directement à partir de l'inégalité (8). Le paramètre a_k doit donc satisfaire pour chaque i appartenant à $\{k-n+1, \dots, k\}$ les inégalités suivantes :

$$y_i(1 - \delta) - \underline{b}_k i \leq a_k \leq y_i(1 + \delta) - \overline{b}_k i \quad (15)$$

Le paramètre a_k qui satisfait toutes ces inégalités doit avoir comme limites les deux bornes suivantes :

$$\underline{a}_k = \text{Sup} \left[y_i(1 - \delta) - \underline{b}_k i \right]_{i=k-n+1}^k \quad (16)$$

$$\overline{a}_k = \text{Min} \left[y_i(1 + \delta) - \overline{b}_k i \right]_{i=k-n+1}^k \quad (17)$$

Avec :

$$A(a_k) = [\underline{a}_k, \overline{a}_k] \quad (18)$$

Cette méthode nous permet donc de trouver les domaines des deux paramètres de la régression linéaire. Il reste à résoudre le cas où $A(b_k)$ est un ensemble vide. Ce problème dépend fortement du choix de n , la taille de la section du signal. Si $A(b_k)$ est un ensemble vide, cela veut dire que l'on ne peut pas valider un modèle linéaire pour la taille de la fenêtre considérée. Le problème résultant devient donc le suivant :

Trouver la taille n adéquate de la fenêtre d'échantillons de sorte que :

$$A(a_k) \neq \emptyset \quad (19)$$

Pour résoudre ce problème, nous proposons une solution algorithmique. Il suffit de ne pas fixer n . Nous lui donnons seulement une limite supérieure. Ainsi, à chaque instant k , la taille n est alors adaptée suivant le fait que l'équation (19) est vérifiée où non. Si elle est satisfaite, n est donc conservée. Si l'équation (19) n'est pas satisfaite, la taille n est décrétementée et le test est répété jusqu'à ce que l'équation (19) soit satisfaite.

La convergence de cet algorithme est assurée puisque le test s'arrête automatiquement quand n sera égal à 2. Ceci peut être expliqué par le fait qu'il est toujours possible de construire un modèle linéaire à partir d'au moins deux valeurs du signal. Sauf que la décroissance de n induit une perte de la fiabilité de l'information de prédiction qui est due à la non linéarité de la tendance. Ceci doit être pris en considération dans le système de décision.

Après avoir déterminé les domaines d'appartenance des paramètres du modèle, nous procédons maintenant à l'évaluation de l'espace abstrait de P_k . Nous introduisons la contrainte fonctionnelle exprimée de la façon suivante :

$$l_i < y_k < l_s$$

Avec :

- y_k est le signal de mesure,
- l_s est le seuil supérieur,
- l_i est le seuil inférieur.

Le signal y_k ne peut atteindre les deux seuils à la fois. Le seuil qui peut être atteint dépend du signe du paramètre b_k . De la même façon que dans l'approche statistique, le temps prédit peut donc être déterminé directement à partir de l'équation du modèle linéaire. Il représente la différence de temps entre l'instant d'intersection de la régression avec le seuil et l'instant k (figures 3 et 4).

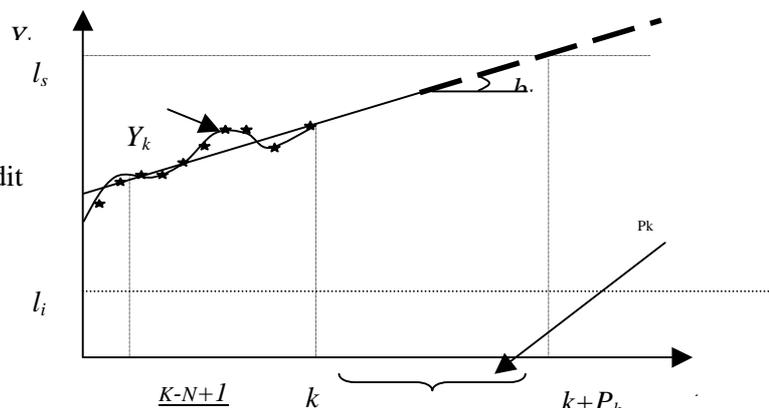
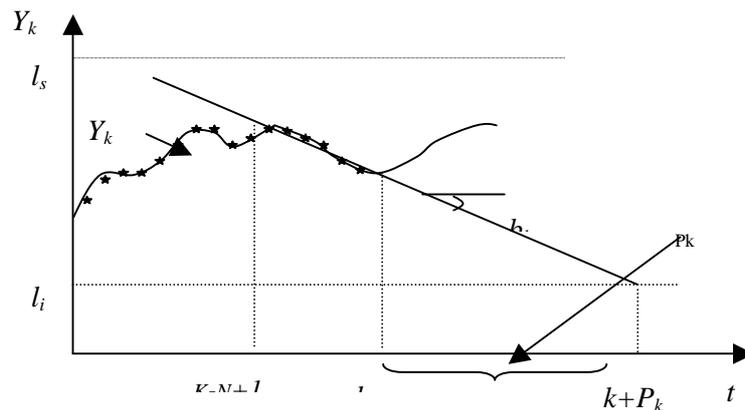


Figure 3 : le temps prédit
calculé par rapport à l_s

Figure 4 : Le temps prédit
calculé par rapport à l_i



Le temps prédit est donné par la formule suivante :

$$P_k = \frac{l - X_k}{b_k} \quad (20)$$

L'objectif maintenant est de trouver l'espace abstrait de P_k . Pour cela, nous utilisons les propriétés de l'arithmétique des intervalles. Nous faisons une substitution des inégalités (3) et (14) dans l'équation (20). L'espace abstrait de P_k est alors obtenu à partir de l'algorithme suivant :

- si $\underline{b}_k > 0$, alors la tendance du signal est calculée par rapport au seuil supérieur, donc :

$$\frac{l_s - \overline{X}_k}{\underline{b}_k} < P_k < \frac{l_s - \underline{X}_k}{\overline{b}_k} \quad (21)$$

- Si $\overline{b}_k < 0$, alors la tendance du signal est calculée par rapport au seuil inférieur, donc :

$$\frac{l_i - \underline{X}_k}{\overline{b}_k} < P_k < \frac{l_i - \overline{X}_k}{\underline{b}_k} \quad (22)$$

- Si $\underline{a}_k \leq 0$ et $\overline{a}_k \geq 0$, alors P_k tend vers l'infini,
- Si $l_u - \overline{X}_k \leq 0$ ou bien $l_c - \underline{X}_k \leq 0$, alors P_k tend vers zéro..

Nous constatons à travers l'utilisation de cette approche par intervalles que nous arrivons bien à borner l'information de prédiction. Ceci est très important car cela nous permet de savoir dans quel domaine cette information est contenue sans se soucier de calculer sa valeur précise. Nous arrivons

donc à notre objectif de départ qui est de présenter une information fiable sur le temps qui reste à un signal pour qu'il déborde un seuil donné. Nous présentons dans ce qui suit les résultats de la simulation du système de prédiction.

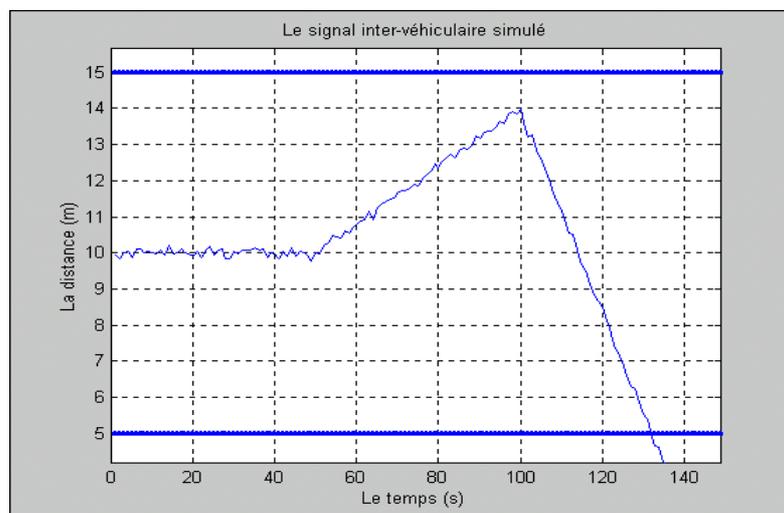
5 SIMULATION

Nous avons simulé cet algorithme de prédiction en utilisant le logiciel Matlab[®]. Durant ces simulations, nous avons tenu compte de quelques spécifications qui sont liées directement au projet PLATOON. Nous avons simulé le signal de mesure de la distance entre les véhicules. Le bon fonctionnement du système de suivi de véhicules est obtenu lorsque ce signal est toujours au voisinage de 10 mètres. Nous avons aussi superposé à ce signal un bruit gaussien de moyenne nulle. Puis, nous avons introduit des dérives dans ce signal. Les deux seuils qui limitent le bon fonctionnement du système de suivi sont les suivants :

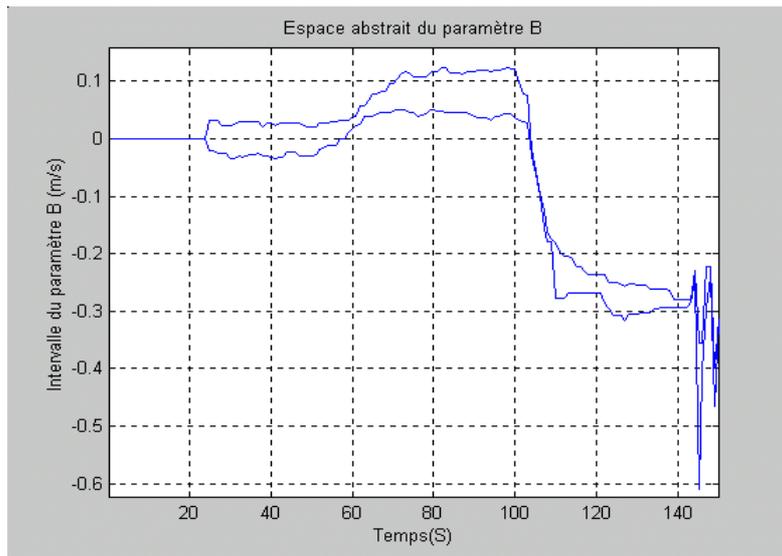
- Seuil _ supérieur = 15 mètres.
- Seuil _ inférieur = 5 mètres.

Nous avons aussi effectué des simulations en changeant à chaque fois la taille de la fenêtre de la section du signal. Nous avons choisi pour ces simulations présentées ici la taille de la fenêtre égale à 25. La valeur infinie de la prédiction ne peut être obtenue par simulation. Nous avons donc représenté l'infini par une valeur égale à 200.

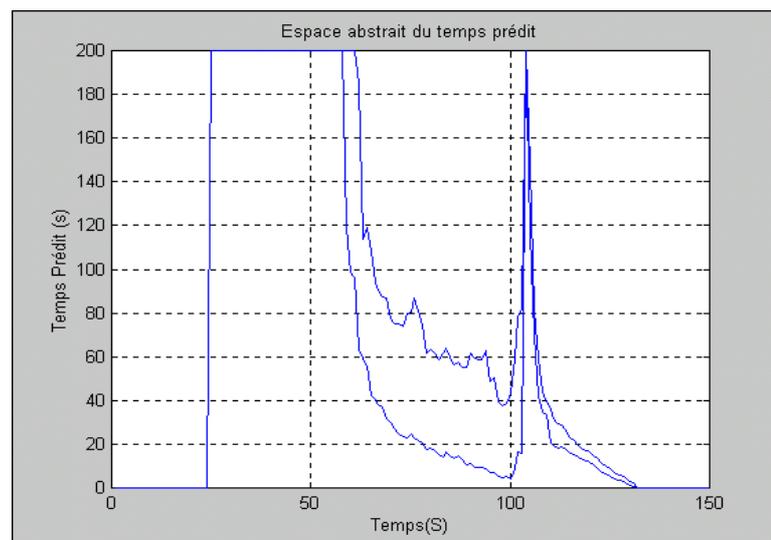
Les résultats de la simulation sont représentés dans les figures suivantes :



Cette figure montre le signal de mesure simulé avec un bruit gaussien normal de moyenne nulle. Ce signal est constant à partir de l'instant de 0s jusqu'à l'instant 50 secondes. Il présente une dérive positive de l'instant 50 secondes jusqu'à l'instant 100 secondes, et il présente une dérive négative de l'instant 100 secondes jusqu'à la fin de la simulation.



Cette figure montre l'espace abstrait du paramètre de la pente du modèle linéaire. L'espace abstrait est délimité dans la figure par la zone comprise entre les deux signaux qui représentent les deux seuils supérieur et inférieur du paramètre.



Cette figure montre l'espace abstrait du signal Temps prédit. Cet espace est délimité par les deux seuils supérieur et inférieur du temps prédit. On remarque bien que ce signal délivre bien cette information de prédiction sur le temps qui reste au signal pour déborder un des deux seuils.

6 CONCLUSION

Nous avons présenté une approche de prédiction qui permet de signaler une apparition très probable de dysfonctionnements dans les systèmes de capteurs. L'information de prédiction est déterminée directement à partir du traitement des signaux qui caractérisent le fonctionnement du système. L'approche de prédiction que nous avons présentée suit les étapes suivantes :

- modélisation linéaire d'une section du signal,
- estimation des paramètres du modèle par une approche basée sur l'arithmétique des intervalles,
- extrapolation du modèle jusqu'à son intersection avec un des seuils de bon fonctionnement du système,
- calcul du temps prédit,
- refaire toute les étapes précédentes pour une nouvelle section du signal.

Nous avons développé cette approche dans le cadre de l'application de suivi automatique de convois de camions. Elle peut aussi être utilisée dans d'autres applications où le fonctionnement normal du système dépend fortement de la disponibilité de signaux de mesures de ses états.

Cette approche devrait être suivie par une phase de décision et une phase d'action pour réagir à l'anomalie qui va apparaître dans le fonctionnement du système.

7 BIBLIOGRAPHIE

- [ATTO, 1999] Attouche S., Hayat S. et Staroswiecki M. "Systèmes de commande et de contrôle pour l'autoroute Automatisée," *Rapport INRETS ESTAS N° 99.24*, 1999.
- [ATTO, 2000a] Attouche S., Hayat S., Staroswiecki M., *Proceeding of IFAC Symposium SAFEPROCESS'2000*, Budapest, Hungary, 2000.
- [ATTO, 2000b] Attouche S., Hayat S. and Staroswiecki M., "A Prediction System Based on Vehicle Sensor Data in Automated Highway" *Proc. of the 3rd IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC'2000*, Dearborn USA, pp494-499, 2000.
- [BECH, 1998] Bechart, H. "PLATOON," *Note Technique N°H3.5/98/R515*, Renault VI, 1998.
- [BRUN, 1990] Brunet J., Labarrère M., Jaume D., Rault A., Vergé M., *Détection et diagnostic de pannes, Traité des nouvelles technologies, série Diagnostic et Maintenance*, Hermès, Paris, 1990.
- [CHO, 1996] M.Y.Ch&o, A.J. Lichtenberg, and M.A. Lieberman. 1996. "Minimum Stopping Distance for Linear Control of an Automatec Car-Following System", *IEEE transactions on Vehicular Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 383-389.
- [GADD, 1994] Gaddouna, B., Giuliani, S., and Ragot, J., "Sensor Faults Detection Using Observers" *Workshops on Qualitative Quantitative Approaches to Model Based Diagnosis*, Humburg, 8-9 September, 1994, pp.87-96.
- [HAYA, 1996] S. Hayat et M. Edel. 1996. "Pilote automatique de véhicules - rapport final", *Rapport INRETS*, N° 59, nov 1996.
- [ISER, 1991] Iserman R., Freyermuth B., *Process Fault diagnosis Based on Process Model Knowledge – Part I : Principles for fault diagnosis with parameter estimation*, *Transaction of the ASME*, vol. 113, pp. 620-626, 1991.
- [ISHI, 1991] S.Ishikawa, H. Kuwamoto, and S. Ozawa. 1988. "Visual Navigation of an Autonomous Vehicle Using White Line Recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 5, pp. 743-749.
- [STAR, 2000] Staroswiecki M., Hoblos G. and Aïtouche A., "Fault Tolerance Analysis of Sensor Systems" *38th Conf. on Decision and Control*, Phoenix, Arizona, 1999.

ETUDE DE PROCEDURES D'INSERTION SUR UNE VOIE AUTOMATISEE POIDS LOURDS

1 RESUME

L'objectif de cette étude préliminaire est de développer quelques éléments de réflexion concernant l'insertion de nouveaux véhicules sur une voie de circulation automatisée pour PL.

Il s'agit ici d'évaluer, en terme de coût (espace occupé) et de performance (capacité), l'insertion de véhicules dans un flot de véhicules automatisés, en respectant les impératifs de sécurité.

Assez généralement, on peut distinguer 5 phases au sein d'une procédure d'insertion d'un véhicule dans un flot⁽¹⁾: manipulation du flot d'entrée en vue de l'insertion, communication entre véhicules, recherche d'un espace d'insertion, manœuvres d'insertion et contrôle de la propagation des perturbations du trafic après insertion. Plusieurs choix stratégiques interviennent, sur la préparation du flux de véhicules en amont, sur le contrôle du flot de véhicule à insérer, sur les manœuvres elles-mêmes de création d'espaces d'insertion, et ces choix sont évidemment tributaires d'informations précises en particulier sur le mode de coopération entre véhicules (véhicules autonomes, coopération faible (uniquement en cas d'urgence), coopération forte, coopération par pelotons) et sur la circulation du flot principal (sa structure, son intensité, mais aussi si elle suit un régime de vitesse homogène, permanent ou quelconque).

Ces informations étant encore à l'heure actuelle largement en débat, il est envisagé dans ce travail de proposer et discuter quelques scénarios assez généraux, en se basant sur des données relatives aux PL. Deux problèmes sont essentiellement abordés :

- L'aménagement d'espaces d'insertion dans le flot de véhicules sur la voie principale.
- Les règles ou lois de commande pouvant être appliquées au(x) véhicule(s) souhaitant s'insérer dans le trafic principal.

Préparation du flot de véhicules en amont :

L'insertion de nouveaux véhicules constitue une perturbation pour les véhicules du flot principal. Cette perturbation doit être minimisée (et en tout cas bornée) dans l'espace et dans le temps. Elle doit se faire en maximisant des critères de sécurité. Enfin elle présente un coût – lié en particulier aux changements de régime moteur des véhicules devant modifier leurs interdistances – qui doit être minimisé.

Pour traiter le premier point, on suppose qu'on isole un « paquet » de N véhicules dans le flux principal. Le premier véhicule de ce paquet conserve sa vitesse. Les N-1 autres vont modifier leur interdistance pour permettre l'insertion d'un (ou K) nouveau(x) véhicule(s). La procédure est reprise pour le paquet suivant. On garantit ainsi que la perturbation est bornée et on aura bien sûr intérêt à minimiser N.

¹ B. RAN, S. LEIGHT, R.R. LU et S. JOHNSON, *Merging process analysis for an automated highway system*, ITSP Research Report, University of Wisconsin, 1996.

Les deux autres points sont en grande partie antagonistes et il faudra donc gérer au mieux un compromis coût/sécurité. Le coût dépend, outre de la taille du paquet, du nombre et de la complexité des manœuvres à effectuer au sein de ce paquet. La sécurité peut être évaluée très grossièrement à travers la valeur de l'interdistance d'insertion. Cette interdistance doit être supérieure à la distance de sécurité qui est la distance minimale devant séparer 2 véhicules.

Nous nous intéressons ici à deux cas extrêmes de ce compromis coût / sécurité :

- *Maximisation de la distance d'insertion : dans ce mode on resserre au maximum (à distance de sécurité) les véhicules du paquet pour fournir une interdistance d'insertion maximale au véhicule entrant, et donc lui procurer une sécurité maximum.*
- *Minimisation des manœuvres : Dans ce mode on modifie l'interdistance au sein du paquet sur la voie principale de façon qu'elle devienne égale à celle du nouveau flot homogénéisé après insertion du ou des véhicules entrants. Dans cette hypothèse aucune manœuvre de réorganisation du paquet ne devrait être nécessaire après l'insertion.*

Ces deux modes de fonctionnement sont évalués tout d'abord dans le cadre de l'insertion d'un unique véhicule parmi N et on constate que cela provoque des ruptures de capacité d'insertion chaque fois que N change de valeur.

Cela nous amène à généraliser à l'insertion de K véhicules parmi N et on montre que, théoriquement, on peut toujours trouver un (des) couple(s) (K, N) permettant d'insérer n'importe quel flux entrant, tant que, évidemment, la somme du flux principal et du flux entrant reste inférieure à la capacité de la voie. En fait le problème réel qui se pose est le problème inverse suivant : connaissant à un moment donné du trafic le flux principal et le flux entrant, comment choisir K et N ? Quelques exemples numériques balayant différentes situations sont traités.

Manœuvres d'insertion

Pour ce qui concerne l'insertion proprement dite du véhicule entrant, deux approches différentes ont été retenues.

La première⁽²⁾ propose une formulation et une solution au problème de la détermination de la loi de vitesse d'un véhicule désirant s'insérer dans un espace sur la voie principale. Cette manœuvre unifie dans leur traitement différentes configurations géométriques de voie d'insertion en introduisant le concept de « virtual platooning » (ou d'insertion « virtuelle » préalable à l'insertion réelle). L'espace cible étant connu, le véhicule entrant va adapter sa vitesse à celle de cet espace. Cette approche requiert une coopération forte entre les véhicules, au moins au niveau de la rampe d'accès. Elle peut s'adapter à plusieurs formes de rampes d'accès, mais nécessite un équipement dans l'infrastructure (bornes). Le choix de l'espace d'insertion s'y fait avant l'enclenchement des manœuvres. Des simulations détaillées ont été effectuées pour ce type de procédure avec des données de type poids lourd. L'avantage de la méthode est que la loi de vitesse est adaptative par rapport aux paramètres issus de la circulation sur la voie principale et que cette loi est « douce », ce qui est positif sur le plan de la consommation, de la sécurité et du confort. Son inconvénient est de nécessiter des distances d'accès, donc des rampes, d'une longueur assez élevée, ce qui peut être rédhibitoire au niveau de l'infrastructure. Un compromis devra être trouvé entre ce point et certaines caractéristiques de la loi de vitesse.

⁽²⁾ X.Y. LU et K.J. HEDRICK, *Longitudinal Control Algorithm for automated vehicle merging*, IDC 2000, Sydney, 450-455.

Dans la seconde ⁽³⁾, le comportement d'un véhicule est modélisé par un automate hybride qui spécifie le contrôle du véhicule en lois continues (lois d'accélération...), ainsi que son contrôle discret (changement d'états, c'est-à-dire enclenchement de manœuvres). L'automate proposé autorise l'insertion d'un véhicule par une politique de « céder le passage » sans autre formatage du flot en amont que le respect des distances (ou des temps) de sécurité. Cette approche peut être utilisée par des véhicules autonomes. La rampe d'accès a une forme bien définie (voie d'accélération parallèle). Au début de la phase d'accélération, le véhicule ne sait pas derrière quel véhicule de la voie principale il sera inséré et la définition de l'espace d'insertion se fait conjointement à la manœuvre d'insertion elle-même. Cette approche est très séduisante par sa simplicité conceptuelle (elle est très proche de la pratique actuelle sur autoroute urbaine). Elle est cependant complètement tributaire de l'interaction locale entre véhicules et sa validation, en particulier sur l'évaluation de la sécurité, ne peut se faire que sur site réel.

The aim of this preliminary study is to develop some pieces of reflection about the insertion of new vehicles on a lane of automated highways dedicated to trucks.

The goal is to evaluate the impact in cost (occupied place) and performance (capacity) of the insertion of new vehicles in a stream of automated vehicles, with the respect of security constraints.

Quite generally, 5 phases can be distinguished during an insertion procedure of a new vehicle in a main stream ⁽¹⁾ : modification of the main stream for the insertion, inter-vehicles communication, research of an insertion space, insertion manoeuvring and control of the traffic perturbation after insertion. Several strategic choices are to do, concerning the preparation of the main flow upstream, the type of manoeuvres to perform in order to create insertion spaces, the control of the incoming flow, ... and these choices are naturally dependent on precise informations, specially about the type and performances of the cooperation between vehicles and the details of the traffic in the main stream. These informations being until now largely in discussion, this work will be concentrated on the proposal and discussion of a few quite general scenarios, taking into account numerical data adapted to trucks.

Two main problems are essentially tackled :

- the creation of insertion places in the main stream
- the control procedures applicable to the vehicle(s) in insertion in the main stream.

Upstream preparation in the main flow :

The insertion of new vehicles is a perturbation for the vehicles in the main flow. This perturbation has to be minimized (at the least limited) in space and time. This has to be done also with maximized security criteria. Endly, this operation has a cost – linked in particular to the modifications in the engine rating of the trucks – which also has to be minimized.

⁽³⁾ A. GIRAULT, *Design of an hybrid controller for autonomous vehicles driving on automated highways*, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4286.html>

⁽¹⁾ B. RAN, S. LEIGHT, R.R. LU et S. JOHNSON, *Merging process analysis for an automated highway system*, ITSP Research Report, University of Wisconsin, 1996.

The first point can be solved by considering a group of N vehicles in the main stream. The first vehicle of this group maintains his speed. The $N-1$ following vehicles modify their interdistance in order to create a sufficient space to insert 1 (or K) new vehicle(s). These proceedings are reproduced for the following group. So the perturbation is limited and naturally it is desirable to minimize N .

The two others points are in the whole opposed and it will be necessary to manage at the best a compromise between cost and security. The cost depends on the value of N and the number and complexity of manoeuvrings to do inside the group. The security can be very roughly evaluated through the value of the insertion interdistance. This interdistance has to be greater than the security distance which is the minimal distance between two vehicles.

We are interested here in two extreme opposite cases for the cost – security compromise :

- *maximizing the insertion distance : in this mode, the vehicles in the group are squeezed together at the security distance in order to liberate a maximal space behind the first vehicle of the group. So the new incoming vehicle has a maximal place to perform his insertion in security.*
- *minimizing the manoeuvrings : in this mode the interdistance inside the group is modified in order to be equal to the value in the new stream obtained after the insertion of new vehicles. So not any manoeuvring is necessary to homogenize the interdistances after the insertion.*

Both modes of functioning are evaluated, firstly in the case of the insertion of only 1 vehicle among N . In that case, breakings in the insertion capacity are observed at each modification of the N value.

This leads to a generalization of the process to the insertion of K vehicles among N . It is theoretically showed that it is always possible to find a (K, N) pair so that all incoming stream can be absorbed, naturally at the condition that the total final stream remains less than the capacity of the lane. In fact the real problem to solve is the following reverse problem : knowing at a given time the main stream and the incoming stream, how to choose K and N ? A few numerical examples are given, corresponding to various situations.

Insertion manoeuvrings :

As far as the insertion of the new vehicle in a place in the main stream is concerned, two different approaches are retained.

The first one ⁽²⁾ proposes a formulation and a solution to the problem of the determination of a control law to apply to the speed of the incoming vehicle. This solution unifies the treatment of various geometrical designs of the insertion lane by introducing the concept of “virtual platooning”. That means that, the insertion place being previously determined, the speed of the incoming vehicle is adjusted to the one of this place. This approach can be adapted to various forms of the insertion lane, but an equipment of the infrastructure (magnetic sensors for example) is needed. Detailed simulations have been performed with data adapted to trucks. The advantage of this method is that the speed law is adaptive to the parameters of the main stream and the speed profile stays smooth, which is interesting as far as comfort and energy consumption are concerned. The negative point is the need of quite long access lanes, which is penalizing for the infrastructure cost. A compromise has to be found between this point and some characteristics of the speed law.

⁽²⁾ X.Y. LU et K.J. HEDRICK, *Longitudinal Control Algorithm for automated vehicle merging*, IDC 2000, Sydney, 450-455.

In the second one ⁽³⁾ the behaviour of a vehicle is modeled by means of an hybrid automaton specifying the continuous control of the vehicle (acceleration laws) and the discrete control (changing of states, that means manoeuvrings engaging). The proposed automaton authorizes the insertion of a new vehicle using a “giving up the way” policy requiring only for the main stream to respect security distances (or times). This approach can be applied to autonomous vehicles. The access lane has a given design, with a speeding up parallel lane. At the beginning of the insertion phase, the incoming vehicle don't know exactly where is his insertion place. The definition of this place is done simultaneously with the insertion manoeuvring itself. This approach is very attractive by its conceptual simplicity and is very near to the actual practice on urban or peri-urban highways. Nevertheless, it is completely dependent on the performances of the local interaction between all the vehicles concerned by the insertion and extensive tests are needed both in simulation and in real configurations.

2 INTRODUCTION ET HYPOTHESES

L'objectif de cette étude est de développer quelques éléments de réflexion concernant l'insertion de nouveaux véhicules sur une voie de circulation automatisée pour PL. Il est clair que les procédures d'insertion peuvent largement dépendre du type de circulation qui sera retenu pour la voie principale : pelotons de véhicules à interdistance très faible, file de véhicules régulièrement espacés, file à espacements aléatoires, solutions mixtes (groupes de véhicules à interdistance constante, répartis irrégulièrement sur la chaussée) , ...

Nous nous placerons ici dans le cas très simple d'un flot de véhicules circulants à vitesse donnée V_0 et espacés régulièrement d'une distance d_A , ce qui correspond à un flux sur la voie principale $F_A = V_0 / (d_A + L)$, où L est la longueur moyenne d'un véhicule.

Dans ce flux doivent s'insérer de nouveaux véhicules se présentant à une entrée et constituant un flux horaire F_E . Un superviseur – ou un système de supervision doit :

- i) déclencher si nécessaire des modifications dans l'organisation du flux F_A pour que l'insertion soit possible
- ii) déclencher une procédure de contrôle du véhicule entrant jusqu'à son insertion effective.

Le premier point fait l'objet des paragraphes 2 à 6 et le troisième est abordé dans le paragraphe 7.

⁽³⁾ A. GIRAULT, *Design of an hybrid controller for autonomous vehicles driving on automated highways*, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4286.html>

3 CRITERES DE CHOIX D'UNE POLITIQUE D'INSERTION

L'insertion de nouveaux véhicules constitue une perturbation pour les véhicules du flot principal. Cette perturbation doit être minimisée (et en tout cas bornée) dans l'espace et dans le temps. Elle doit se faire en maximisant des critères de sécurité. Enfin elle présente un coût – lié en particulier aux changements de régime moteur des véhicules devant modifier leurs interdistances – qui doit être minimisé.

Pour traiter le premier point, on suppose qu'on isole un « paquet » de N véhicules dans F_A . Le premier véhicule de ce paquet conserve sa vitesse V_0 . Les $N-1$ autres vont modifier leur interdistance pour permettre l'insertion d'un (ou K) nouveau(x) véhicule(s). La procédure est reprise pour le paquet suivant. On garantit ainsi que la perturbation est bornée et on aura bien sûr intérêt à minimiser N .

Les deux autres points sont en grande partie antagonistes et il faudra donc gérer au mieux un compromis coût / sécurité. Le coût dépend, outre de la taille du paquet, du nombre et de la complexité des manœuvres à effectuer au sein de ce paquet. La sécurité peut être évaluée très grossièrement à travers la valeur de l'interdistance d'insertion d_{in} (on considère que l'espace laissé entre deux véhicules entre lesquels vient s'en insérer un nouveau est $2d_{in} + L$). Cette interdistance doit être supérieure à $d_{sécu}$ qui est la distance minimale devant séparer 2 véhicules².

Nous nous intéresserons ici à deux cas extrêmes de ce compromis coût / sécurité.

3.1 Maximisation de la distance d'insertion

Dans ce mode on resserre au maximum (à $d_{sécu}$) les véhicules du paquet pour fournir une interdistance d'insertion d_{in} maximale au véhicule entrant, et donc lui procurer une sécurité maximum.

Cette procédure sera appelée par la suite « Insertion par Serrage Maximal » ou ISM.

3.2 Minimisation des manœuvres

Dans ce mode on fait passer l'interdistance au sein du paquet de d_A à d_B . d_B est l'interdistance correspondant au flot $F_B = F_A + F_E$, réparti de façon homogène ($d_B = (V_0 / F_B) - L$). Dans cette hypothèse aucune manœuvre de réorganisation du paquet ne devrait être nécessaire après l'insertion.

Cette procédure sera appelée par la suite « Insertion à Coût Minimal » ou ICM.

² Cette distance peut être différente suivant les situations, par exemple plus grande lors d'une phase d'insertion qu'en circulation normale. Nous ne ferons pas cette distinction ici.

4 CREATION D'UN ESPACE D'INSERTION

L'objectif est d'augmenter l'interdistance entre deux véhicules pour la faire passer de d_A à $d_{A1} = d_A + \Delta d$.

Pour cela, le 1^o véhicule garde sa vitesse V_0 et le second :

freine avec un freinage $-\Gamma_2$ jusqu'à ce que sa vitesse passe de V_0 à $V_0 - \Delta V$ (phase 1).

Cette phase dure un temps $\Delta t_{fr} = \Delta V / \Gamma_2$ pendant lequel le véhicule parcourt une distance

$$\Delta X_{fr} = \Delta t_{fr} (V_0 - \Delta V / 2)$$

roule pendant un temps $\Delta t_{\Delta V}$ à la vitesse $V_0 - \Delta V$ (phase 2)

réaccélère avec une accélération $+\Gamma_2$ jusqu'à ce qu'il retrouve la vitesse V_0 (phase 3). Le temps et la distance parcourue sont identiques à ceux de la phase 1 .

Au total :

la procédure dure $\Delta t = 2\Delta t_{fr} + \Delta t_{\Delta V}$

le véhicule 1 parcourt $\Delta X_1 = V_0 (\Delta t_{\Delta V} + 2 \Delta V / \Gamma_2)$

le véhicule 2 parcourt $\Delta X_2 = 2 (\Delta V / \Gamma_2) (V_0 - \Delta V / 2) + (V_0 - \Delta V) \Delta t_{\Delta V}$

Application numérique : Pour créer un espacement de 100m entre deux véhicules roulant à 25 m/s en réduisant la vitesse du second de 5 m/s par un freinage de 1 m/s², il faut un temps de 25 s pendant lequel le véhicule de tête parcourt 625m.

5 SCENARIO DE BASE : INSERTION D'UN VEHICULE PARMIS N

On suppose que l'insertion se fait entre le 1^o et le 2^o véhicule du paquet de N véhicules. Par ailleurs on notera C la capacité maximale de la voie : $C = V_0 / (d_{s\acute{e}cu} + L)$.

5.1 Procédure ISM

Les interdistances entre véhicules passent de d_A à $d_{s\acute{e}cu}$, ce qui crée un espace d_{A1} entre les deux premiers véhicules tel que :

$$d_{A1} = d_A + (N-1) (d_A - d_{s\acute{e}cu})$$

Dans cet espace on peut insérer un véhicule entrant si $d_{A1} > 2 d_{s\acute{e}cu} + L$. N étant un entier, on obtient :

$$N_{\min} = E^+ [(d_{s\acute{e}cu} + L) / (d_A - d_{s\acute{e}cu})] = E^+ [F_A / (C - F_A)], \text{ où } E^+ \text{ représente la partie entière } +1.$$

5.1.1 Capacité d'insertion de cette procédure

A une valeur de F_A donnée correspond une valeur de N_{\min} . Supposons par exemple que $V_0 = 90 \text{ km/h}$, $L = 20 \text{ m}$, $d_{\text{sécu}} = 60 \text{ m}$. On aura une capacité maximale de la voie $C = 1125 \text{ véh/h}$.

Pour $F_A = 650 \text{ véh/h}$: $N_{\min} = 2$. On pourra donc insérer au plus un véhicule sur 2 soit $F_{E_{\max}} = 325 \text{ véh/h}$

Pour $F_A = 910 \text{ véh/h}$: $N_{\min} = 5$. On pourra donc insérer au plus un véhicule sur 5 soit $F_{E_{\max}} = 182 \text{ véh/h}$

On peut ainsi définir une perte d'insertion $\Delta C = C - (F_A + F_{E_{\max}})$. Cette perte passe de 0 à un maximum chaque fois que N augmente d'une unité, avec $\Delta C_{\max} = C / (N+1)^2$.

Ceci est illustré par la courbe ci-dessous (fig.1).

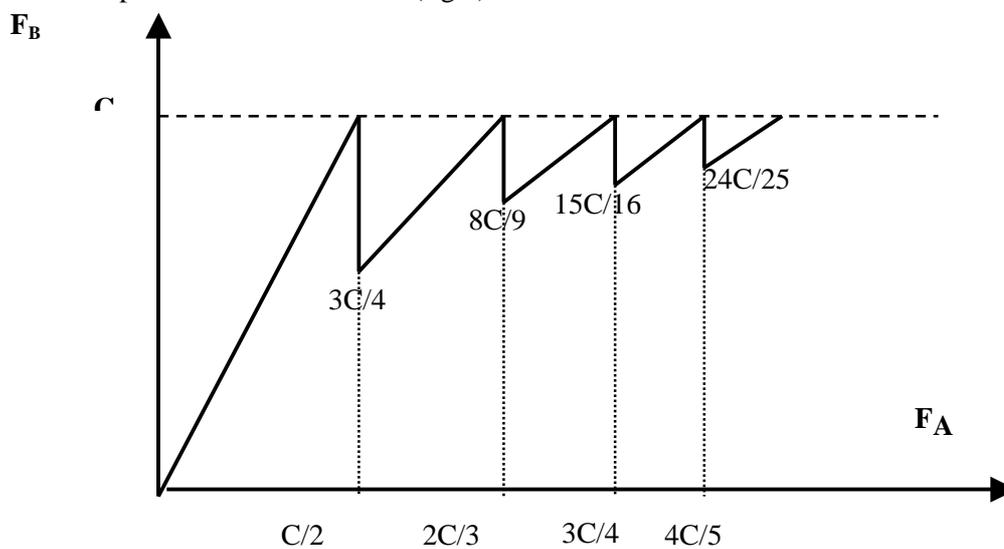


Figure 1 : Evolution de la capacité d'insertion avec F_A

5.1.2 Paramètres de sécurité :

L'espace servant à l'insertion valant $d_{A1} = 2 d_{\text{in}} + L$, on en déduit immédiatement :

$$2 d_{\text{in}} = N d_A - (N-1) d_{\text{sécu}} - L.$$

La comparaison de d_{in} à $d_{\text{sécu}}$ donne la marge de sécurité d'insertion :

$$\Delta_{\text{in}} = d_{\text{in}} - d_{\text{sécu}} = (N V_0 / 2 F_A) (1 - (N+1) F_A / N C).$$

Soit avec les données précédentes :

$$\Delta_{\text{in}} = 18.5 \text{ m pour } F_A = 650 \text{ véh/h}$$

$$\Delta_{\text{in}} = 7.2 \text{ m pour } F_A = 910 \text{ véh/h}$$

5.1.3 Paramètres de coût :

La procédure de freinage – réaccélération du § 3 doit être appliquée à N-1 véhicules avant l'insertion. Si on souhaite réorganiser le nouveau paquet de N+1 véhicules afin de recréer des interdistances constantes, il faudra réappliquer la procédure à N véhicules après l'insertion.

5.2 Procédure ICM

Les interdistances entre véhicules passent de d_A à d_B (avec $d_B = V_0 / (F_A + F_E) - L$), ce qui crée un espace d_{A1} entre les deux premiers véhicules du paquet tel que :

$$d_{A1} = d_A + (N-1)(d_A - d_B) = 2 d_B + L, \text{ avec } d_B > d_{\text{sécu}}.$$

5.2.1 Capacité d'insertion

C'est évidemment la même que précédemment, puisque la réponse à la question « peut-on insérer un nouveau véhicule parmi N ? » est indépendante de la façon dont on agence l'intérieur du paquet de N véhicules. La seule chose qui compte c'est de savoir si d_{in} est supérieure à $d_{\text{sécu}}$ ou non.

5.2.2 Paramètres de sécurité

Par définition de la procédure, on a $d_{in} = d_B$ et on obtient une marge d'insertion :

$$\Delta_{in} = [1 - (N+1)F_A / NC] N V_0 / (N+1) F_A.$$

La comparaison entre les deux modes donne, pour F_A et N donnés :

$$\Delta_{in \text{ ISM}} / \Delta_{in \text{ ICM}} = (N+1) / 2$$

5.2.3 Paramètres de coût

Par définition de la procédure, N-1 manœuvres de freinage – réaccélération doivent être effectuées avant l'insertion. Le flot après insertion est homogène.

6 GENERALISATION : INSERTION DE K PARMI N

La principale modification concerne la capacité d'insertion. Pour K et N donnés, on peut insérer un flux $F_E = KF_A / N$ tant que $F_A < NC / (N+K)$ et la perte maximale d'insertion vaut :

$$\Delta C = KC / (N+K) (N+1).$$

Ceci montre qu'à F_A donné la perte d'insertion diminue quand K augmente.

En fait, pour F_A donné, on peut insérer n'importe quel flux F_E jusqu'à ce que $F_B = F_A + F_E = C$.

Il suffit pour cela de choisir K et N assez grands et tels que :

$$K/N \sim (C - F_A) / F_A$$

En fait le problème réel qui se pose est le problème inverse suivant : connaissant à un moment donné du trafic F_A et F_E (tels que $F_A + F_E < C$), comment choisir K et N tels que K/N approche au mieux F_E / F_A .

7 QUELQUES EXEMPLES NUMERIQUES

7.1 Calculs préliminaires

On part de $F_A = 650$ véh/h circulant sur une voie de capacité $C = 1125$ véh/h ($V_0 = 90$ km/h, $L = 20$ m, $d_{\text{sécu}} = 60$ m). Ce flux correspond à un espace intervéhiculaire $d_A = 118.5$ m.

On en déduit $E^+ [F_A / (C - F_A)] = 2$

On peut donc utiliser une procédure d'insertion de 1 véhicule sur 2, ce qui permet d'absorber au plus 325 véh/h. Au delà, il faut utiliser une procédure de type K/N .

En mode 1 / 2 et en serrage maximal (ISM) on dégage un espace de 78.5 m de part et d'autre du véhicule à insérer, soit une marge de sécurité $\Delta_{\text{in}} = 18.5$ m.

7.2 Insertion de $F_E = 50$ véh/h

On a $F_A / F_E = 13$

Mode ICM 1/13 : Les deux premiers véhicules du paquet de 13 doivent d'écarter de $\Delta d = 117$ m. La marge d'insertion est alors $\Delta_{\text{in}} = 48$ m. Le nombre de véhicules devant ralentir – réaccélérer est $N_{R/A} = 12$.

Mode ISM 1/13 : Si on serre au maximum 12 véhicules on dégage un espace supplémentaire $\Delta d = 820$ m, soit une marge d'insertion de 400m. Cela n'a évidemment aucun intérêt. Par contre, cela amène à suggérer un mode intermédiaire pour ces faibles insertions : on insère un véhicule parmi N , puis on laisse passer n_0 véhicules avant de recommencer (mode 1 / ($N + n_0$)).

Par exemple avec $N = 2$ et $n_0 = 11$, l'espace créé est de 58.5 m, soit une marge d'insertion de 18.5m. Un seul véhicule modifie sa vitesse avant l'insertion et 13 après si on veut réhomogénéiser les distances. Tous les intermédiaires avec $N + n_0 = 13$ sont évidemment possibles.

7.3 Insertion de $F_E = 300$ véh/h

On a $F_A / F_E = 6 / 13$.

Mode ICM : on obtient avec $K = 6$ et $N = 13$: $\Delta d = 52$ m ; $\Delta_{\text{in}} = 15$ m ; $N_{R/A} = 12$

On peut remarquer qu'il est probablement très possible d'utiliser un rapport K/N qui n'approche que grossièrement F_E / F_A , ce qui permet de privilégier de faibles valeurs de K et de N . Par exemple ici, si on insère un véhicule sur 2, on aura $F_E = 325$ véh/h au lieu de 300. Il suffit de supprimer

périodiquement l'insertion en laissant passer n_0 véhicules supplémentaires sur la voie principale pour se recalculer sur F_E réel.

Mode ISM : Il est sans intérêt dans sa version brute car l'espace à créer dans F_A est énorme. Par contre, dans la ligne de la remarque précédente (§ 6.2), on peut :

insérer 6 fois un véhicule sur 2 et laisser passer 1 véhicule supplémentaire de F_A avant de recommencer

insérer 5 fois un véhicule sur 2, puis 1 véhicule sur 3 avant de recommencer le cycle

etc...

7.4 Insertion de $F_E = 400$ véh/h

On a $F_E / F_A = 8 / 13 = 0.615$

On dépasse 325 véh/h pour F_E , donc une procédure de type 1 / 2 n'est plus possible. Par contre (cf remarque du § 6.3) on n'est pas en fait obligé de prendre $K = 8$ et $N = 13$. On peut chercher des valeurs plus faibles telles que :

$0.615 \sim K/N < (C - F_A) / F_A = 0.73$. Par exemple, avec $K = 3$ et $N = 5$ on insère 390 véh/h au lieu de 400.

En mode ICM, l'espace à créer est de 35m et $\Delta_m = 6.5$ m.

En mode ISM, l'espace à créer est de 234m et $\Delta_m = 13.1$ m.

7.5 Insertion de $F_E = 475$ véh/h

On atteint la capacité maximale de la voie puisque $F_A + F_E = 1125$ véh/h = C . Il faudrait $K/N = 0.73$. On peut chercher un compromis entre rester proche de cette valeur et utiliser des valeurs de K et N peu élevées. Par exemple :

$K / N = 16 / 22$: on insère 472 véh/h

$K / N = 13 / 18$: on insère 469 véh/h

$K / N = 5 / 7$: on insère 464 véh/h

N.B. la distinction entre les deux procédures de base n'a plus ici de sens puisque tous les véhicules sont en fait séparés de $d_{\text{sécu}}$.

8 PROCEDURES DE CONTROLE DU VEHICULE ENTRANT

8.1 Introduction

On se place ici dans le cas où le véhicule entrant est pris en charge complètement dans le cadre d'une procédure d'insertion automatisée. On suppose que, si nécessaire, un espace d'insertion a été ménagé dans le flux principal par l'une des politiques décrites précédemment.

Nous avons retenu d'une analyse de la littérature deux procédures susceptibles de s'appliquer au cas de la RAPL.

La première^{(1) (2)} propose une formulation et une solution au problème de la détermination de la loi de vitesse d'un véhicule désirant s'insérer dans un espace sur la voie principale. Cette approche unifie dans leur traitement différentes configurations géométriques de voie d'insertion en introduisant le concept de « virtual platooning » (ou d'insertion « virtuelle » préalable à l'insertion réelle). L'espace cible étant connu, le véhicule entrant va adapter sa vitesse à celle de cet espace. Cette approche requiert une coopération forte entre les véhicules, au moins au niveau de la rampe d'accès. Elle peut s'adapter à plusieurs formes de rampes d'accès, mais nécessite un équipement dans l'infrastructure (bornes magnétiques par exemple). Le choix de l'espace d'insertion s'y fait avant l'enclenchement des manœuvres.

Dans la seconde^{(3) (4)}, le comportement d'un véhicule est modélisé par un automate hybride qui spécifie le contrôle du véhicule en lois continues (lois d'accélération...), ainsi que son contrôle discret (changement d'états, c'est-à-dire enclenchement de manœuvres). L'automate autorise l'insertion par une politique de « céder le passage » sans autre formatage du flot en amont que le respect des distances de sécurité (ici un temps constant entre le passage de deux véhicules successifs en un point quelconque). La coopération entre véhicules est induite par le modèle proposé. Cette seconde approche peut être utilisée par des véhicules autonomes. La rampe d'accès a une forme bien définie (voie d'accélération parallèle). Au début de la phase d'accélération, le véhicule ne sait pas derrière quel véhicule de la voie principale il sera inséré.

⁽¹⁾] X.Y. LU et K.J. HEDRICK, *Longitudinal Control Algorithm for automated vehicle merging*, IEEE Conference on Decision and Control 2000, Sydney, 450-455.

⁽²⁾ X.Y. LU, H.S. TAN, S.E. SHLADOVER et K.J. HEDRICK, *Modeling, Design and Implementation of Longitudinal Control Algorithm for automated vehicle merging*, <http://www-path.eecs.berkeley.edu>

⁽³⁾ M. ANTONIOTTI, A. DESPHANDE et A. GIRAULT, *Microsimulation analysis of multiple merge junctions under autonomous AHS operations* <http://www-path.eecs.berkeley.edu>

⁽⁴⁾] A. GIRAULT, *Design of an hybrid controller for autonomous vehicles driving on automated highways*, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4286.html>

8.2 Exemple de loi de contrôle longitudinal en vitesse

8.2.1 Principe

L'objectif est de présenter une loi de contrôle longitudinal en vitesse pour un véhicule désirant s'insérer dans un flot de véhicules. Il y est supposé que lorsque la procédure d'insertion est enclenchée, l'espace destiné au véhicule entrant est déjà déterminé. Sa vitesse est elle aussi connue.

Est alors proposée une loi de vitesse pour le véhicule entrant telle que :

- l'insertion du véhicule peut être "virtuellement" réalisée avant l'insertion réelle (virtual platooning), c'est à dire qu'il existe un point avant le point où s'effectue réellement l'insertion, à partir duquel le véhicule peut suivre la même loi de vitesse que les véhicules sur la voie principale. Il sera alors inséré naturellement dans le flux de véhicules de la voie principale au point d'insertion réel. Ceci permet d'unifier le traitement des différentes configurations de rampe d'accès (en particulier en ce qui concerne la présence ou non d'une rampe d'accélération parallèle à la voie principale),
- le véhicule entrant adapte sa vitesse à celle des véhicules sur la voie principale,
- la loi de vitesse du véhicule entrant a les mêmes propriétés de continuité que celle des véhicules de la voie principale.

Au niveau de l'intersection où se fait l'insertion, trois bornes sont disposées : Q_0 à l'intersection des voies, Q_1 en amont de l'intersection, sur la voie principale, Q_2 en amont de l'intersection, sur la rampe d'accès (Fig.2).

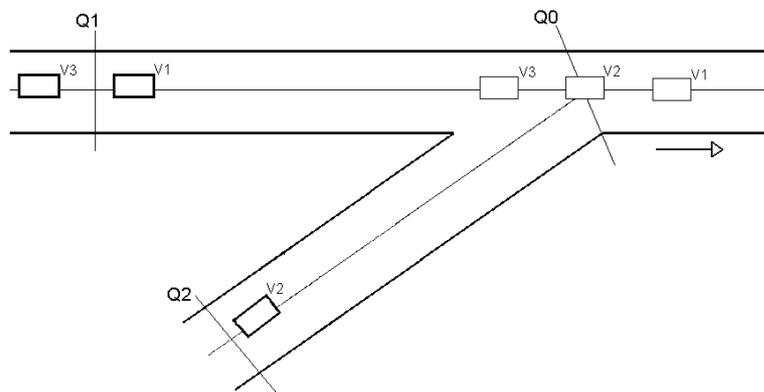


Figure 2 : une configuration de rampe d'accès

Si V_2 est le véhicule sur la rampe d'accès désirant s'insérer (véhicule entrant), et qu'il vise un espace d'insertion situé entre des véhicules V_1 (véhicule suivi) et V_3 (cf. figure 2), les manœuvres d'insertion seront enclenchées lorsque V_2 aura dépassé Q_2 et V_1 aura dépassé Q_1 (ils seront alors à des positions Q_2' et Q_1' entre Q_0 et respectivement Q_2 et Q_1).

On veut alors que, lorsque V_2 atteint Q_0 , il ait la même vitesse et la même accélération que V_1 , et que V_1 devance V_2 d'une distance égale à la longueur d'un véhicule plus la distance de sécurité.

Ces dernières conditions doivent être atteintes avant que V_2 atteigne Q_0 : auquel cas si, à partir de ce moment là, V_2 adopte la même loi de vitesse que V_1 , V_2 et V_1 vérifieront ces conditions lorsque V_2 atteindra l'intersection Q_0 . Ceci permet d'introduire le concept d' « insertion virtuelle » (*virtual platooning* dans ⁽²⁾) : on permet aux manœuvres de se terminer préalablement à l'instant de l'insertion réelle et, entre la fin des manœuvres et l'insertion réelle, le véhicule entrant se comporte comme un véhicule de la voie principale (comme s'il était inséré).

Ceci permet :

- d'autoriser une plus grande plage de solutions au problème de l'établissement de la loi de vitesse lors des manœuvres,
- de traiter indifféremment le cas où Q_0 est ponctuel du cas où Q_0 peut occuper une plage de positions plus vaste (par exemple si la rampe d'accès se termine par une voie d'accélération parallèle à la voie principale). Ce dernier cas se rapporte au premier en fixant Q_0 à la fin de la voie d'accélération.

Si on désigne par :

- t_{merg} , l'instant où est initiée la manœuvre,
 - T_{merg} l'instant où V_2 atteint Q_0 ,
 - $v_p(t)$, la vitesse des véhicules sur la voie principale,
 - $v(t)$, la vitesse effective du véhicule sur la rampe d'accès, $v_0 = v(t_{\text{merg}})$,
 - $v_d(t)$, la vitesse que l'on désire appliquer à ce véhicule afin de réaliser l'insertion.
- $d_{\text{para}} = Q'_1 Q_0 + l + d_{\text{séc}} - Q'_2 Q_0$, la différence des distances à parcourir par V_1 et par V_2
($d_{\text{séc}}$ est la distance de sécurité, l la longueur d'un véhicule),

Alors, sous les hypothèses que :

- la réponse à la commande est immédiate et parfaite (soit $v(t) = v_d(t)$),
- les longueurs de rampe sont suffisantes,
- le véhicule de tête sur la voie principale a une distance à parcourir plus grande que le véhicule devant s'insérer (c'est-à-dire qu'il a en moyenne une vitesse supérieure) soit $d_{\text{para}} > 0$,
- la vitesse sur la voie principale ne tend jamais, lors de l'insertion, vers la vitesse du véhicule entrant avant les manœuvres (c'est-à-dire qu'il y a toujours un saut de vitesse à effectuer),

il est possible de trouver un paramètre $\beta > 0$ et un instant t_v tels que la loi de vitesse $v_d(t)$ suivante appliquée au véhicule entrant assure l'insertion :

$$v_d(t) = (1 - \alpha(t))v_0 + \alpha(t)v_p(t) \text{ pour } t \in [t_{\text{merg}}, t_v];$$

$$v_d(t) = v_p(t) \text{ pour } t \in [t_v, T_{\text{merg}}]$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 \beta(t), \beta > 0,$$

$$\alpha_0(t) = \frac{\int_{t_{\text{merg}}}^t v_p(s) ds}{\int_{t_{\text{merg}}}^t v(s) ds + d_{\text{para}}}$$

t_v est donc l'instant où l'insertion est virtuellement réalisée (le véhicule entrant se comporte comme un véhicule de la voie principale jusqu'à atteindre Q0).

Le paramètre α représente le taux de complétion de la manœuvre au sens des vitesses ; il vérifie :

$$\alpha(t) = \frac{v_d(t) - v_0}{v_p(t) - v_0}, \text{ (cf. figure 3).}$$

doit donc être une fonction qui vaut 0 en t_{merg} et 1 en t_v . Ici α est une puissance positive du rapport : distance parcourue sur la voie principale depuis t_{merg} sur distance parcourue sur la rampe d'accès depuis t_{merg} + distance à parcourir sur la voie principale – distance à parcourir sur la rampe d'accès. Ce rapport représente quant à lui un taux de complétion de la manœuvre au sens des positions relatives des véhicules.

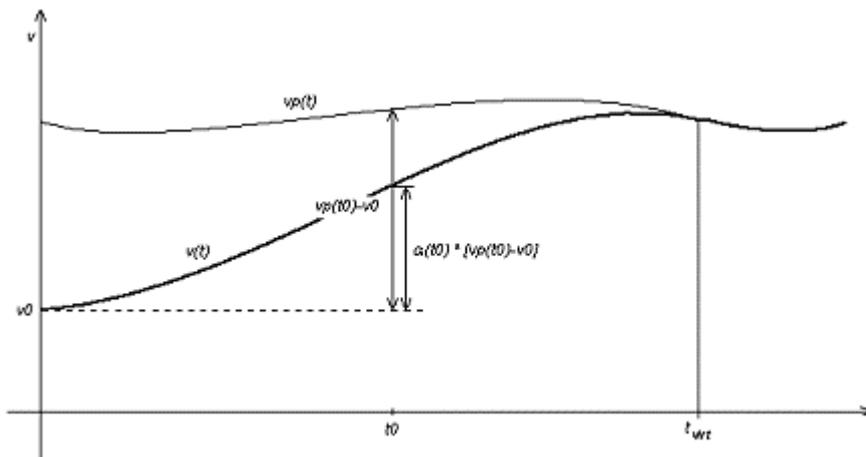


Figure 3 : solution pour une loi de vitesse adaptative

La vitesse à appliquer au véhicule entrant est donc calculée pas à pas (elle dépend de la distance parcourue depuis le début de la manœuvre par le véhicule entrant). Elle s'adapte aux variations de vitesse sur la voie principale, mais il faut veiller à ce que des variations non prévues n'invalident pas certaines hypothèses (en particulier que la rampe d'accès est suffisamment longue si l'insertion virtuelle est retardée...).

8.2.2 Evaluation

8.2.2.1 Cadre de l'évaluation.

Une simulation numérique de la loi de vitesse présentée précédemment a été réalisée, avec des paramètres pertinents pour des véhicules poids lourd, afin de contrôler la viabilité de cette procédure dans ces conditions. Cette étude se limite ici aux performances de cette procédure pour l'insertion d'un seul véhicule.

Les grandeurs à évaluer sont essentiellement :

- 1) la distance parcourue par le véhicule entrant durant la manœuvre (entre t_{merg} et t_v), qui minore la longueur de la rampe d'accès,
- 2) le temps nécessaire à l'insertion $t_{\text{merg}} - t_v$, qui peut limiter la capacité de la rampe.

On cherche à atteindre pour ces grandeurs les valeurs les plus petites possibles.

D'autre part, avant l'évaluation, il est nécessaire de fixer :

- 1) la loi de vitesse $v_p(t)$ suivie par le véhicule de tête sur la voie principale. Pour une évaluation simple, on prendra $v_p(t)$ constant.
- 2) le paramètre β . Lorsque celui-ci augmente dans les plages de valeurs qui permettent de terminer l'insertion, le temps et la distance nécessaires à l'insertion diminuent, mais le véhicule doit atteindre une accélération plus grande. Il faut donc choisir β le plus grand possible, sous contrainte de ne pas dépasser l'accélération maximale du véhicule.
- 3) le paramètre d_{para} , qui donne un ordre de grandeur de la distance en amont de l'entrée où la procédure de coordination va chercher un espace d'insertion. Plus d_{para} est grand, plus loin en amont de l'entrée le reformatage du flot de véhicules devra se faire, et donc plus grande sera la distance sur la voie principale sur laquelle le flot de véhicule sera perturbé ; c'est pourquoi on peut désirer limiter la grandeur de ce paramètre.

Les simulations sont réalisées avec :

- Accélération minimum : $a_{\text{min}} = -2 \text{ m.s}^{-2}$
- Accélération maximum : $a_{\text{max}} = \text{entre } 0.8 \text{ et } 2 \text{ m.s}^{-2}$
- Pas de calcul en temps : $\Delta t = 0.25 \text{ s}$
- L'insertion est considérée comme accomplie lorsque la distance entre le véhicule et sa position s'il était "virtuellement inséré" est inférieure à 0.5 m.

Pour d_{para} et v_p donnés, on choisit le β maximum tel que l'accélération ne dépasse jamais a_{max} .

On s'intéresse finalement plus particulièrement à l'influence de d_{para} .

En ce qui concerne la vitesse initiale du véhicule entrant, et la vitesse de croisière v_p des véhicules sur la voie principale, plusieurs couples intéressants sont retenus :

- départ arrêté pour le véhicule entrant, et $v_p = 90 \text{ km. h}^{-1}$ puis v_p plus grand. Ceci traduit un cas où, par exemple, un contrôle (feu...) régule l'arrivée des véhicules sur la rampe,
- départ lancé : $v_0 = 40 \text{ km.h}^{-1}$ et $v_p = 90 \text{ km. h}^{-1}$ puis $v_0 = 90 \text{ km. h}^{-1}$ et $v_p = 120 \text{ km. h}^{-1}$. Ce dernier cas correspond à un passage voie rapide vers autoroute.

8.2.2.2 Profils de vitesse

Avant toute observation sur l'efficacité en terme d'espace de ces manœuvres, l'examen du profil de vitesse adopté par le véhicule entrant (Figures 4 et 5) montre que ces manoeuvres sont relativement lentes.

Le véhicule garde une accélération faible pendant une première phase de la procédure, ce qui entraîne un démarrage lent en particulier lorsque le véhicule part arrêté.

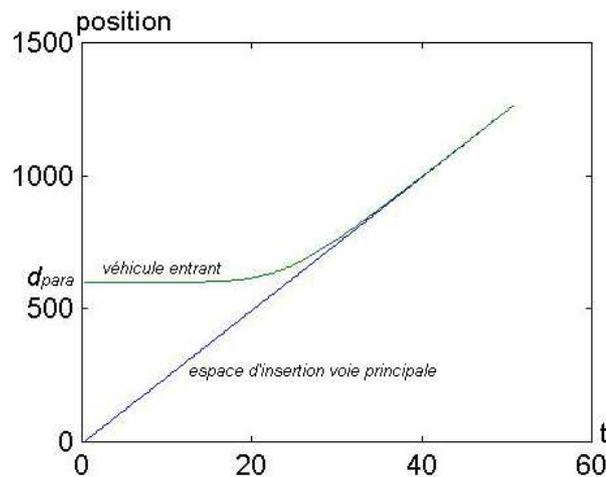


Figure 4 : profils de positions du véhicule entrant et de son espace d'insertion pour $d_{para} = 600 \text{ m}$, $v(t_{merg}) = 0 \text{ m.s}^{-1}$, et $v_p = 25 \text{ m.s}^{-1}$. L'origine correspond à la position de l'espace d'insertion à t_{merg} .

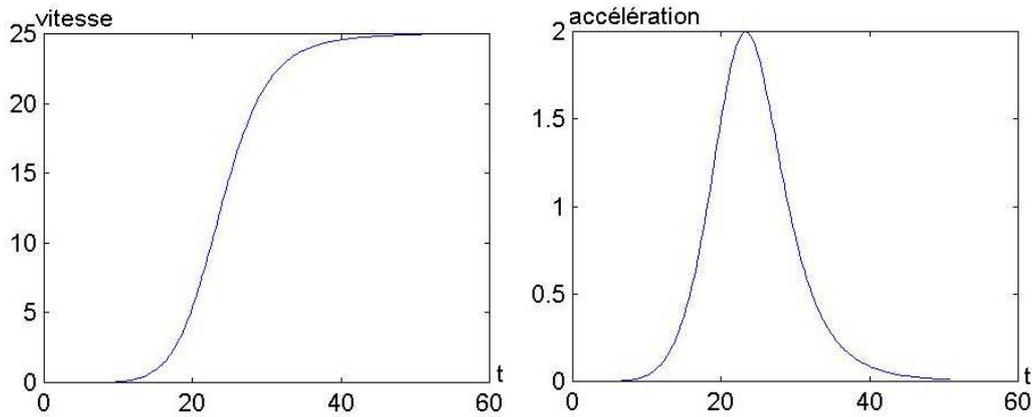


Figure 5 : profils de vitesse et d' accélération du véhicule entrant

pour $d_{para} = 600m$, $v(t_{merg}) = 0m.s^{-1}$, $v_p = 25m.s^{-1}$

D'autre part, le véhicule met un temps relativement long à être rattrapé par l'espace d'insertion, une fois une vitesse proche de v_p atteinte, du fait de la vitesse relative très faible de cet espace par rapport au véhicule : la phase de terminaison de la manœuvre est elle aussi assez lente.

Ainsi pourrait-on remettre en question l'efficacité de cette méthode par rapport à une loi de commande plus "abrupte" où l'accélération est sollicitée le plus possible dès le début de la manœuvre (palier d'accélération, ou palier de sa dérivée). Cependant, outre des propriétés de dérivabilité qui répondent à des critères de confort, elle présente la possibilité d'adaptation à d'éventuelles variations de $v_p(t)$ - qui est son principal intérêt. Cette adaptabilité n'a pas été mise en valeur par l'hypothèse simplificatrice d'une vitesse localement constante sur la voie principale. Par la suite, il serait intéressant d'effectuer des tests avec d'autres expressions de $v_p(t)$, ou de tester l'influence sur les performances d'"accidents" de variation de v_p .

8.2.2.3 Variation de performances en fonction de d_{para} . Ordres de grandeur.

On s'intéresse aux variations des performances de la manœuvre (distance et temps d'insertion) en fonction de d_{para} ; ce dernier en effet, est un paramètre sur lequel il sera possible d'influer en manipulant la position des bornes ou en ajustant les procédés de synchronisation des véhicules sur les deux voies. Il est souhaitable cependant de ne pas autoriser à d_{para} des valeurs trop élevées, qui signifient sur la voie principale une préparation de l'insertion (ménagement des espaces, etc.) très en amont de l'intersection des voies.

La distance et le temps d'insertion (D_{inser} et t_{inser} respectivement) commencent par décroître très fortement lorsque d_{para} augmente, ensuite leurs taux de variation s'atténuent.

Dans le cas d'un départ arrêté du véhicule entrant (Fig. 6), D_{inser} continue de décroître, plus faiblement, pour les grandes valeurs de d_{para} (il n'atteint pas de minimum dans les plages de d_{para}

envisagées). Il s'agit donc de faire un compromis en D_{inser} et d_{para} . Le temps d'insertion atteint un minimum.

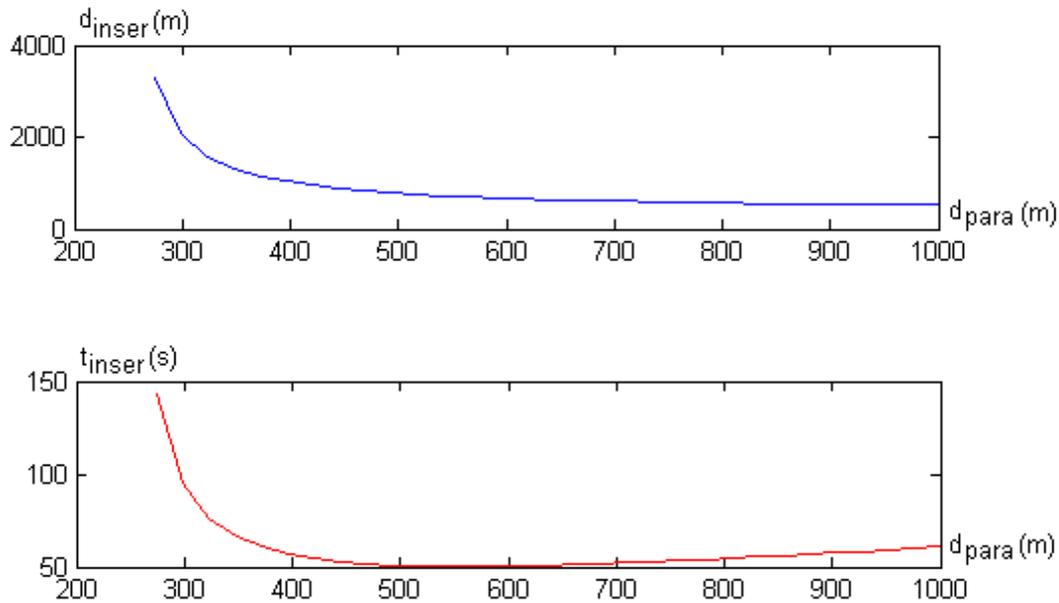


Figure 6 : Variation de D_{inser} (en haut) et t_{inser} (en bas) en fonction de d_{para} ,

$$\text{pour } v_p = 90\text{km.h}^{-1}, v_0 = 0\text{km.h}^{-1}$$

Lorsque le véhicule entrant commence les manœuvres avec une vitesse non nulle (Fig. 7), D_{inser} et t_{inser} présentent tous deux un minimum, pour des valeurs différentes de d_{para} . L'insertion demande bien entendu moins de temps et de distance dans ce cas que pour un départ arrêté, mais le paramètre d_{para} y sera a priori plus difficile à contrôler.

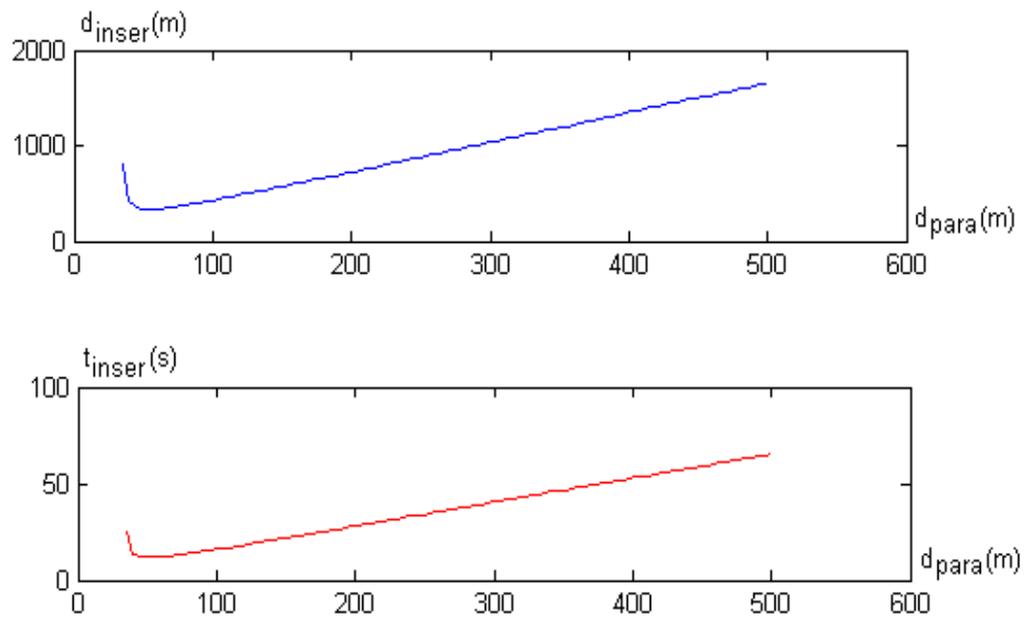


Figure 7 : Variation de D_{inser} (en haut) et t_{inser} (en bas) en fonction de d_{para} ,

pour $v_p = 120\text{km.h}^{-1}$, $v_0 = 90\text{km.h}^{-1}$

Quelques valeurs de D_{inser} et t_{inser} pour chaque couple v_0 - v_p sont données dans le tableau suivant :

v_0 (km.h ⁻¹)	v_p (km.h ⁻¹)	d_{para} (m)	D_{inser} (m)	t_{inser} (s)	
0	90	300	2060	95	
		400	1020	57	
		550	713	50	<i>temps d'insertion min.</i>
		900	541	57.5	
0	120	500	5750	190	
		1000	1401	72	
40	90	100	1087	47.5	
		165	435	24	<i>temps d'insertion min.</i>
		210	424	25.5	<i>dist. d'insertion min.</i>
		500	594	43.5	
90	120	35	800	25	
		50	335	12	<i>temps d'insertion min.</i>
		55	338	12	<i>dist. d'insertion min.</i>
		300	1036	40.5	

Tableau 1 : valeurs de D_{inser} , t_{inser} , pour quelques triplets v_0 , v_p , d_{para} .

On constate qu'en terme d'espace et de temps nécessaire, arrêter les véhicules avant insertion lorsque la vitesse de croisière sur la voie principale est de 120 km. h⁻¹ est impraticable.

En ce qui concerne les autres couples v_0 - v_p envisagés, de bonnes performances sont obtenues ; cependant, en particulier lorsque v_0 est non nulle, la situation la meilleure peut facilement être dégradée par une dispersion de d_{para} , du fait de la variation plus rapide de d_{para} autour de son minimum. Par exemple, un passage de 90 à 120 km. h⁻¹ affiche les meilleurs minima (ce qui est normal : il s'agit du cas des vitesses les plus élevées et du saut de vitesse le plus faible) mais une

différence de d_{para} de 15-20m avec la situation la meilleure peut provoquer une augmentation de D_{inser} de 500m. Ainsi, la taille de rampe minimum suffisante à l'insertion dépend de la précision avec laquelle on peut contrôler le paramètre d_{para} .

8.3 Exemple de contrôle par un automate hybride

Le modèle proposé dans ⁽³⁾ ⁽⁴⁾ présente un point de vue différent en ce qui concerne la synchronisation des véhicules. On considère un segment d'autoroute pour lequel les rampes d'accès présentent une section parallèle à la route et sur laquelle un véhicule peut adapter sa vitesse et sa position avant de changer de voie pour réaliser une insertion. Les véhicules sont équipés de capteurs, qui permettent à un véhicule donné de détecter ses prédécesseurs et suivants immédiats, sur sa voie et l'éventuelle voie voisine, avec une portée de détection donnée (Fig. 8).

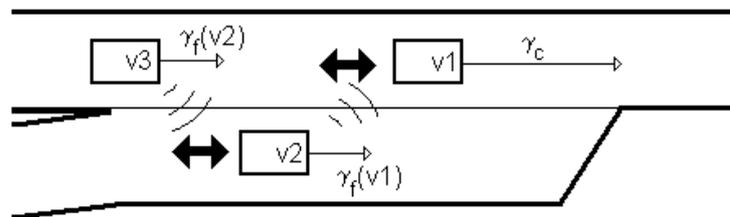


Figure 8 :Principe de l'insertion

Le comportement du véhicule est modélisé par un automate hybride (Fig. 9).

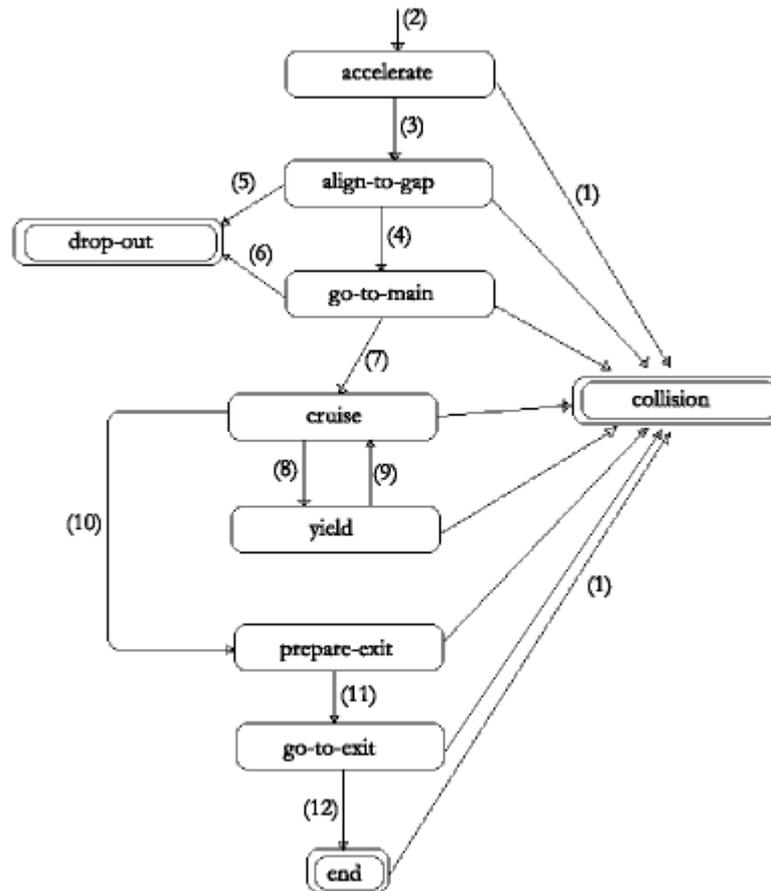


Figure 9 : automate hybride de contrôle d'un véhicule

Les variables caractéristiques (position, vitesse...) du véhicule sont soumises à des lois de variation qui dépendent de l'état courant de l'automate pour ce véhicule, les transitions entre états s'effectuant lorsque ces variables vérifient certaines conditions (Fig 10).

accelerate est l'état d'un véhicule sur la rampe d'accès avant d'arriver sur le tronçon parallèle où il pourra s'insérer ;

align-to-gap est l'état d'un véhicule sur ce tronçon parallèle qui ajuste sa vitesse et sa position à l'espace d'insertion sur la voie voisine ;

go-to-main est la manœuvre latérale de changement de voie en direction de la voie principale ;

drop-out est l'état d'un véhicule qui n'a pas pu s'insérer sur le tronçon parallèle. Ce véhicule sort de la simulation ;

cruise est l'état d'un véhicule circulant sur la voie principale et aux abords d'une entrée si aucun véhicule ne se présente pour s'insérer

yield est l'état d'un véhicule sur la voie principale devant céder le passage à un véhicule désirant s'insérer

prepare-exit est l'état d'un véhicule qui se prépare à changer de voie pour prendre une rampe de sortie

Figure 10 : description des principales fonctions de l'automate

La commande se fait en accélération. Selon l'état de l'automate dans lequel le véhicule se trouve et ce que renvoient les détecteurs, le véhicule peut être amené à adopter deux types d'accélération

- une accélération dite de vitesse : le véhicule cherche à atteindre une vitesse de croisière v_c . Un contrôle proportionnel est retenu : pour un véhicule de vitesse v ,

$$a_c = \mu.(v_c - v)$$

- une accélération de poursuite : le véhicule accélère de manière à calquer sa vitesse sur le véhicule le précédant et à établir une certaine distance avec celui-ci. Cette distance peut être définie selon différents critères : distance constante, temps constant entre le passage de deux véhicules, où distance sécuritaire pour laquelle un freinage brusque du véhicule de tête ne cause pas de collision. Dans ⁽⁴⁾ est présentée une solution pour un critère de temps constant entre deux véhicules : pour un véhicule à vitesse v suivant un véhicule de vitesse v_f à la distance d ,

$$a_f = \frac{v_f - v}{h} + \lambda \left(\frac{d}{hv} - 1 \right)$$

où h est l'intervalle de temps désiré entre le passage de deux véhicules. Le terme d/hv correspond au rapport de l'intervalle de temps réel entre les deux véhicules sur l'intervalle de temps désiré ; on désire donc qu'il soit égal à 1.

De manière générale, le véhicule choisira l'accélération la plus basse entre son accélération de vitesse (calculée sur la vitesse de croisière du tronçon) et, s'il détecte des véhicules devant lui, l'accélération de poursuite (sur le véhicule devant lui sur la même voie et, s'il désire s'insérer, ou que des véhicules devant lui désirent s'insérer, l'accélération de poursuite sur le véhicule devant lui sur l'autre voie). Ainsi, son comportement est toujours dicté par ce qu'il détecte devant lui et correspond à une stratégie de "céder le passage" (les véhicules derrière ajustent leur vitesse à celle du véhicule devant).

Les espaces nécessaires à l'insertion se créent par ralentissement du véhicule entrant (si un véhicule est devant lui sur la voie principale) et du véhicule derrière lui sur la voie principale. La méthode présentée rappelle le comportement d'un conducteur humain aux alentours d'une rampe d'accélération.

Ici, le choix de l'espace est simultané et indissociable de la manœuvre d'insertion, alors que, pour la solution présentée au paragraphe 7.2, il est réalisé au préalable et en est indépendant.

9 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude suggère quelques procédures simples d'insertion de nouveaux véhicules dans un flot constitué et fournit quelques données numériques d'ordre de grandeur pouvant servir de base à une évaluation plus fine de ces procédures en terme de dilemme coût – sécurité.

Ce travail pourra servir de base à une analyse plus fine en essayant de s'approcher au mieux des conditions réelles de terrain en ce qui concerne en particulier :

- la structure du flot principal
- les débits attendus et les matrices origine – destination prévisibles
- les conditions techniques réelles de fonctionnement des PL du futur (capacité d'accélération et de freinage, consommation en fonction du régime, ...)
- les performances des capteurs embarqués ou fixes et des capacités de communication

Ceci devrait permettre de dégager les meilleures stratégies d'insertion en fonction des circonstances et de dimensionner les entrées / sorties.

FAISABILITE D'UNE ROUTE AUTOMATISEE A UNE VOIE DE CIRCULATION : QUELQUES SIMULATEURS

1 RESUME

Le travail a consisté à définir différents scénarios pour le trafic poids lourds et à écrire les simulateurs correspondants. Ces simulateurs sont écrits en Scilab et les paramètres principaux peuvent être choisis par l'utilisateur.

Ces scénarios vont du système actuel contrôlé à l'automatisation complète des poids lourds.

La donnée commune pour les différentes situations est un site dédié : une autoroute à une voie avec bande d'arrêt d'urgence. Les vitesses sont de 90 km/h ou 110 km/h et les interdistances sont de 45 m, 50 m ou 60 m selon les scénarios.

Le but de ces scénarios est évidemment d'être utilisés avec des jeux de paramètres différents correspondant à des données réalistes, les résultats étant exploités par des constructeurs d'équipements, des économistes...

De ce point de vue l'intérêt de la simulation est de prendre en compte les phénomènes non stationnaires, les différentes non-linéarités (effet de seuil, retards,...), les erreurs de mesure.

Avant cette utilisation le développement des simulateurs a apporté des indications sur les modes de trafic possibles et leur évolution progressive. L'écriture d'un simulateur nécessite en particulier de bien préciser les variables nécessaires et la manière de les obtenir en pratique

(avec les erreurs possibles ou leur absence temporaire).

Cinq scénarios différents ont été envisagés.

□ *Scénario 1 : situation actuelle améliorée.*

La conduite reste manuelle et les véhicules indépendants avec la seule contrainte de respecter les interdistances. La simulation pose le problème de l'estimation de l'espace d'insertion sur la voie principale par le chauffeur entrant, ce qui nécessite de prendre des marges de sécurité très larges. Pour résoudre ce problème, la vitesse étant constante, on choisit de réguler les entrées. Un feu tricolore à chaque entrée du système autorise ou refuse l'entrée au poids lourd. Ceci signifie qu'un système de détection (portique ou balise) est installé en amont sur la voie de l'autoroute et le feu passe au vert si la distance entre 2 poids lourds est suffisante pour permettre l'insertion d'un véhicule. La simulation suggère de rajouter un autre système de régulation : on fournit une estimation de l'interdistance au chauffeur en lui autorisant une petite modulation de vitesse, ce qui permet d'améliorer considérablement le débit et/ou la sécurité. On propose également une aide à l'insertion avec un profil de trajectoire en vitesse pour avoir la bonne vitesse d'insertion en respectant les distances (rampe d'accès et interdistance).

Les 3 ajouts techniquement très simples fournissent le premier mode de trafic sur un site dédié vers une automatisation plus complète.

□ **Scénario 2 : plateforme de concentration.**

Ce système sera utilisé pour les entrées dans le scénario suivant. On suppose que les camions arrivent avec un débit de l'ordre de 300 à 400 pl/h à une plateforme ; si cette plateforme est située à une entrée sortie d'autoroute, le débit peut atteindre 600 à 900 pl/h. Chaque camion se positionne dans une file d'attente en fonction de sa destination et/ou de son choix d'aire de repos. Ces files représentent donc des pelotons qui vont entrer sur la voie autoroutière réservée. Le départ sera déclenché lorsqu'un peloton aura atteint une taille donnée (4 poids lourds) ou lorsque le temps d'attente du premier arrivé dans une file a atteint une limite donnée. Ces pelotons roulent ensuite à 110 km/h. Dans le peloton la distance entre les véhicules est de 15 m.

Ce scénario pose des problèmes de réglage de paramètres lorsque le trafic d'entrée devient très faible ou lorsque les taux des demandes des destinations sont très différents.

□ **Scénario 3 : pelotons statiques.**

On suppose que chaque entrée du système est alimentée par une plateforme de concentration. Les pelotons sont séparés par une distance de 150 m. Le camion de tête du peloton est conduit manuellement et les suiveurs sont en automatique. Tous les camions d'un même peloton sortent ensemble.

Les systèmes de commande (feu de régulation, insertion pilotée et information sur les interdistances) du scénario 1 sont indispensables. Ce scénario présente 2 inconvénients : le problème des plateformes de concentration en cas de trafic faible et un problème d'insertion en cas de trafic chargé. Le point le plus délicat concerne l'insertion d'un peloton qui peut atteindre 150 m de long, ce qui nécessite un espace libre très important et qui suggère la nécessité de gérer les distances entre pelotons.

□ **Scénario 4 : pelotons dynamiques.**

Le système est alimenté comme dans le scénario 1, en manuel avec régulation des entrées mais cette régulation pourra être plus compliquée si on le souhaite. On peut moduler les distances d'insertion suivant les situations : 200 m après un peloton complet sur la voie principale et 100 m si le peloton est incomplet (car il y a possibilité d'attelage). Les véhicules disposent d'informations sur ceux qui les précèdent. Si un véhicule suit un peloton incomplet et si sa distance avec leur prédécesseur est inférieure à une limite donnée, il peut augmenter sa vitesse, rattraper le véhicule précédent et se mettre en attelage virtuel automatique.

Ce scénario évite les inconvénients des 2 précédents ; c'est une solution très souple, quelle que soit la densité du trafic, qui est la suite logique du scénario 1. Les pelotons dynamiques peuvent coexister avec des poids lourds isolés non équipés pour l'attelage électronique mais satisfaisant simplement les conditions du scénario 1. Le seul point à régler est l'information de l'acceptation ou refus de l'attelage.

□ **Scénario 5 : voie automatisée.**

Dans ce cas un véhicule arrivant à une entrée passe en mode automatique et devient totalement commandé par le système. L'entrée est contrôlée par un feu de trafic. Ce feu est généralement vert car les poids lourds entrant sont prioritaires. Ce feu passe au rouge lorsque, sur la voie principale, ou bien le nombre de poids lourds en phase de freinage atteint un nombre donné, ou bien lorsqu'un poids lourd atteint une vitesse minimale.

Ce scénario est donc une suite naturelle du précédent; son avantage essentiel est de maximiser la sécurité.

We have defined different scenarios for the traffic of trucks starting with a situation similar to the usual one (manual driving) and increasing the control capabilities to the fully automated road. We have developed the simulations tools for these different cases. These tools are written in Scilab and allow the user to modify the parameters and to check the corresponding results.

The road is supposed to be a new one dedicated to the traffic of trucks; it is composed of a single lane with a hard shoulder strip.

A basic component is a part of linear road with output-input equipment.

The major parameters are:

- The distribution of trucks types (length, load, braking capabilities...)
- The speed for each scenario (90 or 110 km/h).
- The distances between trucks: for two isolated trucks, inside a platoon.
- The errors on measurement of parameters.

The goal of these scenarios is their use with different parameter choices and the interpretation of the corresponding results by specialists of highways, traffic economy...

The main interest of the simulation tool is to take into account the non stationarities, non linearities (due to inequalities, bounds, delays...), and the measurement errors.

The development of simulation tools gives many ideas on possible traffic organizations, and the evolution from the usual manual traffic to the full automatization. This is due to the fact that the simulation needs to precisely define the variables, their availability, the possible errors...

Five scenarios have been considered.

- **Scenario 1:** present situation with some slight modifications.

The trucks are manually driven and are independent. They simply have to respect the distance between each other. The speed is constant. To improve the performance of the system in case of heavy traffic we add a simple control for the entries: a traffic light allows or denies the entrance to a truck. This means that a detection system on the main way (prior to the entry) identifies if the distance is sufficient for a new truck in the flow. As the trucks are manually driven, the minimal distance for the input of a truck will be equal to the sum of the maximal length of trucks, twice the interdistance and a security length. An idea is to add another control system: give a nominal trajectory to the driver for an optimal insertion (time-distance-speed). We also propose to add an information system for the distance between trucks on the main way.

With 3 simple control systems we have a system with a good sub-optimality which is the first step towards automatization.

- **Scenario 2:** merging platform.

This system is used to aggregate trucks in platoons. We are making static platoons and this system will be used for all the entries of next scenario. We suppose that the trucks arrive to this platform, about 300 trucks/h for an entry on a usual road; but it is possible to have such a platform with an output-input of the system with a rest area where trucks leave the main way for a rest period or for choosing another platoon and in this case the flow should be 600 or 900 trucks/h. At this platform, a truck chooses a lane corresponding to a destination and when the number of trucks in a lane is 4, these trucks will start as a platoon where the first truck is manually driven. The speed of the platoons is 110 km/h and the distance between trucks inside the platoon is 15m.

The difficulty for this case is the choice of values for the parameters when the traffic becomes weak or if the demands for the destinations are of different magnitudes.

- **Scenario 3:** static platoons.

All the entries are supplied by merging platforms. The platoons are separated by a fixed given distance (e.g. 150m). For an output a platoon cannot be split: all the trucks of a platoon leave simultaneously the main way.

The control systems of scenario 1 (input regulation, nominal trajectory for the entry, information on distance between trucks) are essential but there are 2 major problems: how to manage the merging platforms in case of weak traffic, how to manage the input in case of heavy traffic. This last point is critical because the length of platoons can exceed 150m; we need to control the positions of platoons on the main way.

- **Scenario 4:** dynamical platoons.

The inputs are similar to the scenario 1 with manually driven trucks, controlled with a traffic light. The control may be more complicated than in the previous case and may depend on the number of trucks in the platoon on the main way. We can for example choose a distance of 200 m after a full platoon of 4 trucks but if the platoon is not full, this distance can be reduced to 100 m because the entering truck will be added to the platoon. The speed of the platoons is 110 km/h. On the main way, the trucks are supposed to know some information about other trucks upstream and downstream. In our case, if the distance with the predecessor is less than a given distance, a truck can speed up and make a virtual automatic hitching up with this predecessor.

This scenario is a flexible solution which is a direct extension of scenario 1. Dynamical platoons can be mixed with isolated trucks without the necessary equipment for electronic hitching (but with the same equipment as for scenario 1). The only really new point is the transmission of the information for the possible hitching.

- **Scenario 5:** fully automated road.

A truck at the entry of the system switches to the automatic mode and is fully controlled by the system. There is a traffic light at the entry. This light is quite always green because the priority is given to the entrance. The light turns to red if the main way is saturated: there is a bound on the number of trucks on the main way supposed to speed down, making possible the entry of a truck and a bound on the minimal speed on the main way.

This scenario is the extension of the previous one. Its main advantage is to maximize the security.

2 INTRODUCTION

Le travail a consisté à définir différents scénarios pour le trafic poids lourds et à écrire les simulateurs correspondants. Ces simulateurs sont écrits en Scilab et les paramètres principaux peuvent être choisis par l'utilisateur.

Ces scénarios vont du système actuel contrôlé à l'automatisation complète des poids lourds.

La donnée commune pour les différentes situations est un site dédié : une autoroute à une voie avec bande d'arrêt d'urgence. Les vitesses sont de 90 km/h ou 110 km/h. La distance entre les poids lourds conduits manuellement sont de 45 m, 50 m ou 60 m selon les scénarios. La distance entre les poids lourds individuels contrôlés, isolés ou en peloton, est de 15 m.

Les autres paramètres sur lesquels on peut jouer sont les débits d'entrée sortie, les longueurs et les types des poids lourds et les erreurs de mesure.

3 SCENARIO 1 : CONDUITE MANUELLE, REFERENCE DE BASE

C'est la situation actuelle améliorée. La conduite reste manuelle et les véhicules indépendants. La vitesse étant constante, on régule les entrées. Un feu tricolore à chaque entrée du système autorise ou refuse l'entrée au poids lourd. Ceci signifie qu'un système de détection (portique ou balise) est installé en amont sur la voie de l'autoroute et le feu passe au vert si la distance entre 2 poids lourds est suffisante pour permettre l'insertion d'un poids lourd. Le système de détection n'a pas d'information sur le poids lourd entrant. Pour autoriser l'entrée il faut donc que la distance disponible entre 2 poids lourds sur la voie principale soit la somme de 2 fois la distance de sécurité, de la longueur maximale des poids lourds autorisés et d'une marge de sécurité supplémentaire pour la manœuvre d'insertion en mode manuel. On peut simuler une situation sans feu de régulation en prenant une marge de sécurité importante. Ceci vient du fait que, dans ce cas, le chauffeur doit estimer visuellement la distance disponible avant de commencer sa manœuvre.

On peut envisager un autre scénario intermédiaire entre la situation actuelle et un contrôle permanent des véhicules. C'est le cas d'une insertion manuelle régulée par un feu d'entrée. Le système de détection dispose de l'information sur la longueur du véhicule entrant. Le véhicule entre avec la distance minimale nécessaire (2 fois la distance de sécurité plus la longueur du véhicule). Sur la voie principale le véhicule dispose d'un système identifiant la distance avec le véhicule précédent et fournit au chauffeur les informations de régulation sur sa vitesse pour se situer à la distance nominale du prédécesseur. Le feu de régulation est un système facile à implémenter avec les moyens actuels ; l'information sur l'interdistance est une simple aide à la conduite. Ces deux commandes qui sont de légères modifications de la situation actuelle permettent d'optimiser le débit.

On montre ci-dessous des exemples de fenêtres de dialogue du simulateur permettant à l'utilisateur de choisir les paramètres de simulation.

The dialog box 'VITESSES' contains two input fields: 'Vitesse nominale (m/s)' with the value 25 and 'Vitesse maximale (m/s)' with the value 28. At the bottom are 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Figure 1 : vitesses

The dialog box 'FLOTS (camions/h)' contains a table with the following data:

	Entrée	Sortie 1	Sortie 2	Sortie
Entrée	900	300	200	400
Entrée 1	300	0	150	150
Entrée 2	300	0	0	300

At the bottom are 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Figure 2 : matrice entrées sorties

The dialog box 'DONNEES DES PELOTONS' contains one input field: 'Distance minimale entre véhicules (m)' with the value 60. At the bottom are 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Figure 3 : distance réglementaire entre véhicules

The dialog box 'DISTRIBUTION DES TYPES DE CAMIONS' contains a table with the following data:

	Type 1	Type 2	Type 3
Longueur (m)	9.26	22.5	24.75
Pourcentage (%)	37	50	8

At the bottom are 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Figure 4 : types de poids lourds

Le fichier suivant est un résumé des différents paramètres de l'exemple simulé. Dans ce cas le choix des paramètres a conduit à une demande trop importante ne permettant pas d'écouler la demande de trafic à l'entrée numéro 2.

Troncons route

6000.000 12000.000 500.000

Vitesse nominale (m/s)

25.000

Vitesse maximale (m/s)

28.000

Matrice entrees/sorties

900.0	300.0	200.0	400.0
300.0	0.0	150.0	150.0
300.0	0.0	0.0	300.0

Distance minimale entre véhicules (m)

Distribution des types de camions

Longueur (m)

9.260 22.500 24.750 37.500

Pourcentage

37.000 50.000 8.000 5.000

Paramètres de la simulation

Pas de temps (s)

0.400

Duree de la simulation (s)

3600.000

Impossible assurer trafic à entrée : 2

4 SCENARIO 2 : PLATE FORME DE CONCENTRATION

Ce système sera utilisé pour les entrées dans le simulateur suivant. On suppose que les camions arrivent à une plateforme (de l'ordre de 300 à 400 pl/h) et que chaque camion se positionne dans une file d'attente en fonction de sa destination et/ou de son choix d'aire de repos. Les arrivées sont simulées par des processus poissonniens (ce qui est le cas pour toutes les simulations de débits d'entrées sortie). Le temps d'insertion dans une file d'attente est simulé par une variable aléatoire gaussienne de moyenne et d'écart type donnés. Une matrice fournit les ventilations des destinations et des types de véhicules.

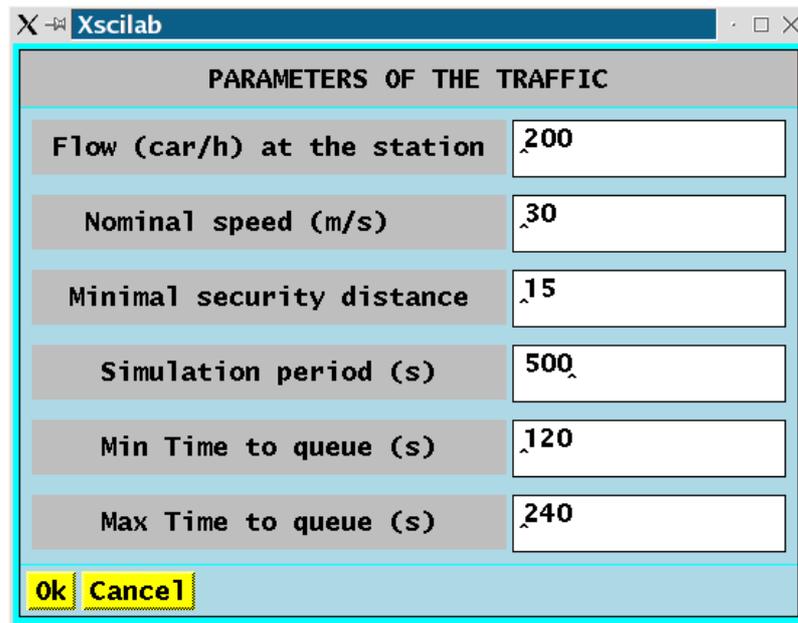
Les files d'attente représentent donc des pelotons en formation qui vont entrer sur la voie autoroutière réservée. Le départ sera déclenché lorsqu'un peloton aura atteint une taille donnée (4 poids lourds) ou lorsque le temps d'attente du premier arrivé dans une file aura atteint une limite donnée. Ces pelotons roulent ensuite à 110 km/h. Le peloton est guidé par le camion de tête qui est conduit manuellement. Les poids lourds suivants sont en mode automatique avec un attelage virtuel. Dans le peloton la distance entre les véhicules est de 15 m.

Ce système de formation de pelotons peut être plus élaboré pour utiliser au mieux les temps de conduite respectant la législation : par exemple un chauffeur dont le temps de conduite est proche de la limite autorisée peut se mettre en attente pour refuser la position de tête et se placer en position de suiveur.

On montre ci-dessous les données entrées par l'utilisateur.

INPUT ON THE MAIN WAY SELECTION OF FLEET				
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Length (m)	9.26	22.5	24.75	37.5
Mass (t)	15	35	37	45
Percentage	37	50	8	5
Destination 1	18.181818	18.181818	18.181818	18.181818
Destination 2	13.636364	13.636364	13.636364	13.636364
Destination 3	4.5454545	4.5454545	4.5454545	4.5454545
Destination 4	4.5454545	4.5454545	4.5454545	4.5454545
Destination 5	59.090909	59.090909	59.090909	59.090909

Figure 5 : ventilation types de poids lourds – destinations

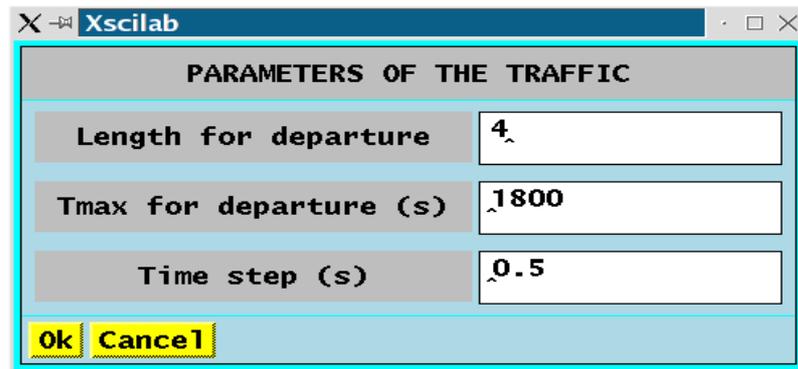


The screenshot shows a dialog box titled "PARAMETERS OF THE TRAFFIC" with the following parameters and values:

Parameter	Value
Flow (car/h) at the station	200
Nominal speed (m/s)	30
Minimal security distance	15
Simulation period (s)	500
Min Time to queue (s)	120
Max Time to queue (s)	240

Buttons: Ok, Cancel

Figure 6 : données arrivée à la station



The screenshot shows a dialog box titled "PARAMETERS OF THE TRAFFIC" with the following parameters and values:

Parameter	Value
Length for departure	4
Tmax for departure (s)	1800
Time step (s)	0.5

Buttons: Ok, Cancel

Figure 7 : taille des pelotons - temps d'attente limite

Ci-dessous deux instantanés pendant le fonctionnement du simulateur :

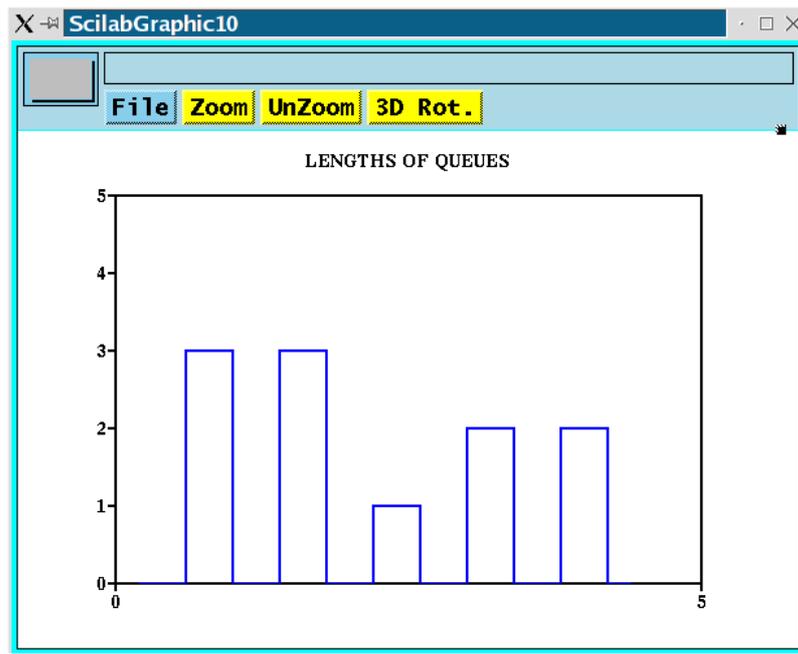


Figure 8 : visualisation des longueurs de pelotons en formation

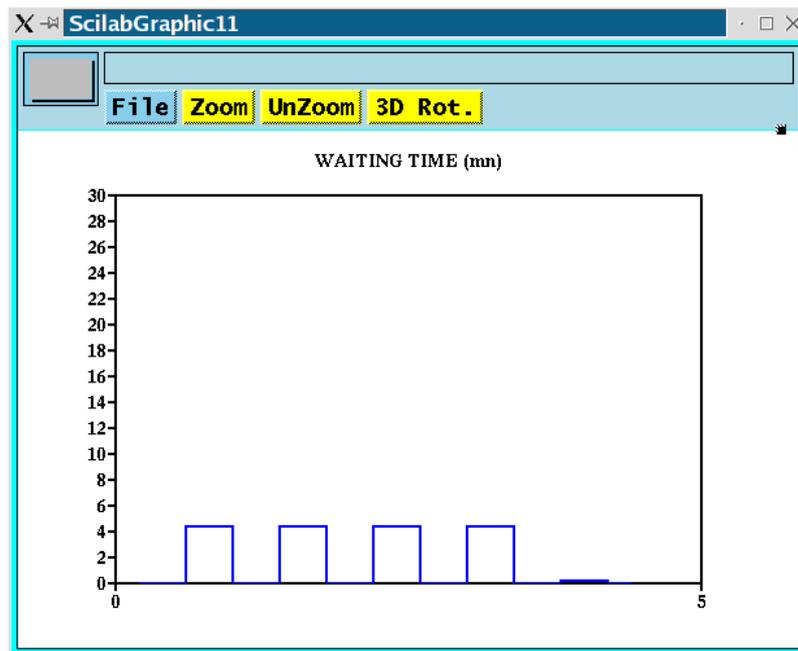
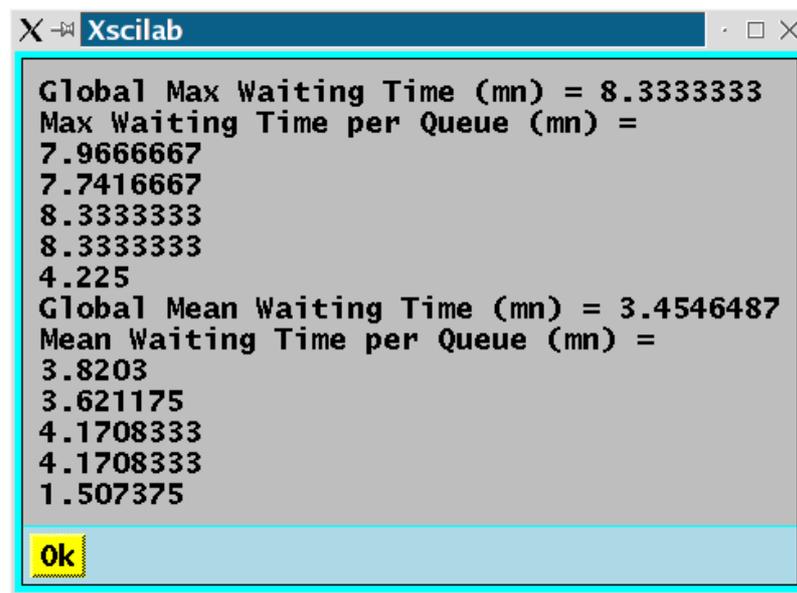


Figure 9 : visualisation des temps d'attente par destination

Ci-dessous un résultat de synthèse à l'issue de la simulation :



```
Global Max Waiting Time (mn) = 8.3333333
Max Waiting Time per Queue (mn) =
7.9666667
7.7416667
8.3333333
8.3333333
4.225
Global Mean Waiting Time (mn) = 3.4546487
Mean Waiting Time per Queue (mn) =
3.8203
3.621175
4.1708333
4.1708333
1.507375
Ok
```

Figure 10 : maxima et moyennes des temps d'attente sur une simulation

5 SCENARIO 3 : PELOTONS STATIQUES DE TYPE « CHAUFFEUR »

On suppose que chaque entrée du système est alimentée par une plateforme de concentration. Les pelotons sont séparés par une distance de 150 m. Le camion de tête du peloton est conduit manuellement, les suiveurs sont en automatique.

Dans ce cas les entrées doivent nécessairement être régulées par un feu tricolore car les distances d'insertion deviennent très importantes. En l'absence d'information sur le peloton entrant, la distance d'insertion est égale à la somme de 4 x (longueur maximale des véhicules + 15 m) et 2 fois 150 m qui est la distance de sécurité entre 2 pelotons. Ceci peut donc représenter un intervalle d'insertion de l'ordre de 450 m. Dans ce cas la bretelle de raccordement doit être de grande longueur et il est très important de savoir si l'on dispose d'une mesure de la longueur du peloton entrant pour que le feu de trafic soit optimisé, ce qui est supposé dans les simulations.

Les fenêtres de dialogue de ce simulateur sont similaires à celles du simulateur suivant.

6 SCENARIO 4 : PELOTONS DYNAMIQUES

Le système est alimenté comme dans le scénario 1, en manuel avec régulation des entrées, mais cette régulation pourra être plus compliquée si on le souhaite. On peut moduler les distances d'insertion suivant les situations : 200 m après un peloton complet sur la voie principale et 100 m si le peloton est incomplet (car il y a possibilité d'attelage). Il n'est pas nécessaire de prévoir une distance de sécurité supplémentaire pour la manœuvre d'insertion. Les véhicules disposent d'informations sur ceux qui les précèdent. Si un véhicule suit un peloton incomplet et si sa distance avec son prédécesseur est inférieure à une limite donnée, il peut augmenter sa vitesse, rattraper le véhicule précédent et se mettre en attelage virtuel automatique.

Dans ce scénario, les poids lourds sortent individuellement en avertissant les autres membres du peloton, en particulier si le poids lourd de tête sort, le suivant passe en conduite manuelle. Il n'y a pas de manœuvre d'attelage virtuel entre une sortie et l'entrée immédiate suivante. Il n'y a pas d'anticipation sur les sorties éventuelles pour faire entrer de nouveaux poids lourds. Les poids lourds entrant ne sont pas prioritaires, ce qui signifie qu'il n'y a pas de ralentissement sur la voie principale en dehors des phases d'attelage pour le véhicule qui s'attelle.

Les poids lourds et les pelotons ne se doublent pas et ceci est valable pour tous les simulateurs.

Ci-dessous, quelques fenêtres d'entrée du simulateur :

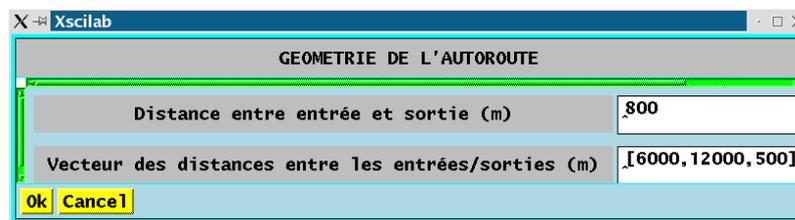


Figure 11 : route et bretelles d'accès

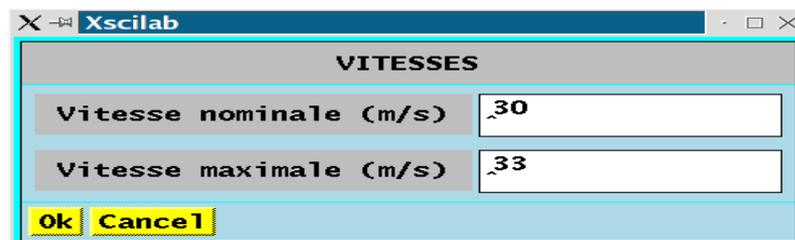
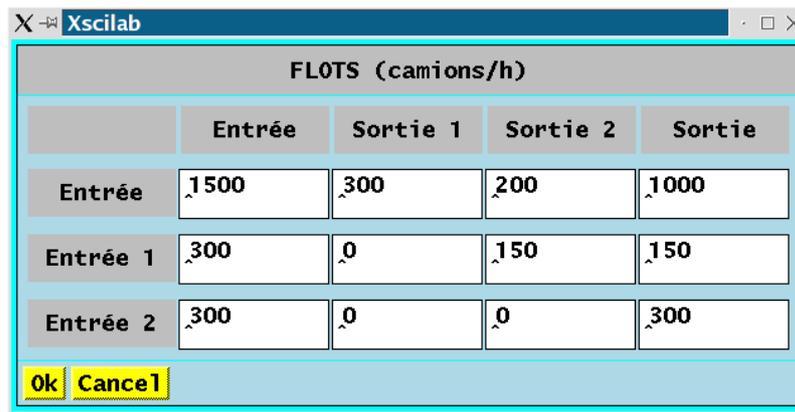


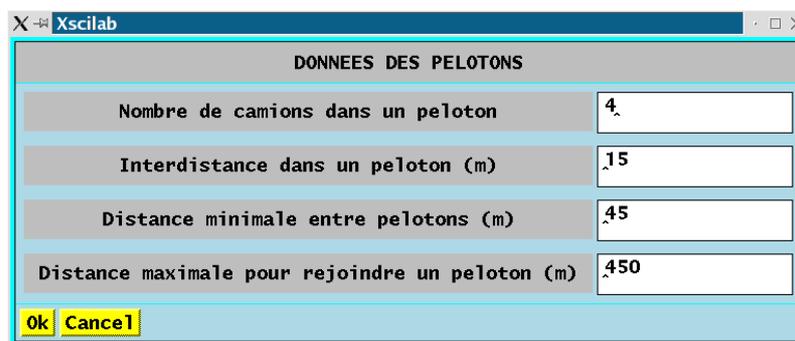
Figure 12 : vitesse nominale et vitesse de rattrapage



	Entrée	Sortie 1	Sortie 2	Sortie
Entrée	1500	300	200	1000
Entrée 1	300	0	150	150
Entrée 2	300	0	0	300

Ok Cancel

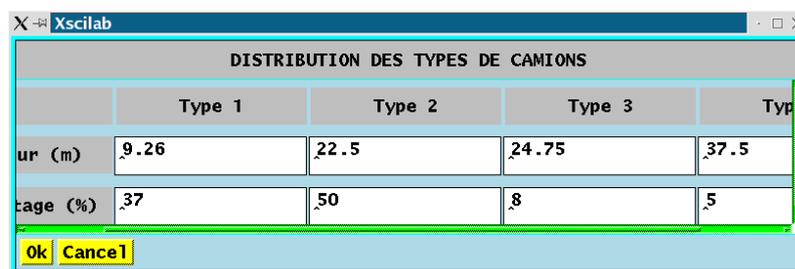
Figure 13 : matrice entrées-sorties



Nombre de camions dans un peloton	4
Interdistance dans un peloton (m)	15
Distance minimale entre pelotons (m)	45
Distance maximale pour rejoindre un peloton (m)	450

Ok Cancel

Figure 14 : données de formation des pelotons



	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Longueur (m)	9.26	22.5	24.75	37.5
Pourcentage (%)	37	50	8	5

Ok Cancel

Figure 15 : les types de poids lourds

Ci-dessous un instantané pendant le fonctionnement du simulateur. Cette fenêtre permet de vérifier le bon déroulement de la simulation.

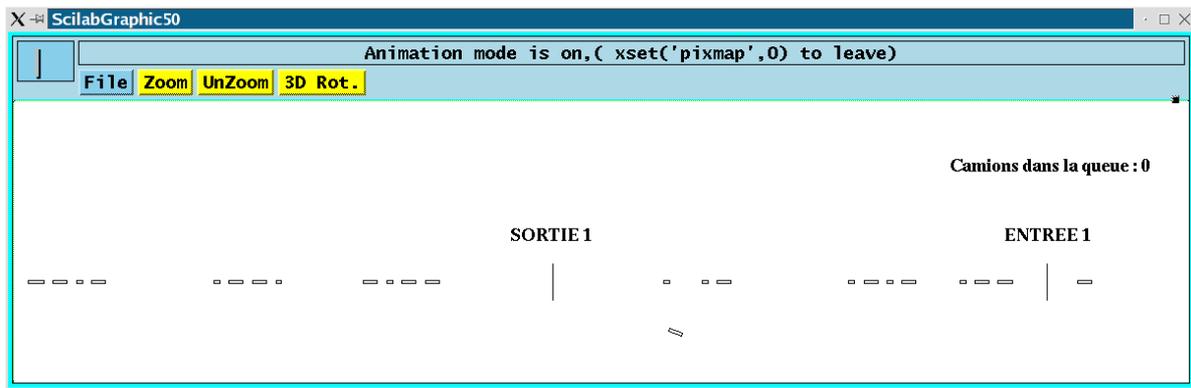


Figure 16 : formation et défilement des pelotons

Ci-dessous quelques sorties du simulateur. On peut en particulier choisir un point d'observation et obtenir l'histogramme des tailles des pelotons à cet endroit, ce qui est une information intéressante en cas de trafic assez faible.



Figure 17 : ventilation des temps de conduite globaux

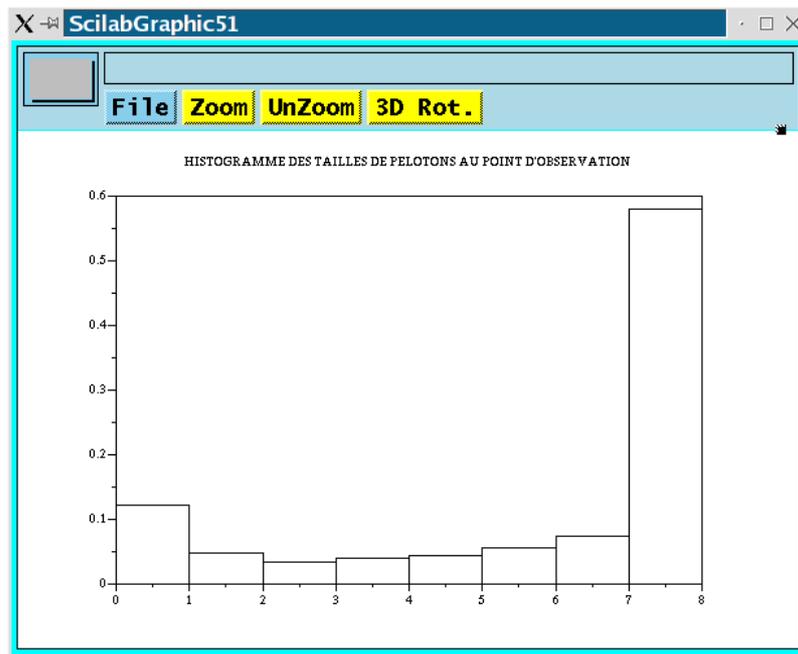


Figure 18 : tailles des pelotons à un point d'observation choisi

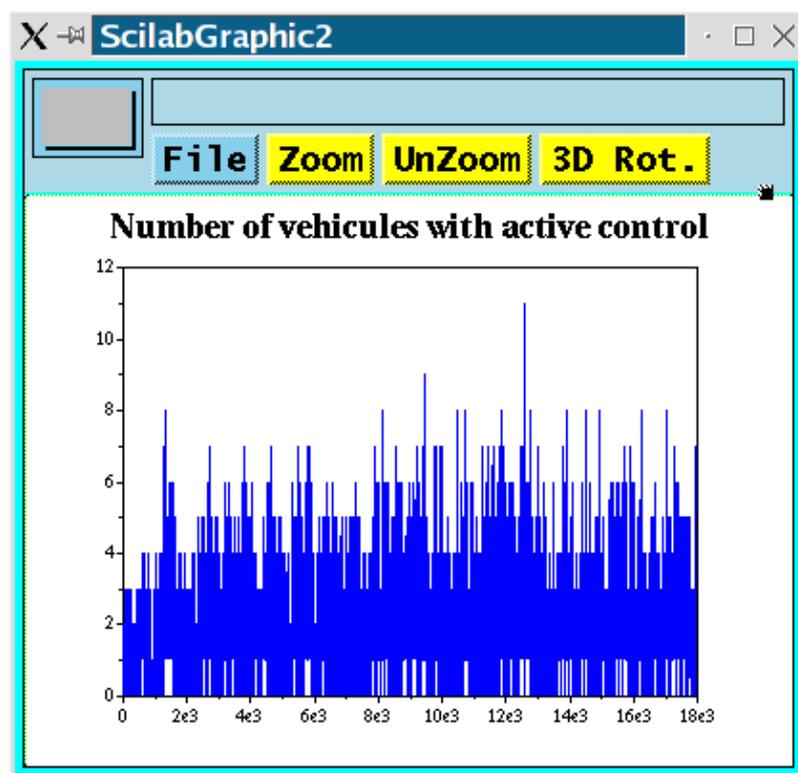


Figure 19 : nombre de véhicules sous contrôle actif (accélération ou freinage)

TEMPS DE CONDUITE		
	TEMPS TOTAUX (heures)	POURCENTAGES
TOTAL Trafic	7.7486111	100
CAMIONS ISOLEES	0.7298611	9.4192508
CAMIONS SUIVEURS	5.6659444	73.122065
CAMIONS LEADERS	1.3528056	17.458684

Figure 20 : temps de conduite

Les données d'une simulation et les résultats sont enregistrés sur un fichier de sortie dont on donne un exemple ci-dessous.

Troncons route

6000.000 12000.000 500.000

Vitesse nominale (m/s)

30.000

Vitesse maximale (m/s)

33.000

Matrice entrees/sorties

1500.0	300.0	200.0	1000.0
300.0	0.0	150.0	150.0
300.0	0.0	0.0	300.0

Nombre de camions dans un peloton

8

Interdistance dans un peloton (m)

15

Distance minimale entre pelotons (m)

45

Distance maximale pour rejoindre un peloton (m)

450

Distribution des types de camions

Longueur (m)

9.260	22.500	24.750	37.500
-------	--------	--------	--------

Pourcentage

37.000	50.000	8.000	5.000
--------	--------	-------	-------

Troncons route

6000.000	12000.000	500.000	
----------	-----------	---------	--

Vitesse nominale (m/s)

30.000

Vitesse maximale (m/s)

33.000

Matrice entrees/sorties

1500.0	300.0	200.0	1000.0
--------	-------	-------	--------

300.0	0.0	150.0	150.0
-------	-----	-------	-------

300.0	0.0	0.0	300.0
-------	-----	-----	-------

Troncons route

6000.000	12000.000	500.000	
----------	-----------	---------	--

Vitesse nominale (m/s)

30.000

Vitesse maximale (m/s)

33.000

Matrice entrees/sorties

1500.0	300.0	200.0	1000.0
--------	-------	-------	--------

300.0	0.0	150.0	150.0
-------	-----	-------	-------

300.0	0.0	0.0	300.0
-------	-----	-----	-------

Nombre de camions dans un peloton

1

Interdistance dans un peloton (m)

60

Distance minimale entre pelotons (m)

60

Distance maximale pour rejoindre un peloton (m)

5450

Distribution des types de camions

Longueur (m)

9.260	22.500	24.750	37.500
-------	--------	--------	--------

Pourcentage

37.000	50.000	8.000	5.000
--------	--------	-------	-------

Paramètres de la simulation

Pas de temps (s)

0.400

Duree de la simulation (s)

1600.000

Point de comptage des pelotons

Abscisse du point (m)

4000.000

7 SCENARIO 5 : ROUTE TOTALEMENT AUTOMATISEE

Dans ce cas, un véhicule arrivant à une entrée, si le feu est au vert, passe en mode automatique et devient totalement commandé par le système. Le véhicule entrant est prioritaire, c'est-à-dire que les véhicules roulant sur la voie principale ralentissent pour libérer la place disponible pour permettre l'insertion.

On impose deux contraintes sur le flot principal : le nombre de véhicules devant ralentir est limité et la vitesse minimale d'un véhicule dans le flot principal est également limitée. Lorsque l'une de ces contraintes est atteinte, le feu d'entrée passe au rouge pour interdire l'entrée.

On suppose que les mesures de vitesses, de distances et de freinage sont entachées d'erreur. Le simulateur va donc nous fournir l'évolution des distances dans le flot (voir tableau plus bas).

Ci-dessous, quelques fenêtres d'entrée du simulateur :

PARAMETERS OF THE TRAFFIC	
Flow (car/h) on the highway	1200
Flow (car/h) on the ramp	600
Nominal speed (m/s)	30
Minimal security distance	12
Simulation period (s)	500

Figure 21 : données de base du trafic

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Length (m)	10	17	19	31
Mass (t)	10	27	27	34
Percentage	25	40	10	25

Figure 22 : types de poids lourds

MEASUREMENTS - ERRORS	
Error on speed (%)	1.5
Error on distance (%)	5
Brake capacity (m/s/s)	7
Error on brake (%)	3
Control delay (s)	0.15

Figure 23 : erreurs de mesure

Ci-dessous un instantané pendant le fonctionnement du simulateur :

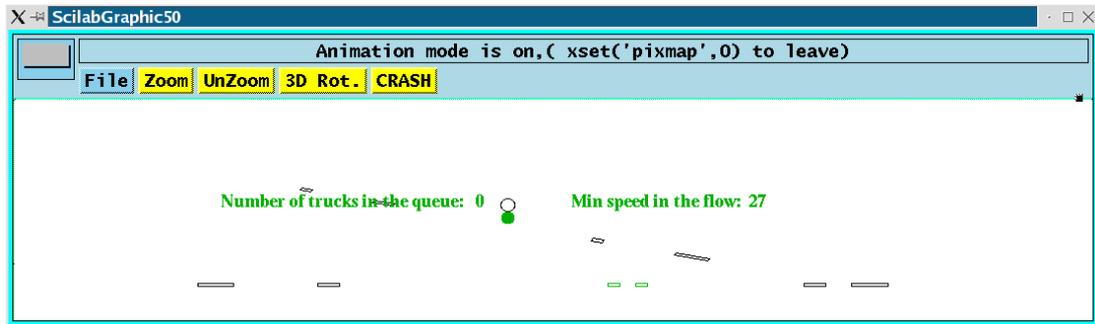


Figure 24 : visualisation du trafic automatisé

Ci-dessous quelques sorties du simulateur :

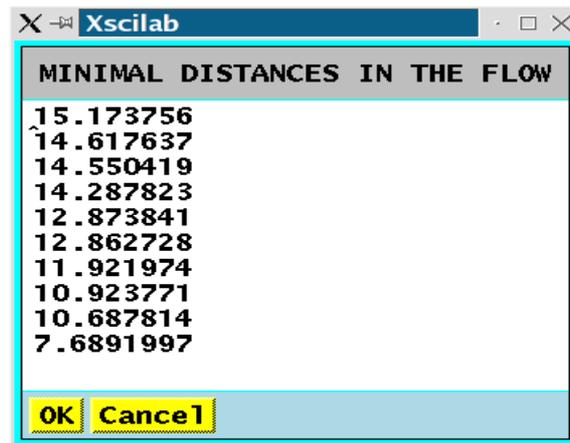


Figure 25 : distances observées dans le trafic

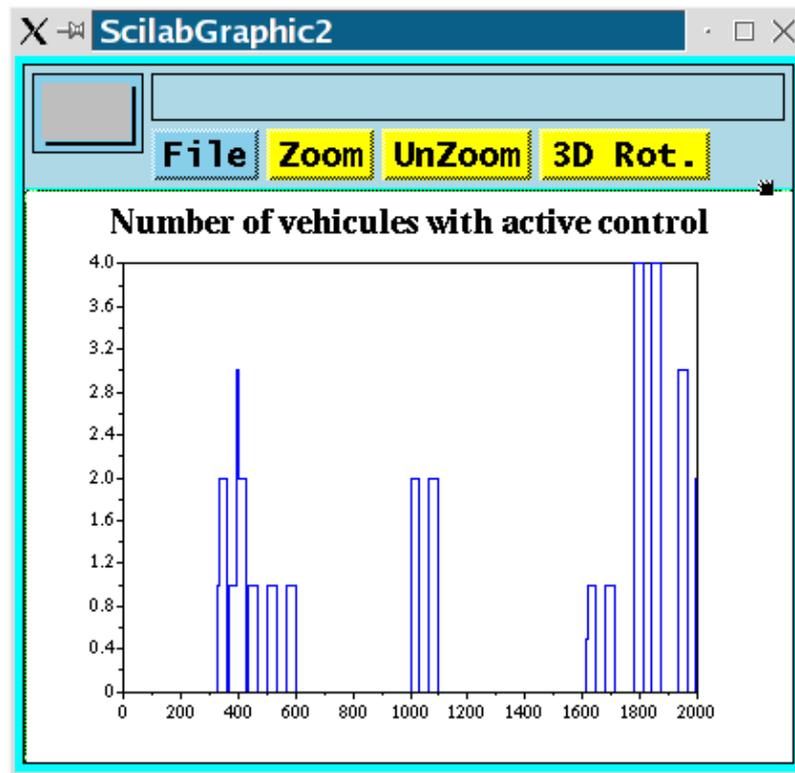


Figure 26 : véhicules sous contrôle actif (accélération ou freinage)

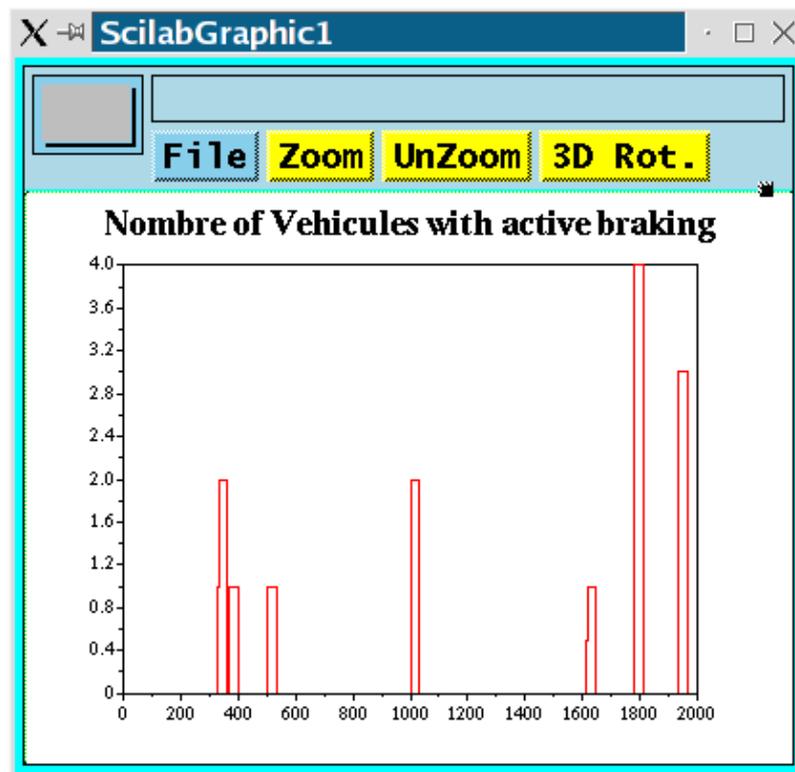


Figure 27 : véhicules en phase de freinage

8 ANNEXE : QUELQUES RESULTATS DE SIMULATION DE TRAFIC AVEC LES SIMULATEURS

PELOTONS DYNAMIQUES

On donne ici quelques résultats de simulation pour le scénario des pelotons dynamiques.

On se place dans le cas de la distribution des camions du futur :

Longueur (m)	9,26	22,5	24,75	37,5
Pourcentage	37	50	8	5

On prend la matrice entrées/sorties suivante :

1500	300	200	1000
600	0	300	300
300	0	0	300

Les données essentielles sont une vitesse nominale de 30m/s et une vitesse maximale de rattrapage de 33m/s. Les distances entre poids lourds dans le peloton sont de 15m et la distance minimale entre les pelotons est de 50m. Les pelotons sont constitués de 4 poids lourds. Dans ce cas nous avons un débit moyen maximal théorique de 2554 PL/h.

On charge progressivement l'entrée numéro 1 c'est à dire que les entrées vont passer de 600PL/h à 800PL/h avec l'accroissement de trafic sortant à la dernière sortie. On note pour une simulation de 90 minutes la longueur de la file d'attente à l'entrée 1 en fixant une limite maximale à 50PL.

Les résultats sont les suivants :

Débit entrée 1	600	650	700	750	800
Débit après E1	1800	1850	1900	1950	2000
File attente	17	19	20	31	> 50

Le débit après E1 correspond au débit sur l'axe principal et dans ce cas le débit maximal qu'on peut assurer est inférieur à 2000PL/h. Ce débit dépend évidemment légèrement des entrées et des sorties à E/S numéro 1 et les chiffres correspondent à une seule simulation.

On recommence une simulation similaire avec une distance de 100m entre les pelotons. On modifie également la matrice E/S pour avoir un trafic possible. On prend la distribution entrées-sorties suivante :

1200	300	200	700
400	0	300	100
300	0	0	300

Nous obtenons les résultats suivants :

Débit entrée 1	400	450	500	550
Débit après E1	1300	1350	1400	1450
File attente	14	15	31	>50

Le débit maximal que l'on peut assurer est donc inférieur à 1450 PL/h pour un débit théorique de 1971 PL/h.

On réalise enfin une simulation pour le cas de la sécurité maximale, c'est à dire que nous prenons une distance minimale entre pelotons de 150m.

Dans ce cas la matrice entrées-sorties est :

900	300	200	400
400	0	300	100
300	0	0	300

Les résultats sont :

Débit entrée 1	450	500	550	600	650
Débit après E1	1050	1100	1150	1200	1250
File attente	27	21	38	47	>50

Le débit maximal est ici inférieur à 1250 pour un débit théorique de 1605 PL/h.

Dans ces 3 cas on obtient donc une baisse de débit maximal de l'ordre de 25% par rapport au débit théorique.

PELOTONS STATIQUES

On compare ces résultats avec la simulation du trafic avec des plateformes de concentration et formation de pelotons statiques aux entrées du réseau. On reprend les données du premier exemple et les files d'attente à l'entrée numéro 1 sont :

Débit entrée 1	550	600	650	700	750
Débit après E1	1750	1800	1850	1900	2000
File d'attente	7	5	8	9	>13

Le débit maximal que l'on peut assurer est donc légèrement inférieur au cas des pelotons dynamiques (les files d'attente sont données en pelotons de 4 poids lourds). On ne considère pas ici les temps d'attente supplémentaires.

AUTOMATISATION DES POIDS LOURDS : DEBAT SUR LE CONTEXTE ET LES POSSIBILITES DES USA

1 RESUME

Ce document résume un rapport de Bishop Consulting (BC) publié en janvier 2004 et qui étudiait les aspects de l'automatisation du transport routier en Amérique du Nord. Ces travaux ont été menés pour étayer les recherches du LIVIC sur les problèmes d'automatisation du transport routier en France.

Le concept d'automatisation des véhicules qui existe aux Etats Unis depuis un certain temps, a pris de l'importance au début des années 90 avec l'évolution des systèmes de transport intelligent. La plupart des travaux consacrés à l'automatisation des véhicules aux USA portent sur les voitures de tourisme. Il y a beaucoup de différence entre le marché des voitures de tourisme et celui des véhicules commerciaux en termes de caractéristiques d'exploitation, de demande des consommateurs et d'exigences de l'usager au moment de la décision d'achat. Ce document porte un regard nouveau sur les perspectives d'automatisation des véhicules aux USA et se concentre sur le transport de marchandises poids lourds sur autoroute.

Une partie importante du rapport est consacrée au potentiel des voies dédiées aux poids lourds aux USA. Ces voies poids lourds sont considérées comme essentielles pour l'automatisation du transport de marchandises dans ce pays.

L'ensemble du rapport aborde les sujets suivants, avec les points clés résumés dans ce document :

- Le contexte des flux de transport de marchandises aux USA
- Le contexte de l'exploitation du transport routier de marchandises aux USA dans l'environnement actuel
- Le potentiel des voies poids lourds aux USA
- Etude de cas : le transport routier automatisé dans la région de Chicago
- Vers l'automatisation de l'exploitation du transport routier : solutions et questions
- Autres activités concernant l'automatisation des poids lourds aux USA
- Débat et conclusion

1.1 Le contexte des flux de transport marchandises et de l'exploitation des poids lourds aux USA

1.1.1 Les tendances nationales du transport de marchandises

Le transport de marchandises est une composante importante de l'économie américaine. Par rapport aux chiffres de 1997, le tonnage total des expéditions de marchandises primaires devrait augmenter de 21,2 % d'ici à 2007. Le transport routier prendra 55,7 % de cette augmentation, le ferroviaire 20,9 % et le transport fluvial 20,1 %. Le revenu total provenant de ces expéditions augmentera de 27,6 %. 76,5 % de ces revenus iront au transport routier, 12,6 % au transport aérien et 7,3 % au transport ferroviaire.

Dans le même temps, les villes et les ports américains sont congestionnés par les personnes et les services et vont l'être de plus en plus à l'avenir. La mondialisation exige également des améliorations de livraison et de structure des services. De façon générale, l'infrastructure des transports par voies fluviales, aériennes et ferroviaires n'est pas conçue dans la plupart des cas pour apporter une alternative réaliste ou compétitive au transport routier, et le mode routier est en mesure d'être beaucoup plus réactif et flexible que les autres modes. Le rôle du transport routier dans le paysage général du transport devrait donc prendre encore plus d'importance dans les années à venir.

1.1.2 Problèmes commerciaux de l'industrie du transport routier

L'industrie du transport routier aux Etats - Unis est très compétitive. Il est courant de voir de grandes entreprises fonctionner avec des marges bénéficiaires inférieures à 5 %. Il existe une pression constante pour réduire les coûts et optimiser l'exploitation.

La main d'œuvre est l'autre facteur qui influence les bénéfices. Il y a actuellement un manque de chauffeurs poids lourds, et un roulement important du personnel routier. Comme les conducteurs "passent" de flotte en flotte à la recherche de meilleurs salaires et bénéfices, les coûts sont supportés par les flottes pour le recrutement et la formation de chauffeurs de remplacement. Les flottes investissent donc en vue de satisfaire le conducteur, en achetant des sièges haut de gamme et des systèmes de sécurité actifs.

1.1.3 Les poids lourds dans la circulation : la sécurité et la congestion

Un nombre important d'accidents impliquant des poids lourds sont des accidents voiture-camion. Les recherches montrent que la majorité de ces accidents sont provoqués par les actions des conducteurs de voitures, qui ne comprennent pas ou ne respectent pas les réalités des opérations en présence de poids lourds. L'Administration Fédérale de la Sécurité des Transporteurs Routiers des USA (the U.S. Federal Motor Carrier Safety Administration) met la priorité sur la réduction de l'occurrence et de la gravité des accidents voiture - poids lourds.

Les flottes du transport routier sont très motivées pour garantir la meilleure sécurité possible d'exploitation. Les flottes étant généralement soit assurées par elles-mêmes ou bénéficiant de fortes déductions (de l'ordre de 1M \$), les coûts liés aux accidents réduisent directement les bénéfices de l'entreprise. C'est surtout vrai pour les camions citernes, dont les chargements sont souvent des

matières dangereuses – les coûts des accidents peuvent aller jusqu'à des centaines de milliers de dollars pour un seul accident. Les voies dédiées aux poids lourds sont susceptibles d'améliorer très fortement la sécurité.

De plus, la rupture de circulation due aux accidents de poids lourds est très importante en termes d'attente, surtout dans le cas de renversements de poids lourds qui bloquent plusieurs voies de grandes routes et demandent des heures pour le dégagement. Pour les camions transportant des matières dangereuses, les effets sont grandement multipliés, demandant parfois d'évacuer de grandes zones.

1.2 Le potentiel des voies dédiées aux poids lourds aux USA

L'une des voies principales du déploiement du transport automatisé est l'exploitation sur voies dédiées. Les études et développement de ces "voies poids lourds" sont donc étudiées dans ce document.

1.2.1 *La proposition du Reason Institute de voies à péages dédiées aux poids lourds*

L'Institut Reason de Politique Publique (The Reason Public Policy Institute), institut politique respectable situé en Californie, propose une approche intéressante pour la construction de voies exclusivement dédiées aux poids lourds aux USA.

Du point de vue de l'industrie des poids lourds, le transport routier aux USA est gêné par des réglementations incohérentes au niveau des états, concernant la taille et le poids des véhicules. Dans la plupart des états de l'Est, seuls les semi-remorques standard sont autorisés, alors que plusieurs états de l'Ouest autorisent les combinaisons de double et triple remorques. L'étude note qu'il serait possible de faire des économies très importantes de coûts d'expéditions en permettant de former des véhicules plus longs à remorques combinées dans presque tout le pays. Cependant, il existe une forte opposition dans le public au partage de la route avec les véhicules à remorques combinées. La chaussée séparée pour poids lourds résoudrait ce problème, mais comment la payer ?

Cette étude propose d'ajouter des voies spécialisées pour les camions à chargements lourds sur les grands axes actuels, surtout pour les itinéraires inter-états de longue distance dans les états qui n'autorisent pas actuellement les remorques combinées. Dans ces états, les multi-remorques seraient autorisés à circuler mais seulement sur les nouvelles voies, qui seraient réservées aux poids lourds uniquement. Ces voies seraient séparées de la circulation générale par des barrières, pour former des voies poids lourds séparées. L'analyse de faisabilité de l'Institut conclut que les gains de productivité permis par ces voies poids lourds seraient tellement importants que les entreprises de transport routier seraient prêtes à accepter des péages pour les emprunter (et resteraient bénéficiaires sur le plan financier après avoir réglé les péages). Elles souhaitent donc ces voies auto-financées à péage pour poids lourd.

Les gains de productivité grâce à ces voies poids lourds sont estimés de la façon suivante. Pour les états où les limites sont les plus restrictives (e.g., presque tous les états de l'Est), le 18-roues standard pourrait augmenter sa charge de fret de 115 % et le double remorque long pourrait transporter 492 % de charge utile en plus (simplement grâce à l'augmentation de l'espace cubique). Pour les états qui autorisent déjà les exploitations de multi-remorques, les gains seraient moins spectaculaires, mais resteraient importants : 62 % de charge utile en plus pour les 18-roues et 57 % de plus pour les doubles longs.

L'analyse économique menée pour différents scénarios conclut que la valeur nette actuelle des projets de voies poids lourds est positive, indiquant qu'ils apporteraient des bénéfices nets pour la société. En

termes de développement et d'exploitation des voies poids lourds en tant qu'occasion commerciale, au moins huit scénarios ont un IRR positif avec un financement uniquement basé sur les péages.

Du point de vue du Département des Transports de l'Etat, l'autorisation d'une voie poids lourds à péage sur un couloir permettrait d'obtenir une nouvelle capacité routière sans avoir à payer soit les coûts de capitaux soit les coûts d'exploitation et d'entretien. En outre, plus la circulation des poids lourds passera des voies existantes aux voies dédiées, plus le Département des Transports de l'Etat fera d'économies d'exploitation et d'entretien pour ces voies classiques.

Il faut insister sur le fait que pour le concept mis en avant, il faut opérer quatre grands changements de la politique routière fédérale. C'est un gros travail, mais il peut être accompli à la fois par des protagonistes industriels et politiques. Ces changements sont les suivants :

- Il faudrait accorder la priorité aux nouvelles routes sur les couloirs du réseau national ou inter-états.
- Les restrictions fédérales de poids et de taille devraient changer.
- L'interdiction des péages sur les autoroutes inter-états devrait être levée.
- Les camions devraient être exemptés des taxes fédérales et de l'état sur le diesel sur le kilométrage à péage.

En résumé, en augmentant de façon importante la capacité de charge utile des camions, les voies poids lourds à péages réduiraient les coûts d'expéditions de la plus grande part du transport des marchandises américaines, améliorant l'usage du vaste réseau d'autoroutes nationales. En séparant une grande part de la circulation poids lourds de celle des voitures, les voies poids lourds réduiraient l'ampleur des collisions voitures-camions, améliorant ainsi la sécurité routière. En permettant de transporter plus de marchandises dans moins de camions, les voies poids lourds produiraient des bénéfices environnementaux. En utilisant le financement des péages, cet apport important au système autoroutier pourrait intervenir pour les financements des groupements autoroutiers à un coût inférieur à un financement des voies poids lourds à partir des revenus des taxes sur le carburant.

1.2.2 Etude de la voie dédiée aux poids lourds SR 60 en Californie

En 2001, une étude a été menée pour examiner les alternatives d'ajout de voies dédiées aux poids lourds sur la route à fort trafic SR60 de la région de Los Angeles. Cet itinéraire dessert la majeure partie de la circulation poids lourds qui transporte des marchandises dans les deux sens pour le port très actif de Long Beach. Les responsables de l'aménagement local considèrent les voies dédiées aux poids lourds, comme un moyen d'améliorer les mouvements de marchandises, la mobilité dans son ensemble, ainsi que la sécurité et la qualité de l'air. L'étude de l'équipe de la voie poids lourds s'est concentrée sur des facteurs tels que les différentes conceptions, l'impact financier, les exploitations routières, et les problèmes de sécurité, d'environnement et de bénéfices / pertes pour la région. L'équipe de l'étude a conclu que les voies poids lourds sur la SR60 sont faisables dans certaines conditions ; cependant, il y a de nombreux obstacles à la mise en œuvre, le coût étant le principal problème.

Le Bureau Caltrans des Nouvelles Technologies (Caltrans Office of New Technology) lance à présent une nouvelle étude pour examiner de quelle manière la technologie d'automatisation des poids lourds peut réduire les coûts et les impacts physiques des voies poids lourds. Par exemple, potentiellement, une capacité suffisante peut être apportée par une voie poids lourds automatisée si bien que les deux

voies manuelles recommandées dans l'étude de 2001 ne seraient pas nécessaires. De cette façon les coûts pourraient être fortement réduits.

1.2.3 Les voies dédiées aux poids lourds dans la région de San Diego

L'Association de Gouvernements de San Diego (San Diego Association of Governments - SANDAG), organisation d'aménagement métropolitain examine plusieurs scénarios de voies dédiées aux poids lourds dans la région, avec un projet à plus long terme d'exploitation de transport routier partiellement et entièrement automatisé.

Actuellement, San Diego a un réseau de voies de véhicules multi-occupants (High Occupancy Vehicle - HOV) (15 kilomètres) utilisé pour desservir la circulation de banlieue aux heures de pointe. Des aménagements devraient étendre ce réseau à tout le système autoroutier de la région, créant un kilométrage généralisé de voies dédiées. Un concept d'usage de la route par les poids lourds en dehors des heures de pointe est à l'étude, à la fois pour améliorer les flux de circulation et pour réduire le nombre de camions sur les voies classiques. Potentiellement, des voies pourraient être dédiées à cet effet jusqu'à 75 % du temps sur 24 heures.

Il existe également une zone de très gros flux de marchandises depuis la frontière de Otay Mesa avec le Mexique vers une installation de transfert intermodal située à 60 kilomètres au nord. Des « voies rapides » sont déjà installées à la frontière avec une douane électronique qui améliore le passage direct des camions. Etant donné le volume de fret, il serait possible de faire des économies en construisant de nouvelles voies dédiées aux poids lourds. Comme ce seraient des voies express, il y aurait besoin de moins de rampes d'accès/sortie que sur autoroutes conventionnelles.

1.2.4 Etude de la voie poids lourds de Californie du Sud

Une étude récemment terminée comprenait une candidature pour un plan régional de transport dans la région de Los Angeles en Californie du Sud. Ce bref rapport est important dans la mesure où il synthétise et assimile les résultats d'études antérieures sur les poids lourds, et le concept de voies poids lourds à péage. Le système proposé de voies poids lourds régionales (Regional Truckway System – RTS) comprendrait 88 km de voies dédiées pour poids lourds allant de la baie de San Pedro à l'ouest à Barstow à l'est. L'analyse conclut que le coût de développement en capitaux de 16,5 milliards de \$ peut être payé par un péage moyen de 0,56 \$ par kilomètre sur une période de financement de trente ans. Les coûts de construction par kilomètre sont de l'ordre de 120 millions de \$, soit un coût assez élevé mais il correspond à cette région fortement développée.

La capacité d'accueil à l'heure de ce système sur cette installation à deux voies dans chaque direction, serait de 3 200 véhicules, soit une capacité journalière du système de 10,9 millions de camions-kilomètres. L'analyse financière montre que les revenus générés par l'installation pourraient éventuellement dépasser les coûts de capitalisation d'un rapport de 2,24.

La proposition offre la possibilité d'ouvrir l'installation à des véhicules à combinaison longue pour accroître la productivité, comme le propose l'étude de la Fondation Reason.

1.2.5 Etude du couloir de transport de marchandises I-10

Un travail intitulé Etude nationale I-10 d'un couloir de transport de marchandises a été terminé en 2003 sur la route inter-états 10 qui traverse le Sud des USA de San Diego à l'Ouest vers Jacksonville à l'Est de la Floride. Dirigés par la Californie, les huit états situés sur ce couloir ont participé. L'objet de l'étude était d'analyser les mouvements de marchandises actuels et futurs, d'évaluer la manière dont les volumes actuels et futurs de fret ont un impact sur les systèmes de transport local et national, et de développer des stratégies pour améliorer le transport de marchandises le long du couloir.

Le corridor I-10 fait plus de 1 500 km, dont environ 250 km sont régulièrement embouteillés. D'ici 2025, on escompte que plus de 930 km seront congestionnés à moins de prendre des mesures. D'ici là on escompte une augmentation de la circulation poids lourds de 118 %.

Un résumé des résultats clés de l'étude est présenté ci-dessous :

- La tendance se poursuit vers une économie de services, où la fiabilité est essentielle et qui va faire augmenter le volume de transport de marchandises sur autoroute à un rythme estimé à près de deux fois supérieur à celui des automobiles d'ici à 2025.
- Les autoroutes sont essentielles à l'efficacité des autres éléments du système de transport de marchandises, y compris les ports, les voies navigables et le ferroviaire.
- L'augmentation de la capacité sur les couloirs à fort volume est la meilleure méthode pour faire diminuer la congestion.
- L'augmentation du financement est essentielle pour garantir la poursuite du mouvement des marchandises sur autoroute de façon aussi efficiente et productive que possible.

Plus spécifiquement, on a retenu trois traitements à fort potentiel pour accroître la capacité : élargir le I-10, mettre en place une séparation camions/voitures, et construire des contournements pour les camions en zones urbaines. L'ITS est considéré comme offrant un rapport coût/bénéfice de 3:1. Le multimodal ferroviaire, l'intermodal maritime, et la productivité des camions sont considérés comme ayant un très faible impact. Le rapport parle d'"innovations dans la séparation automatique des camions à l'aide de techniques de flux de masses pour améliorer la productivité du transport de marchandises" comme d'un domaine prometteur.

1.2.6 Débat sur les options de voies dédiées aux poids lourds

SANDAG et SCAG soutiennent fortement le concept de voies poids lourds à péage, et leur pouvoir conjoint dans la région peut suffire à réaliser le déploiement dans cette région. De plus, ils peuvent former un partenariat pour faire pression sur la sélection du site de déploiement pour le programme de voies poids lourds dédiées initial de 1.5 milliards de \$ proposé dans la nouvelle législation fédérale. Les opérateurs des ports en Californie du sud (Long Beach et Los Angeles) étudient également l'approche des voies poids lourds ; cependant selon certaines indications, l'usage des voies pour véhicules multi-occupants en dehors des heures de pointe sont plus attractives dans un premier temps.

Etant donnés les différents scénarios et le soutien en faveur des voies poids lourds, on pense qu'elles seront bien construites sous une quelconque forme au cours des 5 à 10 prochaines années. L'activité continue en Californie, telle qu'elle est démontrée par la proposition du système régional de voies poids lourds qui synthétise les travaux précédents, indique cet état comme l'emplacement le plus probable.

Les voies poids lourds auront certainement un effet positif sur la sécurité et les risques liés au commerce. L'usage de voies poids lourds dédiées améliorera la sécurité dans la mesure où il y aura

moins d'incidents et d'accidents multi-véhicules mortels. Avec une composition plus homogène de la circulation l'incidence de véhicules "différents" impliqués dans des accidents diminuera. Bien que cela puisse ne pas faire diminuer le nombre général des incidents, ces voies permettront certainement de réduire leur gravité à la fois en termes de dégâts matériels et corporels. Cela aidera également à la réduction du nombre et de l'ampleur des actions litigieuses, et des plaintes auprès des assurances ainsi que des primes payées par les usagers.

1.3 Vers l'exploitation automatisée des poids lourds : démarches et problèMes

Cette section décrit plusieurs projets d'étude de l'automatisation du transport routier, et présente des observations générales.

1.3.1 Etude de cas : le transport automatisé par poids lourds dans la région de Chicago

PATH Californie a terminé la première phase d'une étude de cas qui examinait l'exploitation du transport routier automatisé dans la région de Chicago.

Chicago est la plaque tournante du mouvement de marchandises des Etats Unis, parce que c'est un point où convergent toutes les lignes ferroviaires de l'est et de l'ouest des Etats Unis, et deux couloirs ferroviaires canadiens. Chicago est la ville de passage privilégiée pour la plus grand part du transport routier de marchandises entre l'est et l'ouest des Etats Unis. Ses coûts sont élevés en termes de temps, de main d'œuvre, d'installations de manutention, et d'impacts sur tous les autres transports de surface de la région de Chicago. Il y a une importante circulation de poids lourds entre les terminus ferroviaires des lignes vers l'ouest et l'est – les écartements de voies ne sont pas compatibles, et les marchandises doivent donc être déchargées, transportées par camion vers l'autre ligne, et rechargées pour le passage de la marchandise dans la région. Evidemment, cela crée une charge importante pour le réseau routier local et entraîne naturellement un scénario de déploiement du transport routier de courte distance automatisé.

Une modélisation a été appliquée pour représenter des problèmes tels que :

- les temps de trajet des véhicules et les temps de chargement/déchargement des containers
- la distribution des temps de trajet des containers entre les terminaux
- la capacité de containers par voie de route automatisée
- les interactions entre les opérations automatisées de transport de marchandises et la circulation transversale
- les coûts de capitaux et d'exploitation
- les émissions et la consommation de carburant

Les chercheurs ont défini à la fois un alignement à court terme de 30 km et un alignement étendu à long terme pour desservir les dépôts ferroviaires, les parcs industriels, et les points d'entrée régionaux.

A partir des analyses de la circulation et d'autres paramètres, les alternatives de concepts d'exploitation suivantes ont été choisies pour analyse plus approfondie :

Alternative 1

Concept minimal (pas de technologies d'aide au conducteur, pas d'installations réservées aux poids lourds)

Alternative 2

Installation dédiée aux poids lourds sans technologie d'aide au conducteur, ouverte à tous les camions ;

Une voie standard de 3,65 m dans chaque direction avant 2015, et une seconde voie ajoutée sur des segments sélectionnés d'ici à 2015.

Alternative3

Installation dédiée aux poids lourds avec technologies de direction automatisée pour camions équipés uniquement ;

Une voie ajoutée dans chaque direction d'une largeur inférieure à la norme en raison du guidage latéral

Alternative 4

Installation dédiée pour poids lourds avec technologies d'automatisation complète (direction automatique, contrôle automatique de la vitesse et des distances inter-véhiculaires avec 2 ou 3 pelotons de camions s'il y a une garantie) pour camions équipés uniquement ; une voie étroite ajoutée dans chaque direction.

Alternative 5

Installation dédiée pour poids lourds sans technologie d'aide au conducteur avant 2015 ; en 2015, amélioration de l'installation pour en faire une voie poids lourds automatisée ; une voie standard ajoutée dans chaque direction.

Une analyse coût/bénéfice qui incorporait des facteurs très variés a été menée et examinait le cadre temporel de 2005 à 2025. Les coûts/bénéfices par rapport à la ligne « ne rien faire » étaient les suivants :

Alternative 2 (voies poids lourds sans aide au conducteur)	3,78
Alternative 3 (direction automatique)	3,46
Alternative 4 (entièrement automatisé)	2,61
Alternative 5 (automatisation par étapes)	5,32

Toutes les nouvelles alternatives de voies poids lourds ont donc été évaluées comme bénéficiaires par rapport au cas de base. L'alternative 5 est particulièrement attractive car le déploiement des systèmes CVHAS intervient plus tard, quand les coûts des véhicules ont diminué et les volumes de circulation

ont augmenté. Bien que préliminaire, l'étude montre clairement le bénéfique potentiel de l'utilisation de technologies CVHAS pour une utilisation de transport intermodal de marchandises.

Cette étude est assez importante pour plusieurs raisons. Ces applications ponctuelles pourraient être la clé de la démonstration initiale de la faisabilité de l'exploitation du transport routier automatisé. Nombre des poids lourds actuellement en service pour les échanges intermodaux de marchandises sont captifs de la région de Chicago et dédiés à cette fonction. Les propriétaires de flottes seraient donc autorisés à équiper leurs camions de systèmes d'aide au conducteur précisément quand les systèmes de voies poids lourds de soutien seront disponibles. Cela permettra d'améliorer le fonctionnement commercial plutôt que le transport de longue distance puisque les installations de transport routier automatisé ne seront disponibles que pour un petit pourcentage de segments de routes durant les premières années. De plus, le modèle étalé dans le temps, où une voie poids lourds "grandeur réelle" est d'abord construite puis automatisée, pourrait s'avérer nécessaire et utile comme démarche : bien que les économies de coûts de construction de voies plus étroites ne puissent pas être réalisées au début, les économies de coûts de construction sont importants, car il n'y a pas besoin d'ajouter de seconde voie pour accueillir l'accroissement des volumes, étant donnée l'efficacité de l'exploitation automatisée.

1.3.2 Le transport routier automatisé pour les services inter-urbains

Cette étude a été menée par les Drs. Jacob Tsao et Jan Botha de l'Université d'Etat de San Jose et un article a été publié sous ce titre dans les Proceedings du TRB 2002.

Les applications se concentrent avant tout sur le transport inter-urbain de marchandises sur voies dédiées, car ils estiment qu'il peut apporter de gros bénéfices aux transporteurs sur ces longs itinéraires. Le concept d'exploitation peut être résumé de la façon suivante :

- Combiner les forces d'un système ferroviaire de transport de marchandises avec ceux d'un système routier.
- Des camions automatisés roulent au milieu d'une autoroute inter-urbaine.
- La circulation des camions automatisée est séparée du reste de la circulation par des barrières physiques.
- Les camions forment des convois à intervalles courts si bien qu'il ne faut qu'un chauffeur dans le camion de tête.

Tsao et Botha ont proposé huit étapes de déploiement vers l'AHS interurbaine de marchandises. La séquence était conçue pour comporter des étapes initiales qui pourraient être bénéfiques en elles-mêmes et mener à la mise en œuvre de l'étape finale.

- Etape 1 : acceptation par le marché des technologies avancées pour poids lourds – alerte à la collision et alerte à la sortie de voie.

- Etape 2 : acceptation sur le marché (utilisation non simultanée) de technologies d'automatisation pour poids lourds mains libres et pieds libres – guidage latéral et ACC.
- Etape 3 : acceptation par le public des voies dédiées aux poids lourds – basé sur la sélection d'un couloir de transport de marchandises important et congestionné où les bénéfices de l'automatisation seront évidents.
- Etape 4 : acceptation par le public d'une voie poids lourds séparée physiquement au milieu d'une autoroute avec autorisation des remorques multiples par la nouvelle législation.
- Etape 5 : conduite automatisée en circulation mixte sur la voie poids lourds – tous les camions doivent être équipés de communication de véhicule à véhicule et de véhicule à infrastructure de façon à coordonner les mouvements de véhicules.
- Etape 6 : Voies poids lourds automatisées accessibles uniquement à partir de zones de stationnement – voie dédiée aux poids lourds uniquement pour la circulation automatisée avec largeur de voie réduite.
- Etape 7 : convoi automatisé sans conducteur dans les remorques d'un convoi.
- Etape 8 : convoi automatisé à intervalles courts -- pour réaliser des économies de carburant.

1.3.3 R&D pertinente financée par DARPA en conduite autonome

Le bureau des projets de recherche avancés de la Défense (DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency) s'intéresse maintenant beaucoup à la technologie du véhicule autonome pour les opérations sur route. Il fait avancer l'état de l'art dans le domaine des capteurs du véhicule, de la perception intelligente, et des systèmes de capteurs intégrés. Actuellement, l'industrie militaire investit environ 100 millions de \$ par an dans ce domaine pour des véhicules tactiques téléguidés. Le DARPA travaille activement au développement de techniques de perception intelligente pour la conduite sur autoroute, dans le cadre d'un programme DARPA de 1,8 M \$ appelé Système de Conduite Compétente (Competent Road Driving System). Dans le cadre de ce travail, ils développent un véhicule capable de conduite autonome sur autoroute et même en ville.

L'armée américaine développe une technologie qui pourrait être appliquée à l'automatisation des camions et plusieurs autres applications de mobilité autonome. L'armée envisage de développer l'automatisation des camions pour améliorer le soutien logistique – au point de pouvoir livrer de la marchandise dans des zones de combat ou de quasi-combat par l'automatisation de camions, en risquant la vie de moins de soldats. Comme l'armée progresse dans la mise en place de systèmes de convois automatisés, on pense que les résultats des travaux du DARPA joueront un rôle important.

1.3.4 Voies de déploiement pour le transport routier automatisé

Systèmes précurseurs

Le BC propose que la fonctionnalité de Chauffeur Assistant soit mise sur le marché par les voies normales – les flottes voient des avantages à donner aux chauffeurs les dispositifs de guidage latéral et de régulation des distances inter-véhicules. On peut raisonnablement penser que les forces du marché iront dans le sens du progrès, et qu'il y aura entreprises désireuses de coupler leurs camions sur la route pour économiser le carburant avec des intervalles de passage plus courts. Ce serait alors le début des pelotons à deux camions. Tandis que les applications de communications inter-vehicules arrivent de plus en plus sur le marché, les camions pourraient se coupler en pelotons à interdistances courtes même s'ils ne sont pas de la même entreprise. Ces étapes pourraient être franchies sur les routes actuelles dans l'environnement réglementaire actuel. On réfléchit à cette solution dans une certaine mesure aussi bien dans l'étude de cas de Chicago que dans l'étude du transport de marchandises interurbaines.

Les camions automatisés sont à présent construits pour un usage hors autoroute, à l'intérieur de complexes industriels par exemple. On pense que ces systèmes vont évoluer vers des véhicules utilisables sur route, capables d'avoir une perche de remorquage électronique. En conséquence des pelotons à deux véhicules commenceront à se former en circulation mixte. Ces petits pelotons ne devraient pas poser de problème pour les manœuvres des conducteurs au milieu des camions pour les entrées/sorties d'autoroute. L'étape suivante serait l'installation de "voies désignées," qui attireraient les camions équipés de façon à les faire bénéficier de la conduite coopérative ; ces voies resteraient ouvertes à tout usager. Sur les voies désignées, il serait possible de faire circuler des pelotons à trois véhicules. Enfin, des voies séparées pourraient être aménagées une fois le nombre de camions équipés suffisant. Sur ces voies, des vitesses élevées pourraient être autorisées, créant une forte incitation financière pour les transporteurs à équiper leur véhicule et à augmenter ainsi leurs revenus.

Approches vers l'automatisation complète

Le déploiement de voies poids lourds dédiées accélérera probablement l'adoption de l'exploitation automatisée du transport routier. La nature homogène et l'environnement maîtrisé de l'exploitation des voies poids lourds se prêtent beaucoup mieux au concept de l'automatisation. La valeur ajoutée de temps de trajets mieux prévisibles, l'augmentation des volumes de chargement et la rapidité sont également des options attractives. Les voies poids lourds automatisées ont besoin d'accès limités et de sorties qu'il faudrait concevoir spécialement avec des zones de stationnement / transition..

L'un des modèles opérationnels probables serait la formation dynamique de pelotons sur autoroute. Cela se justifie par le trop grand nombre de variables (destinations, performance des véhicules etc.) à maîtriser sur le réseau autoroutier américain pour former des pelotons en dehors des autoroutes. Cependant, dans les zones de grandes distances où il y a peu de points de livraison intermédiaires (de San Diego à Phoenix, par exemple), on pourrait concevoir la formation de pelotons en dehors des autoroutes.

L'un des avantages clés des voies poids lourds conçues pour l'automatisation est de pouvoir se passer d'une voie de dépassement (ou de bas-côtés larges), ce qui permettrait de faire d'importantes économies de coûts de construction.

On pourrait envisager un scénario final, qui se déroulerait après le déploiement total des voies poids lourds pour remorques multiples aux USA, et l'emploi fondamental de pelotons de camions. A ce moment là, on pourrait concevoir l'entrée dans une nouvelle génération où tous les véhicules de la voie poids lourds seraient automatisés, si bien qu'aucun chauffeur n'aurait à porter les charges. Ce scénario est évidemment réalisable dans un délai de 30 ans ou plus. Il est analogue au développement actuel de l'industrie aéronautique pour convertir les avions de fret commercial en exploitations non accompagnées – probablement dans les cinq années à venir pour ce cas.

Scénarios de déploiement supplémentaires

Des scénarios de déploiement supplémentaires prometteurs qui pourraient être étudiés de façon plus approfondie sont les suivants :

- La route inter-états 710 en Californie : du port de Long Beach au centre ferroviaire de San Bernardino – des volumes importants de camions effectuent des opérations de camionnage entre les bateaux et les wagons de chemin de fer. C'est un bon terrain pour l'automatisation des poids lourds comme les pelotons à deux camions sur n'importe quelle voie, la voie de gauche désignée pour accueillir les camions équipés pour de petits pelotons, ou la séparation physique de la voie de gauche pour les camions automatisés uniquement, par mode de service express (i.e. entrée/sortie uniquement au port et au centre ferroviaire)
- Le couloir d'Alameda qui dessert les ports de Californie du sud, -- les camions auraient une voie dédiée de collecte et l'automatisation serait exigée comme condition d'usage de cette voie. Au départ on ne pourrait exiger qu'un équipement de guidage latéral, et ajouter le control longitudinal quand les volumes de circulation augmenteront.

1.4 Débat et Conclusion

L'automatisation des poids lourds pose différents problèmes, aussi bien pour les aspects commerciaux que pour le déploiement. Pour le transport de longue distance, il semble que le concept de voies à péage pour poids soit assez largement soutenu par les gouvernements locaux de certains états, et au niveau politique – le modèle commercial proposé paraît viable et traite les préoccupations des industriels et du public pour le financement des nouvelles constructions des voies dédiées aux poids lourds. Pour le déploiement aux points sensibles (goulets d'étranglement), l'étude du CVHAS donne un excellent exemple de l'usage de l'exploitation des véhicules automatisés comme outil permettant de fonctionner dans des environnements très spécialisés.

Bien que l'une des approches de mise en œuvre de l'automatisation des poids lourds consiste à construire de nouvelles routes sur de nouveaux alignements, aucune des initiatives actives aux USA n'a choisi cette option. Il existe plutôt un consensus en faveur de la construction de nouvelles voies dédiées aux poids lourds au milieu des autoroutes inter-états existantes, au moins dans les zones rurales inter-urbaines. Les routes de transit pour poids lourds sur de nouveaux alignements sont à l'étude pour les zones urbaines, ainsi que l'usage de priorités pour le transport ferroviaire. De plus le potentiel de l'usage des voies à forte occupation par les poids lourds lors des heures de pointe, ou même de la conversion de ces voies en voies dédiées aux poids lourds à plein temps offre un autre choix aux zones urbaines.

Concernant la formation de pelotons de façon dynamique plutôt que hors réseau, la réponse devrait dépendre des cas spécifiques des routes et de l'environnement réglementaire. Le scénario le plus probable pour la formation hors réseau des pelotons concernerait les liaisons longues inter-urbaines, où circulent de longues combinaisons de véhicules qui ne sont pas autorisées à rouler sur les autoroutes classiques aux points de départ et d'arrivée. Dans d'autres cas, surtout pour les ensembles à remorque qui sont admis partout, on préférera probablement la formation dynamique de pelotons.

Aussi bien l'étude de l'Institut Reason que l'étude du couloir de transport de marchandises I-10 mentionnent le transport routier automatisé comme option future. Il faut mener une analyse approfondie pour comparer les avantages des camions exploités manuellement sur les voies poids

lourds dédiées aux avantages supplémentaires qui peuvent être obtenus par l'automatisation de ces véhicules.

Enfin, la réalisation de l'automatisation des poids lourds et des véhicules en général, demandera aux approches des systèmes d'éviter les "arrêts prolongés" de la technologie et/ou des investissements pour atteindre les premières exploitations. L'approche par étapes est absolument essentielle pour que les parties prenantes puissent bénéficier à chaque étape du développement, et constater pour eux-mêmes le potentiel des systèmes de véhicules automatisés. Certains exemples d'approches par étapes sont présentés ci-dessus.

Notre société change rapidement et de manière imprévisible comme le développement de notre technologie. C'est pourquoi notre capacité à définir cette approche par étapes ne peut être valide que pour les premières étapes ; la voie vers le transport de marchandises basé sur l'exploitation de véhicules automatisés ne peut être actuellement définie de façon solide. Il faut évaluer les options à chaque étape du développement en termes de problèmes commerciaux, d'exploitations, de sécurité et de problèmes sociétaux, en progressant pas à pas vers une innovation sociétale presque inévitable et bénéfique pour tous.

2 RAPPORT INTERMEDIAIRE

Ce rapport donne les résultats d'un premier travail effectué par Bishop Consulting (BC) qui étudie les aspects de l'automatisation des poids lourds en Amérique du Nord. Ces travaux viennent soutenir les recherches du LIVIC concernant les problèmes d'automatisation des poids lourds en France. Les résultats de BC constituent une première étape d'un projet plus vaste. Stephen Keppler, Consultant de l'industrie des poids lourds a apporté une aide importante à BC.

Les principaux thèmes abordés par le projet du LIVIC sont les suivants :

- Theme 1 – Modélisation et évaluation au niveau du véhicule
- Theme 2 – Réglementation
- Theme 3 – Nature et segmentation du transport de marchandises
- Theme 4 – Problèmes commerciaux pour les transporteurs, y compris celui des chauffeurs
- Theme 5 – Voies de déploiement pour une mise en place progressive
- Theme 6 – Evaluation des voies de déploiement

Ces thèmes sont traduits dans ce rapport.

Le concept d'automatisation du véhicule existe aux Etats Unis depuis quelque temps déjà, et a pris de l'importance depuis le début des années 90 avec l'évolution des Systèmes de Transport Intelligent. Aux USA, la plupart des travaux se concentrent sur l'automatisation des véhicules individuels. Il y a une différence importante entre le marché du véhicule individuel et celui des véhicules commerciaux en termes de caractéristiques d'exploitation, de demande des consommateurs et d'exigences de l'utilisateur lors des décisions d'achat. Ce rapport apporte un nouveau regard sur les perspectives d'automatisation des véhicules aux USA, et concerne le transport de marchandises par camions.

Un chapitre important du rapport est consacré au potentiel de voies dédiées aux poids lourds aux USA. Ces voies dédiées sont considérées comme la clé de voûte de l'automatisation des poids lourds de ce pays.

Ce rapport intermédiaire aborde différents problèmes dans les chapitres suivants :

- Le contexte des flux de marchandises aux USA
- Le contexte de l'exploitation de poids lourds aux USA dans l'environnement actuel
- Le potentiel de voies dédiées aux poids lourds aux USA
- Vers l'automatisation de l'exploitation des poids lourds : démarches et problèmes
- Autres Activités concernant l'automatisation des poids lourds aux USA
- Etapes suivantes du débat

2.1 Contexte des flux de transport de marchandises aux USA

Dans les années 1980/1990 le secteur du transport commercial de marchandises aux USA était caractérisé par des marchés nationaux, une économie de la fabrication, la gestion des stocks, la fragmentation modale, la construction de système, la déréglementation économique, et une faible visibilité. Dans les années 1990/2000 ces tendances sont passées aux marchés mondiaux, à l'économie de services, à la gestion de l'information, à la coordination trans-modale, à l'optimisation des systèmes, à la réglementation de la sécurité et à la protection de l'environnement. Cette évolution a modifié la façon dont la marchandise voyage aux USA, ce qui a un effet important sur la vie quotidienne. La révolution technologique des années 90 a eu un impact direct sur ces phénomènes. Avec cette transition, le marché des véhicules commerciaux est devenu leader dans l'adoption des différents types de technologies de transport intelligent.

En 1996, les USA produisaient 847 milliards de \$ of de biens et services transportables, ce qui représente 11 % du PIB.

En 1997 (tous modes confondus) :

- Exportations US par transport de surface vers le Mexique = 64.2 milliards de \$
- Importations US par transport de surface depuis le Mexique = 72.2 milliards de \$
- Exportations US par transport de surface vers le Canada = 134 milliards de \$
- Importations US par transport de surface depuis le Canada = 155.7 milliards de \$

Les prévisions sont les suivantes :

Le tonnage total d'expéditions de marchandise primaire va augmenter de 21.2% entre 1997 et 2007

- La route en obtiendra 55,7 %
- Le rail en obtiendra 20,9 %
- Les voies navigables en obtiendront 20,1 %

Le revenu total dérivé de ces expéditions augmentera de 27.6 %

- La route en obtiendra 76,5 %
- L'aérien en obtiendra 12,6 %
- Le rail en obtiendra 7,3 %

Etant donné le contexte des informations ci-dessus, il est important d'étudier ces influences et leurs effets futurs sur les mouvements de marchandises aux Etats Unis et à l'étranger. La plupart des investissements en transport, soit par taxes publiques soit par investissements privés, interviennent sur le système routier national et ses connecteurs, et dans une moindre mesure dans l'infrastructure ferroviaire.

En résumé, on peut faire les observations suivantes :

1. Les poids lourds contribuent pour une très grosse part à l'économie américaine et leur part sera encore plus importante à l'avenir ;
2. Le volume et la valeur des marchandises sont en constante augmentation ;
3. Les villes et les ports américains sont embouteillés par les personnes et les services et le seront plus en plus à l'avenir ;
4. L'infrastructure des transports fluviaux, aériens et ferroviaires n'est pas conçue dans la plupart des cas comme alternative réaliste ou compétitive au transport routier ;
5. La mondialisation exige des améliorations des structures de la livraison et des services ;

2.2 Le Contexte de l'exploitation de poids lourds aux USA dans l'environnement actuel

2.2.1 Questions commerciales pour l'industrie des poids lourds

L'industrie des poids lourds est extrêmement compétitive aux Etats Unis. La déréglementation économique au début des années 1980 a permis une concurrence forte et continue. Il n'est pas rare de

voir de grandes entreprises fonctionner avec des marges bénéficiaires inférieures à 5 %. Cela oblige les entreprises à être vigilantes sur deux domaines :

- Comment et où réduire les coûts, et
- Comment optimiser les exploitations.

Nombre de grandes entreprises de transport routier ont adopté différentes applications technologiques pour optimiser leurs atouts (véhicules et conducteurs), et réduire les coûts – surtout dans les domaines de la gestion des stocks et des fonctions administratives comme la comptabilité et la facturation. Nombre d'entre elles ont également investi dans des stratégies et des technologies de logistique qui permettent d'augmenter la quantité de marchandise transportée, et d'augmenter ainsi les revenus. Avec plus de 600 000 entreprises de transport de personnes et de marchandises par véhicules commerciaux aux USA, l'industrie continue à rechercher les façons de se différencier sur le marché.

Au fil des ans le transport ferroviaire comparé à l'industrie des poids lourds n'a pas eu la performance voulue pour répondre aux besoins de livraison juste-à-temps des clients américains – cette tendance va durer dans les années à venir. L'infrastructure ferroviaire dessert bien certains segments du marché, mais dans une économie basée sur les services – c'est la tendance des USA – il faut davantage de souplesse dans la gestion du cycle de vie complet d'un produit, surtout dans le segment transport. Le transport routier va donc continuer à dominer dans les moyens de livraison.

D'après les résultats des entretiens menés par le Dr. Tsao (voir ci-dessous) auprès de représentants des flottes de poids lourds, les grandes flottes comme UPS, Airborne Express, et Federal Express sont prêtes à payer pour l'usage de voies de pelotons pour rendre leurs délais de livraison plus fiables. Leur première motivation est d'améliorer la rentabilité et ils utilisent la technologie comme l'un des moyens d'y parvenir. Ils subissent les effets adverses de la réglementation sur la taille et le poids. En particulier, ils pourraient améliorer beaucoup leur efficacité en utilisant des véhicules combinés plus grands (remorques multiples), mais cette idée est controversée chez les décideurs politiques car cela gêne les conducteurs de voiture de partager la route avec des véhicules aussi gros.

Les chauffeurs de poids lourds

Les chauffeurs jouent évidemment un rôle clé dans l'exploitation des poids lourds. Il y a actuellement un manque de chauffeurs poids lourds, et un roulement important du personnel routier. Comme les conducteurs "passent" de flotte en flotte à la recherche de meilleurs salaires et bénéfices, les coûts sont supportés par les flottes pour le recrutement et la formation de chauffeurs de remplacement. Les flottes investissent donc en vue de satisfaire le conducteur, en achetant des sièges haut de gamme et des systèmes de sécurité actifs.

2.2.2 La sécurité

Un nombre important d'accidents impliquant des poids lourds sont des accidents voiture-camion. Les recherches montrent que la majorité de ces accidents sont provoqués par les actions des conducteurs de voitures, qui ne comprennent pas ou ne respectent pas les réalités des opérations en présence de poids lourds. Les conducteurs de voitures qui entrent sur des points noirs de poids lourds ou qui

traversent la route devant des camions en leur laissant trop peu de temps de freinage, créent d'importants problèmes aux chauffeurs de poids lourds. L'Administration Fédérale de la Sécurité des Transporteurs Routiers des USA (the U.S. Federal Motor Carrier Safety Administration) met la priorité sur la réduction de l'occurrence et de la gravité des accidents voiture-poids lourds.

De plus, la rupture de circulation due aux accidents de poids lourds est importante en termes d'attente, surtout dans le cas de renversements de poids lourds qui bloquent plusieurs voies de grandes routes et demandent des heures pour le dégagement. Pour les camions transportant des matières dangereuses, les effets sont grandement multipliés, demandant parfois d'évacuer de larges zones.

Les flottes de transport routier sont très motivées par la sécurité d'exploitation. Les flottes étant généralement soit assurées par elles-mêmes ou bénéficient de fortes déductions (de l'ordre de 1M \$), les coûts liés aux accidents réduisent directement les bénéfices de l'entreprise.

2.2.3 Les facteurs sociétaux

Les facteurs sociétaux à examiner comprennent les tendances démographiques de la population et des centres d'affaires. Il continuera d'y avoir de très fortes pressions sur les grandes villes des USA. Chaque année, la productivité économique des USA dépend un peu plus des activités des entreprises situées dans les grandes villes et les grands ports. Cela entraîne l'afflux de personnes et d'entreprises vers ces plaques tournantes et leurs zones périphériques, créant une forte pression sur l'infrastructure de transport à l'intérieur et autour de ces emplacements.

Une autre tendance récente aux USA, est celle de la résurgence du concept de route à péage. Il y a un certain nombre de routes à péage dans le pays, et compte tenu du déclin récent de l'économie, les revenus des taxes ont diminué d'autant pour soutenir de nombreux services publics. Les péages offrant une alternative pour augmenter les taxes, comme certains pensent que c'est une stratégie de « contribution » plus exacte pour les usagers, de nombreux états l'envisagent comme alternative de source de revenus.

Une autre facteur sociétal est celui du partage de la route avec les poids lourds – en clair les Américains n'aiment pas cela. Des solutions de séparation entre la circulation des voitures et celle des poids lourds seraient les bienvenues, surtout si les taxes n'entrent pas en jeu.

2.3 Le Potentiel de voies pour poids lourds aux USA

L'une des clés du déploiement de l'automatisation des poids lourds est celle de l'exploitation sur voies dédiées. Les études et développement de ces « voies poids lourds » sont donc revues ici.

2.3.1 *Etude de la voie poids lourds SR 60 de Californie*

En 2001, une étude a été menée pour examiner les alternatives d'ajout de voies dédiées aux poids lourds sur la route à fort trafic SR60 de la région de Los Angeles, tronçon de 16 kilomètres entre la I-710 et la I-15. La SR60 est une route à accès contrôlé, c'est à dire une autoroute. Cet itinéraire dessert la majeure partie de la circulation poids lourds qui transporte de la marchandise dans les deux sens pour le port très actif de Long Beach. Un exemplaire complet de l'étude est fourni séparément. L'étude était motivée par le Plan de Transport Régional, qui identifie les voies dédiées aux poids lourds, comme moyen d'améliorer les mouvements de marchandises, la mobilité dans son ensemble, ainsi que la sécurité et la qualité de l'air. L'étude de l'équipe de la voie poids lourds s'est concentrée sur des facteurs tels que les différentes conceptions, l'impact financier, les exploitations routières, et les problèmes de sécurité, d'environnement et de bénéfices / pertes pour la région.

L'équipe de l'étude a conclu que les voies poids lourds sur la SR60 sont faisables dans certaines conditions ; cependant, il y a de nombreux obstacles à la mise en œuvre, le coût étant le principal problème. Le Bureau Caltrans des Nouvelles Technologies (Caltrans Office of New Technology) lance à présent une nouvelle étude pour examiner de quelle manière la technologie d'automatisation des poids lourds peut réduire les coûts et les impacts physiques des voies poids lourds. Par exemple, potentiellement, une capacité suffisante peut être apportée par une voie poids lourds automatisée si bien que les deux voies manuelles recommandées dans l'étude de 2001 ne seraient pas nécessaires. En conséquence, d'importantes réductions de coûts pourraient être obtenues.

A partir des données de 1994, les volumes de camions par heure et par direction sur la SR60 allaient de 1 100 à 2 000 (suivant le segment). Les projections pour 2020 vont de 2 200 à 4 000 camions par heure et par direction. L'autoroute est également embouteillée par la circulation normale des voitures. Il faut absolument ajouter de la capacité.

L'étude concluait qu'il fallait ajouter deux voies par direction pour satisfaire cette demande. L'apport de ces quatre voies supplémentaires aussi bien par surélévation que par construction de routes sur le même niveau a été étudié de façon détaillée. La route surélevée est faisable du point de vue technique, mais le coût est estimé à 4.3 milliards de \$; d'après les estimations, le péage de la voie pour les usagers poids lourds ne devrait couvrir qu'un quart de ce coût. La route sur le même niveau entraînerait des coûts importants et une rupture sociale dans l'acquisition du droit de passage.

Le rapport comporte un débat très utile et approfondi sur les démarches en matière de voies poids lourds aux USA en général et les résultats des recherches et de la modélisation de la circulation dans ce domaine. Les problèmes concernant les voies exclusives sont abordés sous l'angle des problèmes de fonctionnement, de sécurité, des problèmes économiques, législatifs/politiques, environnementaux, et des problèmes de société / opinion publique. Concernant ce dernier point, le rapport affirme que « l'obstacle le plus important aux installations exclusives pour poids lourds peut être l'opinion publique ». Le rapport note que généralement le public résiste à toute stratégie favorable à la circulation des poids lourds ; en même temps, les gens sont en général favorables aux voies réservées aux poids lourds, ce qui leur permet de rouler sur des voies sans camions.

2.3.2 *Le pont international Whirlpool pour poids lourds*

Un nouveau pont pour poids lourds en cours de construction donne un exemple intéressant d'application de voie réservée aux poids lourds.

A Niagara Falls, dans l'Ontario au Canada, un nouvel itinéraire international de transport de marchandises dédié aux poids lourds est en cours de construction grâce à un partenariat commercial bi-national centré sur l'ancien pont ferroviaire de Niagara entre cette ville et sa contrepartie de l'Etat de New York. Une chaussée dédiée à trois voies sur l'ancien pont ferroviaire est en cours de construction et devrait accueillir la circulation des poids lourds et soulager la congestion croissante de cette traversée frontalière. La compagnie du pont international Whirlpool pour poids lourds Inc. (U.S.A.) a acquis le pont et a investi 220M \$ pour la reconstruction d'un pont dédié à péage international à l'usage exclusif des grands poids lourds. La reconstruction doit commencer en 2003 et durer cinq ans.

Le pont d'acier passant à 75 mètres au-dessus du Niagara, a été construit pour la compagnie Michigan Central Railway au début des années 1920 et ouvert à la circulation en 1925. Sur sa longueur de 378 mètres, environ 215 mètres sont situés aux Etats Unis, les 163 autres mètres étant situés au Canada.

2.3.3 *Proposition d'un péage pour poids lourds par le Reason Institute*

L'Institut Reason de Politique Publique (The Reason Public Policy Institute), institut politique respectable situé en Californie, propose une approche intéressante pour la construction de voies exclusivement dédiées aux poids lourds aux USA. Leurs propositions sont résumées dans la Synthèse Politique (Policy Summary) No. 294, intitulée **péages pour poids lourds : une nouvelle voie vers la sécurité et un transport de marchandises plus efficient**. Un résumé incluant des extraits est présenté ci-dessous.

Du point de vue de l'industrie des poids lourds, le transport routier aux USA est gêné par des réglementations incohérentes au niveau des états concernant la taille et le poids des véhicules. Dans la plupart des états de l'est, seuls les semi-remorques standard sont autorisés, alors que plusieurs états de l'ouest autorisent les combinaisons de double et triple remorques. L'étude note qu'il serait possible de faire des économies très importantes de coûts d'expéditions en permettant de former des véhicules plus longs à remorques combinées dans tout le pays. Cependant, il existe une forte opposition dans le public au partage de la route avec les véhicules à remorques combinées. La chaussée séparée pour poids lourds résoudrait ce problème, mais comment la payer ?

Cette étude propose d'ajouter des voies spécialisées pour les camions spécialisés dans les chargements lourds sur les grands axes actuels, surtout pour les itinéraires inter-états de longue distance dans les états qui n'autorisent pas actuellement les remorques combinées. Dans ces états, les multi-remorques seraient autorisés à circuler mais seulement sur les nouvelles voies, qui seraient réservées aux poids lourds uniquement. Ces voies seraient séparées de la circulation générale par des barrières, pour former des voies poids lourds séparées. L'analyse de faisabilité de l'Institut conclut que

les gains de productivité permis par ces voies poids lourds seraient tellement importants que les entreprises de transport routier seraient prêtes à accepter des péages pour les emprunter (et resteraient bénéficiaires sur le plan financier après avoir réglé les péages). Elles appellent donc ces voies des voies d'auto-financement à péage pour poids lourd.

Ré-exploitations de faisabilité, ingénierie, et coût

Une étude de faisabilité sur le financement et la construction de ces voies poids lourds à péage ont donné des résultats prometteurs. Des données monde réel ont été utilisées pour créer un modèle d'installation hypothétique de voie poids lourds. Ce modèle consistait en une seule voie poids lourds dans chaque direction, avec des voies de dépassement fréquentes, construites au milieu d'une route inter-états existante. Les voies poids lourds seraient séparées des voies normales par des barrières de béton Jersey. Il y aurait des aires de stationnement ponctuel régulières près des villes ou des carrefours avec d'autres autoroutes, où les remorques multiples pourraient être divisées en semi-remorques simples pour effectuer la fin de leur trajet sur des axes classiques. La première étape du processus était la conception d'une configuration de chaussée pour chargements lourds, qui a été testée pour les exigences d'usure et d'entretien dans différentes conditions de circulation de camions à chargement lourd. Le couloir hypothétique était une route existante à trois voies dans chaque direction avec une circulation moyenne journalière de 40 000 véhicules dont 20 % était constituée de camions à chargement lourd. Une fois l'installation dédiée aux poids lourds ajoutée à ce couloir, l'impact sur la chaussée aussi bien sur les voies classiques que sur les voies poids lourds a été estimé, en fonction de la fraction de circulation poids lourds qui passe vers les voies dédiées aux poids lourds.

La seconde étape devait analyser les améliorations de productivité permises par ces voies poids lourds, à partir d'une analyse à la fois des camions standard et des camions multi-remorques. Les résultats ont montré que de forts gains de productivité sont possibles si les entreprises de transport routier tirent pleinement parti des nouvelles voies pour camions à chargement lourd. Pour les états où les limites sont les plus restrictives (e.g., presque tous les états de l'est), le 18-roues standard pourrait augmenter sa charge de fret de 115 % et le double remorque long pourrait transporter 492 % de charge utile en plus (simplement grâce à l'augmentation de l'espace cubique). Pour les états qui autorisent déjà les exploitations de multi-remorques, les gains seraient moins spectaculaires, mais resteraient importants : 62 % de charge utile en plus pour les 18-roues et 57 % de plus pour les doubles longs.

Ensuite, l'équipe du modèle a étudié le potentiel du péage pour voies poids lourds. On a fait l'hypothèse que les routiers seraient prêts à payer un péage allant jusqu'à la moitié des économies de coûts qu'ils réaliseraient grâce à l'exploitation de leurs multi-remorques sur les nouvelles voies. Cela donnait une gamme de niveaux de péages éventuels allant de 0.43 \$/mi. 1.86 \$/mi. Cependant, d'autres analyses n'ont pas utilisé les nombres les plus élevés de cette gamme. L'analyse de faisabilité a estimé à la fois les coûts en capitaux pour la construction des voies poids lourds et les coûts d'exploitation et d'entretien aussi bien sur les deux voies existantes (qui reçoivent maintenant moins de circulation poids lourds) que sur les nouvelles voies poids lourds. Parmi une grande série de

scénarios, la valeur actuelle nette des projets de voies poids lourds a été évaluée comme positive, ce qui indique l'apport de bénéfices nets pour la société.

La dernière partie de l'analyse étudiait le développement et l'exploitation de voies poids lourds en tant que possibilité commerciale, soit pour un bureau de péage d'état, soit pour un consortium privé. Cette analyse a calculé le taux de retour interne (IRR – Internal Rate of Return) pour un projet de voie poids lourds sur la route inter-états de 40 000 ADT, financée uniquement par les revenus des péages. Huit scénarios au moins avaient un IRR positif, bien qu'ils ne soient pas tous assez élevés pour attirer des investisseurs du secteur privé. Cependant, tous seraient des candidats convenables pour un bureau de péage d'état.

L'Institut caractérise ses résultats comme assez conservateurs, dans la mesure où l'analyse n'a utilisé que les configurations de remorques multiples, en laissant de côté la possibilité réelle de développement de camions de plus forte capacité et de leur utilisation sur les voies poids lourds à chargement lourd. Le niveau de péage le plus élevé utilisé dans les calculs du retour sur investissement (ROI - Return-on-Investment) était de 80 cents/mi., même si dans bien des cas l'approximation selon laquelle les péages pourraient atteindre la moitié du montant des économies réalisées impliquerait un péage beaucoup plus élevé. Si ces niveaux de péage avaient été inclus dans l'analyse, le retour sur investissement aurait été beaucoup plus élevé.

Faisabilité politique

Mais les voies à péage pour poids lourds sont-elles faisables sur le plan politique ? Jusqu'à maintenant, l'industrie routière s'est opposée à l'expansion de routes à péages, pour des raisons de "double taxation." En d'autres termes, les camions à chargement lourd paient déjà des taxes de carburant (et autres droits d'accise) d'environ 16 cents/mi.. Sur les routes à péage actuelles, ils paient un péage en plus de ces taxes. Donc, les camions sur routes à péage "paient deux fois" par rapport à ce qu'ils paient sur des routes inter-états gratuites. L'analyse économique et financière de l'Institut a constaté que les axes inter-urbains pour poids lourds pourraient être autoportants grâce aux péages uniquement. En d'autres termes, la construction et l'exploitation de ces nouvelles voies n'auraient pas besoin des fonds des groupements fédéraux ni des autoroutes de l'état venant des taxes des différents usagers. Donc, l'Institut recommande que les camions qui utilisent ces voies auto-financées ne paient pas de taxes de carburant pour les kilomètres parcourus sur ces voies. Cela éliminerait la préoccupation de l'industrie routière sur la double taxation, pour cette nouvelle infrastructure. Cela contredirait également l'argument de l'industrie ferroviaire selon lequel les fonds publics ne devraient pas être utilisés pour "subventionner" sa concurrence avec les longs semi-remorques. Les camions à remorques multiples opérant sur les voies poids lourds à péage seraient analogues à des trains de marchandises opérant en compte propre, auto-financés par des droits de passage ferroviaire. La technologie du péage électronique permettrait de connaître le kilométrage parcouru par chaque camion sur la voie poids lourds et à partir de la moyenne de consommation de carburant pour une classe de taille/poids donnée, le système pourrait calculer la réduction sur la taxe de carburant applicable à chaque trajet. Ces informations seraient transmises aux autorités fiscales de l'état qui accorderaient des réductions périodiques aux entreprises routières enregistrées comme usagers de la voie poids lourds.

L'institut a examiné l'effet de ces remises sur les fonds de l'industrie routière. Facteur important, les voies poids lourds ne seraient mises en place que sur les axes où il y avait déjà une circulation de poids lourds et où dans les 20-30 ans d'aménagement à venir il y aurait besoin d'une voie supplémentaire. Une administration d'état qui autorise une voie poids lourds sur un axe obtiendrait donc la nouvelle capacité nécessaire sans avoir à payer soit les coûts en capitaux soit les coûts d'exploitation et d'entretien. De plus, plus il y a de circulation qui passe des voies existantes vers les voies poids lourds, plus l'administration de l'état réalise d'économie sur les coûts d'entretien et d'exploitation des voies classiques. A partir de leur analyse, le coût épargné pour l'administration de l'état est de plusieurs fois supérieur au coût net des remises, ce qui donne une perspective financière attractive.

Sites de déploiement initial

Le rapport note que certains sites prometteurs existent pour un déploiement initial de cette approche en tant que test pilote. Comme exemple, on peut citer une construction de "pont" pour relier deux segments d'autoroutes à péage qui permettent aux remorques multiples de traverser des zones où ils n'ont pas l'autorisation d'accès. C'est le cas entre la route directe de New York et l'autoroute à péage de l'Ohio, puisque la courte section intermédiaire de Pennsylvanie n'autorise pas de remorques multiples sur les autoroutes gratuites.

Synthèse

En résumé, en augmentant de façon importante la capacité de charge utile des camions, les voies poids lourds à péages réduiraient le coût d'expédition de la plupart des marchandises américaines, améliorant l'usage du vaste réseau d'autoroutes nationales. Mais en séparant une grande part de la circulation poids lourds de celle des voitures, les voies poids lourds réduiraient l'ampleur des collisions voitures-camions, améliorant ainsi la sécurité routière. En permettant de transporter plus de marchandises dans moins de camions, les voies poids lourds produiraient des bénéfices environnementaux. En utilisant le financement des péages, cet apport important au système autoroutier pourrait intervenir pour financer des groupements autoroutiers à un coût inférieur à celui d'un financement des voies poids lourds à partir des revenus des taxes sur le carburant.

Les documents suivants peuvent être téléchargés à partir du site RPPI (www.RPPI.org) :

- Policy Summary No. 294, titled Toll Truckways: A New Path Toward Safety and More Efficient Freight Transportation (a six page executive summary of their proposal and supporting analyses)
- Toll Truckways: A New Path Toward Safety and More Efficient Freight Transportation, June 2002 (full report)
- Frequently Asked Questions regarding the Toll Truckway concept

2.3.4 Voies dédiées aux poids lourds dans la région de San Diego

Au cours de cette recherche, BC a tenu une session de réflexion avec Mr. John Duve, Advanced Transportation Systems – Systèmes de Transports Avancés, Association de Gouvernements de San Diego (San Diego Association of Governments - SANDAG), Organisation d'Aménagement Métropolitain (Metropolitan Planning Organization). Mr. Duve travaillait dans la recherche sur l'automatisation du véhicule menée par le Consortium National du Système Autoroutier (National Automated Highway System Consortium) dans les années 90 et a intégré ces expériences avec le besoin d'amélioration des mouvements de marchandises dans sa région.

Il note que si l'on remonte au début du système d'autoroutes inter-états en 1956, l'idée de départ concernait les mouvements de marchandises pour la logistique militaire. Dans un sens, nous avons commencé par les "voies poids lourds" qui se sont remplies de voitures au fur et à mesure du développement de la mobilité de la société américaine.

Actuellement, Mr. Duve est responsable de la conception d'un système de transport de marchandises par air / terre / mer dans la région de San Diego. Les voies poids lourds jouent un rôle clé, et il a élaboré plusieurs scénarios :

Projet de démonstration sur les voies de pelotons de voitures I-15

Tandis que ces voies ont été construites pour desservir la circulation de banlieue aux heures de pointe, on observe qu'elles sont inutilisées le reste du temps. Les camions pourraient emprunter ces voies en dehors des heures de pointe, et une démonstration à court terme de ce concept sur les voies I-15 pourrait entraîner un transfert vers un large déploiement de ce concept.

Réseau de voies HOT ouvert aux camions

Actuellement, San Diego a un réseau de voies de véhicules multi-occupants (High Occupancy Vehicle - HOV) (20 miles) utilisé pour desservir la circulation de banlieue aux heures de pointe. Des aménagements devraient étendre ce réseau à tout le système autoroutier de la région, créant un kilométrage généralisé de voies dédiées. D'après la description ci-dessus, on étudie un concept d'usage de la route par les poids lourds en dehors des heures de pointe, à la fois pour améliorer les flux de circulation et pour réduire le nombre de camions sur les voies classiques. Potentiellement, des voies pourraient être dédiées à cet effet jusqu'à 75 % du temps sur 24 heures.

Conversion des voies pour véhicules multi-occupants en voies pour poids lourds

En raison d'autres projets d'aménagement, le potentiel de construction de voies HOV est en cours d'examen, de telle façon que les voies HOV puissent être exclusivement dédiées à l'exploitation du transport routier.

Gros flux de marchandises aux passages frontaliers

Il existe une zone de très gros flux de marchandises depuis la frontière de Otay Mesa avec le Mexique vers une installation de transfert intermodal située à 60 kilomètres au nord. Des « voies rapides » sont déjà mises en place à la frontière avec une douane électronique qui améliore le passage direct des camions. Etant donné le volume de fret, il serait possible de faire des économies en construisant de nouvelles voies dédiées aux poids lourds. Comme ce seraient des voies express, il y aurait besoin de moins de rampes d'accès/sortie que sur autoroutes conventionnelles.

La proposition du Reason Institute pour des voies poids lourds à péages est considérée comme prometteuse pour certains de ces scénarios. En particulier, il y a des incompatibilités de réglementations sur la taille et le poids des camions entre les USA et aussi bien le Canada que le Mexique, ce qui demande de reconfigurer les camions aux frontières. Cette reconfiguration ne serait pas nécessaire si les voies poids lourds à péage autorisant les remorques multiples étaient installées à ces emplacements. Ce changement irait dans le sens des objectifs de l'Accord Nord Américain sur le Libre Commerce (North American Free Trade Agreement - NAFTA).

Les activités de SANDAG doivent inclure la spécification d'exigences minimum et un pas vers la normalisation des équipements qui fonctionneraient sur les voies poids lourds. Les zones de définition des exigences doivent comprendre :

- L'épaisseur du béton
- L'électronique
- La pente
- La vitesse minimum

SANDAG a commencé des discussions avec l'Association Sud Californienne des Gouvernements (Southern California Association of Governments - SCAG) pour mettre au point une stratégie complète de transport de marchandises en Californie du Sud.

2.3.5 Etude I-10 d'un couloir de transport de marchandises

Un travail intitulé Etude nationale I-10 d'un couloir de transport de marchandises a été terminé en mai 2003 sur la route inter-états 10 qui traverse le sud des USA de San Diego vers Jacksonville à l'ouest de la Floride puis vers l'est de la Floride. Dirigés par la Californie, les huit états situés sur ce couloir ont participé.

L'objet de l'étude était d'analyser les mouvements de marchandises actuels et futurs, d'évaluer la manière dont les volumes actuels et futurs de fret ont un impact sur les systèmes de transport local et national, et de développer des stratégies pour améliorer le transport de marchandises le long du couloir.

Le corridor I-10 fait plus de 1 500 km, dont environ 250 km sont régulièrement embouteillés. D'ici 2025, on escompte que plus de 930 km seront congestionnés à moins de prendre des mesures. D'ici là on escompte une augmentation de la circulation poids lourds de 118 %.

Différents problèmes afférant au transport de marchandises ont été examinés :

- Elargir le I-10 pour répondre à la demande future
- Mettre en place des systèmes de transport intelligent
- Créer une séparation camions/voitures (soit par des restrictions sur les voies ou par une séparation physique)
- Couloir ferroviaire multimodal
- Intermodal maritime
- Contournement des poids lourds en zone urbaine
- Productivité du transport routier, en matière d'augmentations de la taille et du poids des véhicules
- Autres, y compris le transfert de l'exploitation des poids lourds hors des périodes de pointe

Un résumé des résultats clés de l'étude est présenté ci-dessous :

- Le transport de marchandises est central pour la performance de l'économie américaine, et contribue de façon décisive à sa compétitivité sur le marché mondial.
- La tendance se poursuit vers une économie de services, où la fiabilité est essentielle et qui va faire augmenter le volume de transport de marchandises sur autoroute à un rythme estimé à près de deux fois supérieur à celui des automobiles d'ici à 2025.
- Les autoroutes sont essentielles à l'efficacité des autres éléments du système de transport de marchandises, y compris les ports, les voies navigables et le ferroviaire.
- L'augmentation de la capacité sur les couloirs à fort volume est la meilleure méthode pour faire diminuer la congestion.
- L'augmentation du financement est essentielle pour garantir la poursuite du mouvement des marchandises sur autoroute de façon aussi efficiente et productive que possible.
- Les problèmes liés à la demande de transport de marchandises vont au-delà des juridictions des villes et des états.
- Le processus de décision du financement des améliorations devrait reposer en partie sur un système de points frontières et de couloirs qui facilite le mouvement des marchandises et des

personnes, avec la reconnaissance des juridictions qui couvrent les couloirs de forts volumes de transport.

Plus spécifiquement, on a retenu trois traitements à fort potentiel pour accroître la capacité : élargir le I-10, mettre en place une séparation camions/voitures, et construire des contournements pour les camions en zones urbaines. L'ITS est considéré comme offrant un rapport coût/bénéfice de 3:1. Le multimodal ferroviaire, l'intermodal maritime, et la productivité des camions sont considérés comme ayant un très faible impact.

Les concepts de voies poids lourds présentés dans le rapport Reason sont considérés comme prometteurs par les participants de l'étude ; cependant ils pensent qu'il faut faire d'autres études en termes d'exploitation de la circulation et de conception / ingénierie.

Le rapport parle d'“innovations dans la séparation automatique des camions à l'aide de techniques de flux de masses pour améliorer la productivité du transport de marchandises” comme d'un domaine prometteur.

Le rapport final, la synthèse, et le rapport technique sur ces travaux peuvent être téléchargés à partir du site www.i10freightstudy.org.

2.3.6 Débat sur les options des voies poids lourds

Voies poids lourds SR60

Il faut noter que ni cette étude ni les précédentes n'ont démontré que les voies poids lourds étaient économiques en termes de méthodes de financement classique, ce qui montre bien les graves difficultés rencontrées pour ajouter de nouvelles voies aux autoroutes en place en zones urbaines. Cependant, dans ces études, les avantages des combinaisons longues de véhicules n'ont pas été étudiés, ni ceux de l'exploitation à vitesse plus élevée.

Concept des voies poids lourds à péage

Aux Etats Unis, la taille et le poids des camions est un problème très politique. Il y a plusieurs arguments types contre la libéralisation des limitations :

- 1) Les infrastructures peuvent être endommagées et elles ne sont pas faites pour de trop gros poids lourds
- 2) Dangers
- 3) Prise de part de marché au ferroviaire

4) Le volume de marchandises ne changera pas au bout du compte

Le rapport de la Fondation Reason sur les routes à péage pour camions présente un concept réaliste pour minimiser la politisation du problème, tout en offrant une stratégie économique valide qui limite l'impact sur le groupement des autoroutes et le contribuable. Cependant, les défis du déploiement de voies à péage pour camions et / ou de l'automatisation ne sont pas sans importance.

Revenus

On entend souvent une expression toute faite dans les cercles des transports : “le transport de marchandises ne vote pas”. Dans nombre de grandes métropoles où les volumes de marchandises sont importants, les terrains nécessaires à la construction de ces routes atteignent des prix faramineux. Les décideurs et le gouvernement auront du mal à construire ces routes – surtout si cela ne rapporte rien à l'état (i.e. revenus des taxes). Le paysage politique actuel aux USA voit le Congrès en difficulté dans ses délibérations sur la ré-autorisation du programme de transport qui essaie de trouver les revenus nécessaires pour payer les améliorations dont le réseau de transport a tant besoin. Bien que la situation économique actuelle s'améliore aux USA, de nombreux états ont également un besoin urgent de sources alternatives de revenus pour fournir les services de base. Il est donc probable que le modèle commercial pour les voies dédiées aux poids lourds aux USA exigera une certaine rentabilité pour le Gouvernement. Le rapport de la fondation Reason crée un modèle qui est entièrement financé par le secteur privé, et bien que ce modèle soit innovant, il est peu probable qu'il devienne courant. Dans ce modèle, l'état perd deux fois – aucun revenu n'est généré par l'installation et les usagers sont “exemptés” de taxes sur le carburant. Une option pourrait être la “location” par l'exploitant routier du terrain à l'état, créant ainsi un partenariat public-privé où chacun partage le revenu. De plus, ce modèle permettrait à l'opérateur de gérer la propriété et les services de l'utilisateur de l'institution en tant que partie de l'infrastructure routière, où l'état pourrait obtenir une part du revenu.

Le gouvernement joue là un rôle important, car les mouvements de marchandises sont par nature des mouvements inter-états. Il faudrait développer des modèles de financement fédéral appliqués aux passerelles de transport de marchandises et aux centres de chargement pour faciliter le développement des voies dédiées aux poids lourds. Cela n'est pas seulement vrai pour la circulation type des poids lourds mais aussi pour le transport intermodal de marchandises. Une étape importante dans cet effort a été franchie le 20 novembre 2003 avec l'introduction par les représentants du Congrès du TEA-LU (H.B. 3550), projet de loi de ré-autorisation du Ministère des Transports des USA. Il y a dans ce projet un “paramètre fictif” pour un programme de voies poids lourds dédiées qui sera financé à hauteur de 1,5 milliards de \$ pendant la durée du projet de loi. D'autres dispositions du projet de loi et des niveaux de financement vont loin dans la reconnaissance de l'importance du transport de marchandises et créent différents programmes (Sous-titre C du programme fédéral d'aide à la route) avec des niveaux de financement importants.

Installation multi-usages

Afin d'aider à vendre ce concept, il faut prendre en considération la création d'une installation multi-usages, qui pourrait avoir d'autres usages dans certaines circonstances. Les véhicules de secours, les convois militaires, les catastrophes naturelles, les événements météorologiques extrêmes, les événements spéciaux, le transport de marchandises spécialisé, la circulation aux heures de pointe et le transport de marchandises avec incitation (i.e. primes, transporteurs les plus sûrs, expéditions très précises dans le temps) sont des exemples de fonctions supplémentaires que ce type de route pourrait remplir pour aider à la gestion de la congestion et faciliter les services de transport en cas de besoin. Il faudrait apporter une considération spéciale à la création de ports intérieurs reliés aux grands centres portuaires de chargement où des conteneurs intermodaux en provenance des bateaux pourraient être directement transportés vers des voies dédiées aux poids lourds et acheminés vers un port intérieur où les expéditions pourraient être redivisées pour les trajets suivants par route ou par rail vers leur destination finale. Cette approche permettrait de diminuer un peu les exigences d'espace d'inventaire aux ports, créant ainsi d'autres occasions commerciales pour l'usage de cet espace. Ce type de service serait en concurrence directe avec le transport ferroviaire, mais étant données les prévisions d'augmentation des expéditions de conteneurs en provenance et à partir des USA, il y aura sûrement assez de travail pour que les deux modes soient concurrentiels et rentables. Un bénéfice annexe de cette approche pourrait être une meilleure sécurité de ces expéditions – puisqu'elles se feront sur voies dédiées et que la marchandise sera en mouvement constant et dans un environnement maîtrisé, l'altération de la marchandise et les éventuels détournements diminueront. Dans chacun de ces cas il serait possible de créer différentes structures de redevance et de protocoles pour l'usager.

Efficiencia

D'après le rapport de la fondation Reason, il y a d'importants bénéfices économiques à percevoir de la mise en place de voies dédiées aux poids lourds. Ces bénéfices peuvent être réalisés non seulement par l'industrie mais aussi par le Gouvernement et la société. C'est un facteur important dans l'appréciation des différents modèles commerciaux et aussi pour les gouvernements qui doivent faire des efforts de recrutement pour attirer les activités commerciales et localiser leurs juridictions.

Sécurité et responsabilité

L'usage de voies dédiées aux poids lourds améliorera probablement la sécurité dans la mesure où il y aura moins d'accidents mortels multi-véhicules. Avec une composition plus homogène de la circulation, l'incidence de véhicules "différents" impliqués dans des accidents va diminuer. Bien que ces voies puissent ne pas faire diminuer le nombre total d'incidents, elles réduiront certainement leur gravité en termes de dommages à la fois matériels et corporels. Cela aidera également à réduire la taille et le nombre d'actions litigieuses, le nombre de plaintes des assurances et à faire diminuer les primes payées par les usagers.

Equipement

Après le carburant, les pneus sont le second poste de dépenses pour les transporteurs. Si les voies dédiées aux poids lourds pouvaient être construites avec des techniques de revêtement qui minimisent l'usure des pneus, l'économie en serait fortement augmentée.

Perspectives pour les flottes

Des débats sur les voies dédiées aux poids lourds se sont tenus avec le Vice President de la Sécurité pour une grande flotte américaine, et peuvent être synthétisés de la façon suivante :

- Le concept a du mérite, mais pour des applications de niche. Comme cette flotte est un transporteur à itinéraires irréguliers, elle ne correspondrait sûrement pas bien à leur modèle d'exploitation. On suggère : 1) un transport dédié, 2) des livraisons précises dans le temps, 3) un transport long, et 4) dans certains cas le gouvernement peut "mandater" ou "stimuler" certaines expéditions pour utiliser cette alternative.
- Le dossier commercial devrait être très solide.
- Il faudrait un soutien politique bi-partite. C'est un travail à long terme qui demandera un engagement très important.
- Les économies de carburant potentielles sont très intéressantes, car le carburant est le coût numéro un des transporteurs.

Scenarios SANDAG

Le processus de planification de SANDAG doit être profitable à l'étude de concepts innovants de voies poids lourds. Une fois les voies dédiées construites pour quelque usage que ce soit, différentes possibilités sont offertes. Une autre application potentielle est l'usage des voies pour véhicules multi-occupants comme voies de transit, avec des installations spéciales construites pour le chargement des passagers. En raison des dispositions de l'Acte sur la Pollution Atmosphérique (Clean Air Act), qui demandent un aménagement fréquent des autoroutes pour inclure une composante de transit, ces facteurs pourraient être cruciaux pour l'approbation fédérale de projets.

Couloir I-10 de transport de marchandises

Les résultats de cette étude sont prometteurs dans la mesure où les problèmes de transport de marchandises ont été exposés clairement de façon à insister sur le besoin de nouvelles approches pour traiter les flux de poids lourds. Leur soutien à la proposition Reason contribue également à rendre l'environnement réceptif pour continuer dans le sens de ces approches.

Général

SANDAG et SCAG soutiennent fortement le concept de voies poids lourds à péage, et leur pouvoir conjoint dans la région peut suffire à réaliser le déploiement dans cette région. De plus, ils peuvent former un partenariat pour faire pression sur la sélection du site de

déploiement pour le programme de voies poids lourds dédiées initial de 1.5 milliards de \$ dans la nouvelle législation fédérale.

Les opérateurs des ports en Californie du sud (Long Beach et Los Angeles) étudient également l'approche des voies poids lourds ; cependant selon certaines indications, l'usage des voies pour véhicules multi-occupants en dehors des heures de pointe sont plus attractives dans un premier temps.

Etant donné les différents scénarios et le soutien en faveur des voies poids lourds, on pense qu'elles seront bien construites sous une quelconque forme au cours des 5 à 10 prochaines années.

2.4 Vers une exploitation automatisée du transport routier : démarches et problèmes

2.4.1 Problèmes généraux

BC a examiné différents problèmes contextuels concernant l'automatisation des poids lourds, et les résultats sont présentés ci-dessous :

Quels types de mouvement de marchandises bénéficieraient le plus de l'automatisation des poids lourds ?

- Des itinéraires de transport de marchandises dédiés ou constants ;
- Opérations de camionnage sur courte distance (services de "navette" surtout aux ports et aux traversées frontalières)
- Grandes charges (remorques multiples)
- Zones où la congestion pose problème, la circulation est variable et les accidents/incidents sont courants
- Zones à forte densité de transport de marchandises
- Ports maritimes et aériens à forts volumes de fret
- Marchandises de faible valeur et peu fragile
- Régions ayant de nombreuses autoroutes inter-états et échangeurs intermodaux
- Régions mal desservies par l'infrastructure fluviale ou ferroviaire

- Couloirs à forts volumes de transport de marchandises
- Etats ayant des manques à gagner
- Etats ayant beaucoup de routes à péage
- Régions où il est possible d'acquérir la priorité pour les poids lourds uniquement ou pour des exploitations à usage spécial
- Régions ayant une infrastructure de transport inadéquate, à la fois en termes de type et de qualité

Qui pourraient-êtré les premiers à adopter les voies dédiées ?

Les grands transporteurs routiers, qui investissent en général des capitaux pour financer les idées innovantes, normalement dirigées par l'industrie du transport routier. Ils possèdent également les volumes de marchandises voulus et la clientèle qui permet ce type d'exploitation. Ils ont également des chauffeurs ayant différents niveaux d'expertise et recherchent toujours des chauffeurs qualifiés. Pour l'automatisation du transport de marchandises il est également important d'avoir un état désireux d'explorer le concept. C'est pourquoi les points listés ci-dessus sont tellement importants.

Les parties prenantes les plus importantes sont les chargeurs, surtout pour les flux de marchandises des ports. Les chargeurs se concentrent sur les trajets de porte à porte, et ont souvent des contrats avec les entreprises de transport routier pour livrer la marchandise de façon fiable tout le long du parcours et des étapes du voyage. Si l'automatisation des poids lourds peut accélérer les expéditions et rendre les délais de livraison plus fiables, les chargeurs sont susceptibles de soutenir le projet et donc de mener l'adoption par les entreprises de transport avec lesquelles ils travaillent.

Quels aspects commerciaux de l'automatisation des poids lourds apporteraient des bénéfices ?

- La rapidité des livraisons (rapidité accrue signifie plus de volumes et de revenus)
- La stabilité des mouvements (possibilité de prévoir les fenêtres de livraison)
- Amélioration des économies de carburant
- Réduction des primes d'assurance
- Réduction du coût pour le client
- Facilité d'exploitation (interaction limitée et prévisible entre le conducteur et l'exploitation/entretien du véhicule)
- Amélioration de la sécurité et réduction des coûts d'entretien

Quels sont problèmes de réglementation qui pourraient se poser ?

Cela dépend réellement du ou des scénarios de déploiement, mais plusieurs problèmes pourraient éventuellement se poser :

- Qualification des conducteurs
- Heures de service
- Exigences des assurances
- Tests d'alcool et de drogues/médicaments
- Exigences d'entretien

Il y a des problèmes d'exploitation à prendre en considération qui se posent à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de la conformité des chargeurs avec la loi. L'une des questions est de savoir de quelle façon la loi interdit ces conducteurs et ces véhicules ?

Problème des chauffeurs – pour accepter ces systèmes, que devraient accepter les conducteurs ?

Les chauffeurs aiment conduire – c'est leur métier. Certains experts disent que pour permettre aux chauffeurs d'accepter ces systèmes, il faudrait qu'ils soient encore en mesure de conduire s'ils le souhaitent. Il faudrait également qu'ils aient la possibilité d'être plus productifs pendant leur temps de travail (la définition de la productivité varie suivant les chauffeurs). Nombre de grands transporteurs offrent des améliorations technologiques et des itinéraires dédiés en récompense à leurs chauffeurs les plus anciens ou les plus chevronnés en matière de sûreté. Si ces améliorations servent d'incitation elles peuvent accélérer l'acceptation de l'usager. Si l'aspect commercial peut être développé pour générer davantage de bénéfice net aux transporteurs, ils pourront alors augmenter le salaire des chauffeurs qui effectuent ces trajets.

Quels sont les critères généraux de réussite ? (à la fois d'après les chargeurs et les transporteurs)

- L'effet sur le résultat
- Le degré d'amélioration de l'efficacité
- Le degré d'augmentation de la productivité
- Le degré d'amélioration pour l'environnement
- Le degré d'amélioration de la sécurité
- Le degré d'acceptation du conducteur
- L'identification de types spécifiques d'exploitation ou de paramètres de livraison qui se prêtent le mieux à l'automatisation des poids lourds

- Le degré de possibilité de réduire les obligations réglementaires pour les transporteurs et les chauffeurs
- Le fait de rendre les moyens de “taxation” de l’industrie du transport routier plus exacts et plus justes (d’après eux).

Champions

Il est difficile de capter l’attention du public sur ce problème. Le mouvement des marchandises est vital pour l’économie mondiale, mais les gens ne comprennent pas la façon dont cela les affecte. Ils ne le “voient” pas dans leurs vies quotidiennes comme ils voient les embouteillages sur leur trajet domicile-travail, ou leurs dépenses médicales et autres obligations financières quotidiennes. Il est donc important d’identifier les personnes capables d’influence pour aider à institutionnaliser l’importance du transport de marchandises dans l’esprit du public. Le message à diffuser est tout aussi important.

2.4.2 Scénarios de déploiement potentiel

Systemes précurseurs

Le BC propose que la fonctionnalité de Chauffeur Assistant soit mise sur le marché par les voies normales – les flottes voient des avantages à donner aux chauffeurs les dispositifs de guidage latéral et de régulation des distances inter-véhicules. On peut raisonnablement penser que les forces du marché iront dans le sens du progrès, et qu’il y aura entreprises désireuses de coupler leurs camions sur la route pour économiser le carburant avec des intervalles de passage plus courts. Ce serait alors le début des pelotons à deux camions. Tandis que les applications de communications inter-vehicules arrivent de plus en plus sur le marché, les camions pourraient se coupler en pelotons à interdistances courtes même s’ils ne sont pas de la même entreprise. Ces étapes pourraient être franchies sur les routes actuelles dans l’environnement réglementaire actuel.

Il existe d’autres points de vue selon lesquels l’environnement routier classique est trop complexe pour les aides au chauffeur ou pour les pelotons à deux camions, la complexité et le manque de prévisibilité principales venant des conducteurs de voitures. Selon ce point de vue, les voies dédiées pour poids lourds sont essentielles à l’utilisation de ces fonctions, car la circulation y est plus homogène et prévisible.

Les camions automatisés sont à présent construits pour un usage hors autoroute, à l’intérieur de complexes industriels par exemple. On pense que ces systèmes vont évoluer vers des véhicules utilisables sur route, capables d’avoir une perche de remorquage électronique. En conséquence des pelotons à deux véhicules commenceront à se former en circulation mixte. Ces petits pelotons ne devraient pas poser de problème pour les manœuvres des conducteurs au milieu des camions pour les entrées/sorties d’autoroute. L’étape suivante serait l’installation de “voies désignées,” qui attireraient les camions équipés de façon à les faire bénéficier de la conduite coopérative ; ces voies resteraient ouvertes à tout usager. Sur les voies désignées, il serait possible de faire circuler des pelotons à trois véhicules. Enfin, des voies séparées pourraient être aménagées une fois le nombre de camions équipés suffisant. Sur ces voies, des vitesses élevées pourraient être autorisées, créant une forte incitation financière pour les transporteurs à équiper leur véhicule et à augmenter ainsi leurs revenus.

L'exploitation des voies dédiées aux poids lourds peut bénéficier de la technologie avancée. Les approches étudiées par SANDAG comprennent la désignation de la voie de gauche sur autoroute multi-voies pour les camions, avec des barrières de béton sur la gauche et une section rayée de 1,21 m sur la droite pour séparer les camions de la circulation normale. Cependant les fonctions de régulateur de distance (ACC) et de guidage latéral (Lane Keeping - LK), (Chauffeur Assist) pourraient rendre le système plus sûr, et donc les barrières et les zones tampons avec la circulation normales pourraient ne pas être nécessaires. De plus dans l'idée de SANDAG, les barrières et les traitements spéciaux seraient discontinus en dehors des zones urbaines.

Lorsque les voies poids lourds sont construites au milieu des routes en place en zone urbaines, les contraintes d'espace peuvent être telles qu'il ne sera possible de construire que des voies étroites, et que le guidage latéral sera nécessaire.

Approches vers l'automatisation complète

Le déploiement de voies poids lourds dédiées accélérera probablement l'adoption de l'exploitation automatisée du transport routier. La nature homogène et l'environnement maîtrisé de l'exploitation des voies poids lourds se prêtent beaucoup mieux au concept de l'automatisation. La valeur ajoutée de temps de trajets mieux prévisibles, l'augmentation des volumes de chargement et la rapidité sont également des options attractives. Les voies poids lourds automatisées ont besoin d'accès limités et de sorties qu'il faudrait concevoir spécialement avec des zones de stationnement / transition..

L'un des modèles opérationnels probables serait la formation dynamique de pelotons sur autoroute. Cela se justifie par le trop grand nombre de variables (destinations, performance des véhicules etc.) à maîtriser sur le réseau autoroutier américain pour former des pelotons en dehors des autoroutes. Cependant, dans les zones de grandes distances où il y a peu de points de livraison intermédiaires (de San Diego à Phoenix, par exemple), on pourrait concevoir la formation de pelotons en dehors des autoroutes.

L'un des avantages clés des voies poids lourds conçues pour l'automatisation est de pouvoir se passer d'une voie de dépassement (ou de bas-côtés larges), ce qui permettrait de faire d'importantes économies de coûts de construction.

On pourrait envisager un scénario final, qui se déroulerait après le déploiement total des voies poids lourds pour remorques multiples aux USA, et l'emploi fondamental de pelotons de camions. A ce moment là, on pourrait concevoir l'entrée dans une nouvelle génération où tous les véhicules de la voie poids lourds seraient automatisés, si bien qu'aucun chauffeur n'aurait à porter les charges. Ce scénario est évidemment réalisable dans un délai de 30 ans ou plus. Il est analogue au développement actuel de l'industrie aéronautique pour convertir les avions de fret commercial en exploitations non accompagnées – probablement dans les cinq années à venir pour ce cas.

Exploitation de pelotons en circulation mixte

Il est important de traiter les problèmes d'exploitation de pelotons de camions en circulation mixte de façon systématique. Cette question doit aller au-delà des spéculations quant à savoir ce qui est sûr et ce que les conducteurs vont tolérer, et faire l'objet d'études d'évaluation structurées. Des simulations de circulation pourraient être réalisées avec des pelotons de deux camions émules pour évaluer les conflits avec la circulation convergente. De plus une étude pourrait être conçue où des camions équipés de CHAUFFEUR fonctionneraient en circulation mixte, avec des moteurs d'alerte dans les deux véhicules d'un peloton à deux camions. Il serait possible de définir des critères de sécurité et de flot de circulation et de faire des observations sur les impacts sur le monde réel.

Scénario de déploiement : route inter-états 710 en Californie : du port de Long Beach au centre ferroviaire de San Bernardino

Les camions sont prédominants sur cet itinéraire d'environ 12,5 km. Le transport de marchandises, surtout en conteneurs, s'effectue par opérations de camionnage entre les bateaux et les wagons de chemin de fer. C'est un bon terrain pour l'automatisation des poids lourds pour plusieurs modes opérationnels :

- ◆ Pelotons à deux camions sur toute voie
- ◆ Voie de gauche désignée pour attirer les camions équipés pour de petits pelotons
- ◆ Séparation physique de la voie de gauche pour les camions automatisés uniquement, par mode de service express (i.e. entrée/sortie uniquement au port et au centre ferroviaire)

Scénario de déploiement : Réseau de voies pour véhicules multi-occupants de San Diego

Les processus de l'aménagement de SANDAG décrits dans une section précédente inclut le développement de concepts d'exploitation allant vers l'automatisation complète.

Scénario de déploiement : couloir d'Alameda

Dans ce couloir qui dessert les ports de Californie du sud, l'une des approches est de donner aux camions une voie dédiée de collecte et d'exiger l'automatisation comme condition d'usage de cette voie. Les transporteurs y gagnent en réduction de temps de trajet. Au départ on ne pouvait exiger qu'un équipement de guidage latéral, et ajouter le control longitudinal quand les volumes de circulation augmentaient.

Scénario de déploiement : voies automatisées express sur la I-10 en Arizona

Une étude a été menée pour examiner la construction de voies pour véhicules automatisés au milieu de l'inter-états 10 en Arizona entre Phoenix et Tucson (distances de 62 km). L'étude proposait plusieurs modes d'exploitation pour ces "voies express intelligentes" qui fourniraient un minimum d'entrées / sorties entre les deux villes et offriraient la desserte exclusive de véhicules intelligents. La définition de "véhicule intelligent" changerait avec l'évolution de la technologie, de telle façon que les exigences d'équipement des véhicules seraient progressivement rehaussées, jusqu'à ce que ces

voies puissent faire circuler des véhicules entièrement automatiques. L'étude de concept explorait des scénarios pour la circulation à la fois des camions et des voitures.

Scénario de déploiement : Singapour

Au-delà du champ de cette étude, il convient de noter qu'à partir de débats avec des experts du transport de marchandises, le Port de Singapour offre un bon candidat pour un début de déploiement de l'automatisation des poids lourds. Un camionnage intensif est réalisé entre les deux grands ports de l'île, et la circulation est très dense sur les routes. On perd beaucoup de temps. De plus, Singapour a un chômage "négatif" (la main d'œuvre est importée de Malaisie), si bien que la mise en œuvre de systèmes d'automatisation des poids lourds où il faut moins de chauffeurs n'entraîne pas de problème avec les syndicats.

2.5 Autres activités concernant l'automatisation des poids lourds aux USA

2.5.1 Système de route automatisée dédiée au transport routier inter-urbain : concepts d'exploitation et de déploiement

Cette étude a été menée par les Drs. Jacob Tsao et Jan Botha de l'Université d'Etat de San Jose et un article a été publié sous ce titre dans les Proceedings du TRB 2002.

Les applications se concentrent avant tout sur le transport inter-urbain de marchandises, qui peut apporter de gros bénéfices aux transporteurs sur ces longs itinéraires. L'élément le plus critique est l'affectation de la voie au transport routier uniquement, qui est actuellement considérée comme une proposition très difficile en termes d'acceptation sociale de voies poids lourds dédiées. Cependant, l'acceptation sociale de véhicules combinés plus longs ne poserait pas de problème sur voies poids lourds séparées et créerait une forte incitation économique pour les transporteurs et les chargeurs qui plaideraient en faveur de voies exclusives.

Pour les applications urbaines, une étude précédente a identifié un "cercle vicieux" : il n'y a pas d'alternative pour les routiers s'il y a congestion, car ils se sont engagés par contrat à faire la livraison. Ils envoient donc davantage de camions au-lieu de chaîner le trajet. Cela augmente leur coût, le nombre de véhicules sur les routes et l'ensemble de la congestion.

Concept d'exploitation

Un extrait de leur proposition de concept d'exploitation pour une route intelligente inter-urbaine protégée sur couloir de marchandises est présenté ci-dessous :

"Cette route intelligente inter-urbaine pour poids lourds combine les forces d'un système ferroviaire de marchandises avec celles d'un système routier et formule un nouveau concept de système qui offre des services nouveaux et/ou améliorés. La route intelligente pour poids lourds fonctionne au milieu d'une autoroute inter-urbaine. L'accès à la voie intelligente pour poids lourds est contrôlée de façon

que la circulation automatisée des poids lourds soit séparée du reste de la circulation par des barrières physiques. Le système est prévu pour le transport de marchandises sur longue distance. L'exploitation de cette route intelligente pour poids lourds peut être pensée comme un système ferroviaire où les voitures de chemin de fer sont remplacées par des camions (auto-propulsés) et où les liens physiques sont remplacés par des liens électroniques. Les camions de convois faiblement espacés, sont à l'image d'un train de marchandises, qui n'a besoin que d'un conducteur dans le camion avant, réduisant ainsi le coût de main d'œuvre de façon importante, permettant de faire des économies de carburant grâce à une prise au vent réduite, et en augmentant la capacité. Chaque camion qui forme le train recueille et distribue également du fret en dehors de la route intelligente pour camions. Par exemple, un camion peut facilement converger ou se séparer d'un convoi à un emplacement d'accès ou de sortie ou à une gare. Dans le nouveau système, le camion de tête, avec ou sans marchandise à son bord, peut être exploité par une entreprise qui offre les services de roulage (auto-propulsé) (avec fret) sur la route intelligente, et les remorques des camions pourraient appartenir à l'entreprise mais être loués par des transitaires de fret ou des chargeurs."

Opérations normales :

Opérations normales sur la voie principale

- • Une seule voie dans chaque direction, sans voie de dégagement complète mais avec un bas-côté assez large pour que la voie unique et le bas-côté puissent accueillir un camion en panne sur le bas-côté et une voie de passage à vitesse modérée. Notons que le bas-côté sera également nécessaire pour d'autres usages. Par exemple, des morceaux de pneus éclatés peuvent se déplacer ou être déplacés sur le bas-côté. Dans ce cas, la circulation ne sera pas gênée par la présence de ces gros débris.
- • Contrôle latéral et longitudinal automatique (mains et pieds libres).
- • Convoi, avec un conducteur au moins dans le camion de tête et avec une limite supérieure à la longueur d'un convoi. Il faut un conducteur dans le camion de tête du convoi. Le conducteur est responsable de la détection de débris à l'avant sur la voie ou d'autres événements non nominaux qui ne peuvent pas être détectés de façon fiable et efficace et de façon automatique ; le conducteur peut également devoir conduire le camion avec ou sans automatisation. Un problème de cette exigence est que lorsque le véhicule de tête sort de la ligne principale ou avant qu'il n'en sorte, il faut avoir prévu au départ que le nouveau camion de tête ait un chauffeur à bord.
- • Convoi à intervalles courts : plus la distance est courte entre deux camions d'un convoi moins il y a de prise au vent sur les deux camions. Pour y parvenir il faut de nouvelles recherches.
- • Le regroupement d'un convoi (de deux en un) en mouvement : pas de regroupement simultané de trois convois ou plus en un, au moins pour le déploiement initial."

"Accès normal et opérations de sortie :

- Pour une mise en œuvre de point à point, les opérations aux points de départ et d'arrivée (ou "terminals") peut être complexe si l'AHS doit fournir un débit suffisant. De grandes zones de stationnement pour l'assemblage et le désassemblage des camions peuvent être nécessaires. La complexité des opérations d'assemblage/désassemblage pour des mises en œuvre plus générales dépend de la demande d'accès/sortie. La conception du terminal est un sujet de recherche intéressant.

- Entrée du convoi.
- “L’étiquetage” lors de l’entrée d’un convoi ou d’un camion à la fin d’un convoi principal (facultatif au moins pour les étapes initiales du déploiement). Cet élément peut réduire beaucoup les perturbations de la circulation principale.
- La division de convois en deux en cours de route : sans se diviser, l’ensemble du convoi devrait sortir de la ligne principale pour laisser les camions sortants quitter le convoi ; pas de séparation simultanée d’un convoi en trois convois ou plus, au moins pour les stades de déploiement initial.
- “La séparation et la sortie simultanées” (facultatives au moins pour les premiers stades de déploiement) : un camion membre du convoi se sépare du convoi lorsqu’il quitte la ligne principale, ce qui peut réduire de façon importante la perturbation de la circulation de la ligne principale aux emplacements de sortie.”

“Opérations liées aux événements non nominaux (problèmes et solutions)

- Le conducteur du convoi de tête guette les dangers éventuels comme des obstacles ou des gros débris, pour tout le convoi. (Il est difficile de remplacer la capacité cognitive et l’adaptabilité humaines par une machine.)
- Les normes pour l’entretien de la flotte peuvent être développées de façon à minimiser le taux de pannes des véhicules et donc la probabilité de blocage de la voie et pour éviter d’avoir à installer des équipements de vérification aux rampes AHS pour poids lourds.
- L’organisation des camions de différentes caractéristiques en différents convois pour minimiser la probabilité et la gravité de collision intra-convoi, comme la capacité de freinage, le poids total etc.
- Un camion défectueux doit être garé sur le bas-côté ; la circulation devra ralentir et rester sur le côté sûr de la voie (de façon automatisée).
- Les collisions intra-convois n’entraîneraient pas de problème de responsabilité si tous les camions d’un convoi étaient exploités par la même entreprise (soit par le même chargeur, par la même entreprise d’expédition ou par le même “AHS convoyeur”). La négociation entre opérateurs participant à un convoi demandera une responsabilité minimum du secteur public.”

Séquence de Déploiement

Tsao et Botha ont proposé huit étapes de déploiement vers l’AHS interurbaine de marchandises résumées dans la section précédente. La séquence était conçue pour comporter des étapes initiales qui pourraient être bénéfiques en elles-mêmes et mener à la mise en œuvre de l’étape finale.

En voici des extraits :

“Les étapes d’acceptation sur le marché, i.e., étapes 1 et 2, sont indépendantes de l’acceptation du public

Etapes, i.e., étapes 3 et 4, et, donc, ces deux groupes d’étapes peuvent progresser en parallèle.

Etape 1 : acceptation par le marché des technologies avancées pour poids lourds

Etape 1.1 : Développer et déployer des systèmes radar, infra-rouge ou autres capteurs et des systèmes d'alerte aux collisions frontales pour les camions, à utiliser sur voies d'autoroutes classiques et hors des autoroutes.

Etape 1.2 : Développer et déployer des systèmes d'alarmes de sortie de voie et d'identification de voie basées sur la vision pour poids lourds à utiliser sur voies d'autoroutes classiques et hors des autoroutes.

Etape 2 : acceptation sur le marché de technologies d'automatisation pour poids lourds mains libres et pieds libres

Etape 2.1 : à partir des systèmes développés et déployés dans l'étape 1.1, le développement et le déploiement de systèmes de guidage longitudinal et autres systèmes de maîtrise du véhicule permettant la conduite pieds libres. (Cela comprend la transmission automatique car la transmission manuelle demande de passer les vitesses avec le pied.)

Etape 2.2 : à partir des systèmes d'alerte de départ de voie et d'identification de voie basés sur la vision développés et déployés dans l'étape 1.2, on développera et on déploiera des systèmes de guidage latéral et autres systèmes de contrôle permettant la conduite mains libres.

- Empêcher l'utilisation simultanée des éléments à la fois mains libres et pieds libres, pour empêcher le désengagement du conducteur des tâches de conduite.

Etape 3 : acceptation par le public des voies dédiées aux poids lourds :

- Sélectionner un couloir de transport de marchandises important et congestionné où les bénéfices de l'automatisation seront évidents. Il sera important de s'assurer qu'il sera physiquement possible de dédier une voie.

- Construire une nouvelle voie poids lourds ou dédier une voie existante pour chaque direction à l'usage exclusif des camions ou à proximité du milieu de l'autoroute principale le long du couloir.

Etape 4 : acceptation par le public d'une voie poids lourds séparée physiquement au milieu d'une autoroute avec autorisation des remorques multiples par la nouvelle législation :

- Séparer physiquement, pour chaque direction, la voie du milieu ou celle qui est la plus proche du milieu du reste de l'autoroute et dédier cette voie comme voie exclusive pour poids lourds. Il faudrait prévoir un bas-côté pour accueillir les camions en panne.

- Construire "des aires d'arrêt" à des emplacements sélectionnés en dehors de l'autoroute sélectionnée mais à proximité, et construire des rampes d'accès et de sortie à partir de ces "aires d'arrêt".

- Permettre aux remorques multiples sur la voie poids lourds (et seulement sur la voie poids lourds et sur les zones d'arrêt et nulle part ailleurs). Ces poids lourds à remorques multiples ne sont pas autorisés actuellement dans l'état de Californie, mais les auteurs proposent de les autoriser sur des voies dédiées aux poids lourds et séparées physiquement.

- Permettre l'entrée et la sortie de la voie (par des remorques simples mais pas doubles ou triples) directement de la voie classique la plus à gauche, c'est à dire la plus proche de la voie poids lourds, aux emplacements où la quantité de circulation ne permet pas de zone d'arrêt, plus une série de rampes dédiées aux emplacements où ces entrées et sorties peuvent être installées en toute sécurité.
- Les péages peuvent être perçus de façon électronique, soit aux zones d'interface, sur les voies d'accès ou de sortie ou aux emplacements sélectionnés le long de l'autoroute.

Etape 5 : conduite automatisée en circulation mixte sur la voie poids lourds :

- Installer des marqueurs magnétiques ou d'autres marqueurs "actifs" sur la voie poids lourds pour donner aux camions équipés (i.e., ceux qui sont équipés des détecteurs de marqueurs correspondants) une fonction de guidage supplémentaire, pour être complémentaires au départ et pour permettre le convoi de camions à intervalles courts éventuellement). (Notons que les convois de camions à intervalles courts peuvent rendre le guidage latéral basé sur la vision inopérant, surtout la nuit.)
- La conduite automatisée (i.e., mains libres et pieds libres) dans la circulation en mode manuel, mais sous la supervision du chauffeur de camion.
- Tous les camions doivent être équipés d'une possibilité de communication de véhicule à véhicule de façon que les camions à la fois en mode manuel et en mode automatisé puissent savoir et anticiper l'intention des camions à l'avant ou à l'arrière et d'une communication de véhicule à infrastructure de façon à pouvoir, comme pour la communication de véhicule à véhicule, faire entrer la circulation entrant sur la voie poids lourds par une rampe dans la circulation principale en toute sécurité. (Notons que la présence d'une voie poids lourds unique est censée exister. Les poids lourds adjacents peuvent être soit à l'avant soit à l'arrière.)

Etape 6 : Voies poids lourds automatisées accessibles uniquement à partir de zones de stationnement :

- Dédier la voie poids lourds à la circulation automatisée uniquement ; ne pas permettre aux camions non équipés d'emprunter la voie poids lourds.
- Reduire la largeur de la voie ; utiliser la largeur qui n'est plus nécessaire, ainsi que l'éventuel bas-côté ou la voie prioritaire inutilisée auparavant au milieu de la route pour construire un bas-côté assez large pour que la voie unique plus le bas-côté puissent accueillir un camion défectueux et une voie de circulation à une vitesse qui puisse être supérieure à celle du mode automatisé.
- Fermer les rampes d'accès et de sortie entre la voie poids lourds et la voie classique la plus à gauche.
- En plus de la conduite automatisée (i.e., conduite pieds et mains libres), la communication de camion à camion garantit la sécurité et améliore la qualité de la circulation sur la voie principale, la communication de camion à infrastructure, et la communication de véhicule à véhicule, permettent une entrée efficace des véhicules dans la circulation (en plus de la sûreté de l'insertion effectuée lors de l'étape précédente).
- Le conducteur est responsable de la détection et de la réaction face aux débris sur la voie ou face à d'autres événements non nominaux qui ne peuvent pas être détectés de façon fiable ou efficace et la réponse est donnée de façon automatique.

- La vérification du “bon état”, si nécessaire, peut être effectuée dans la zone de stationnement avant qu’un camion ne se dirige vers la rampe dédiée allant de la zone de stationnement directement sur la voie poids lourds ou au moins avant qu’un camion n’atteigne la rampe. (l’installation de vérification du bon état peut se situer à des emplacements éloignés de la rampe réelle ; cela peut empêcher le blocage de la rampe et éviter d’avoir besoin d’une voie de “demi-tour” depuis la rampe jusqu’à la zone de stationnement, pour les camions ayant échoué au contrôle de bon état qui retournent vers la zone de stationnement.)

Etape 7 : convoi automatisé sans conducteur dans les remorques d’un convoi :

Le convoi automatisé de soutien sans conducteur sur aucune des remorques (i.e., camion plus remorques) du convoi.

Etape 8 : convoi automatisé à intervalles courts :

Soutien pour le convoi de camions à espaces courts pour les camions équipés de façon adéquate, pour réaliser des économies de carburant.

D’autres caractéristiques peuvent également être soutenues, et les étapes correspondantes ajoutées. Par exemple, des camions peuvent être organisés en convois d’après la capacité de freinage (en tenant compte de leur charge) de façon à maximiser la sécurité. De plus, si des convois de camions sont autorisés à circuler sur l’AHS poids lourds à différentes vitesses de croisière, des voies de dépassement peuvent être nécessaires et peuvent être fournies. Si cette voie de dépassement est fournie sur l’AHS poids lourds, les camions peuvent alors être organisés en convois suivant leurs vitesses de croisière type ou optimale.”

2.5.2 PATH Californie

PATH a effectué un vaste travail de développement technologique à la fois en contrôle longitudinal et latéral pour poids lourds et bus. Ce travail est actuellement freiné, en raison des limitations budgétaires de la Californie et des difficultés pour trouver des parties prenantes pour le déploiement de la technologie.

2.5.3 Etudes de systèmes coopératifs d’automatisation véhicule-route

(Les informations suivantes ont été fournies par Caltrans.)

Historique

La Californie et dix autres états et Honda R&D ont joint leurs forces dans un projet d’études à financement multi-états pour explorer le potentiel des systèmes d’automatisation coopératifs véhicule-route (Cooperative Vehicle-Highway Automation Systems - CVHAS) pour améliorer les performances du système de transport.

Le groupe de onze états qui financent le projet s'accordent pour que leur première année d'activité et que leurs ressources se focalisent sur un nombre limité d'études de cas de déploiement à effectuer par PATH pour les applications bus et camions dans certains de leurs états.

Définitions de termes :

Alerte – signa audible, visible ou haptique pour alerter le conducteur d'une condition d'usage potentiellement dangereuse.

Aide au contrôle – Contrôle automatique d'une partie de la fonction de conduite pour aider le conducteur en allégeant la tâche (e.g., contrôle de croisière adaptatif) ou améliorer la sécurité (e.g., freinage pour l'évitement de collision).

Automatisation complète – contrôle complètement automatisé de la conduite, déchargeant le conducteur de la responsabilité de fonctions de conduite

Véhicules autonomes – véhicules qui dérivent toutes leurs informations sur l'environnement de leurs capteurs embarqués, sans communication en direction de l'infrastructure ou d'autres véhicules. Par analogie avec les conducteurs humains, les véhicules autonomes peuvent « voir », mais ils ne peuvent pas « parler » ou « écouter » les autres.

Systèmes d'alerte coopératifs – Les systèmes d'alerte qui peuvent recevoir des informations sur l'environnement de conduite du véhicule par communication à partir d'autres véhicules ou de l'infrastructure, et à partir de leurs propres capteurs embarqués.

Systèmes d'automatisation coopératifs véhicule-route (Cooperative Vehicle-Highway Automation Systems - CVHAS) – Systèmes qui apportent une aide à la maîtrise de la conduite ou à la conduite entièrement automatisée, basée sur les informations sur l'environnement de conduite du véhicule qui peuvent être reçues par communication des autres véhicules ou de l'infrastructure, ainsi que de leurs propres capteurs embarqués.

Systèmes de route automatisée (AHS) – Systèmes qui fournissent une conduite entièrement automatisée (possible uniquement sur voies séparées, protégées), basés sur des informations sur l'environnement de conduite du véhicule qui peuvent être reçues par communication venant d'autres véhicule ou de l'infrastructure, ainsi que de leurs propres capteurs embarqués.

Notons que chacun de ces systèmes pourraient avoir des mises en œuvre pour des classes spéciales de véhicules (bus ou camions, par exemple) avant une mise en œuvre plus large pour la population générale des véhicules commerciaux légers.

2.5.3.1 Objectifs du projet

Ce projet est conçu pour répondre aux besoins des états qui financent le CVHAS les études de cas de déploiement. Il est motivé par les considérations suivantes :

Il apparaît le plus souvent que les premiers déploiements des technologies du CVHAS se feront sur des véhicules lourds exploités sur leurs propres voies prioritaires pour différentes raisons :

- Priorités pour des objectifs publics plus faciles à développer et à acquérir (transport en commun, camions hors des routes à circulation mixte)
- Les technologies de maturation peuvent être utilisées de façon plus sûre par des chauffeurs professionnels dans des camions entretenus de façon professionnelle que par le public général sur des véhicules qui peuvent ne pas être entretenus du tout
- Les coûts des technologies représentent un pourcentage plus faible des coûts totaux du véhicule et les véhicules sont utilisés de façon beaucoup plus intensive de sorte que ces coûts sont amortis beaucoup plus vite
- Les bénéfices en réduction de temps de trajet, la fiabilité du trajet et sa sécurité peuvent être traduits plus directement en économie de coûts que pour les voitures individuelles
- La production sur mesure par petites quantités de véhicules permet d'introduire les technologies CVHAS dans le processus de production plus vite que pour la production automobile de masse
- L'emballage de nouveaux éléments technologiques est plus facile sur de grands véhicules
- Les véhicules lourds ont déjà plus d'infrastructure électronique embarquée à utiliser comme base de capacités plus avancées que les voitures individuelles

Des études de cas d'applications de CVHAS sur sites spécifiques sont nécessaires pour éclairer les problèmes importants comme la définition de concepts d'exploitation de systèmes, de conceptions de systèmes, de possibilités et contraintes institutionnelles et de coûts et bénéfices de systèmes pour les différentes parties prenantes, et pour la société dans son ensemble. De plus, des études de cas centrées sur la solution de problèmes de transport réels peuvent fournir une base pour cibler les décisions techniques et affiner les substitutions de conception des systèmes. Des études de cas pour divers emplacements du pays (en particulier hors de Californie) peuvent donner des preuves directes du caractère large et applicable au niveau national du CVHAS, pour aider à stimuler un intérêt plus large pour le CVHAS, y compris au Département des Transports des USA.

Les états groupés pour financer le projet CVHAS sont d'accord pour trois études de cas spécifiques pour étudier les possibilités d'applications CVHAS aux camions et aux bus. Les travaux de Chicago seront menés par une équipe de PATH et l'University d'Illinois-Chicago ; les travaux de Tacoma seront réalisés par PATH.

- Système de bus rapides de Chicago
- Système intermodal d'échange de marchandises de Chicago
- Chariot cavalier du port de Tacoma

Parmi ces travaux, l'utilisation de véhicules de marchandises automatisés pour les systèmes d'échange intermodal de marchandises est le plus pertinent pour ce rapport. Pour l'automatisation des poids lourds, les attributs des concepts à étudier sont les suivants :

- Le concept de logistique à mettre en oeuvre (manutention individuelle de chaque conteneur ou remorque ou regroupement par destination commune)
- Le degré de séparation des véhicules automatiques de la circulation transversale sur les itinéraires
- Le degré d'automatisation du véhicule à mettre en place et le rôle du (des) conducteur(s), s'il y en a

Preliminary system Les conceptions du système préliminaire basées sur ces attributs ont été développées et définies en termes suffisamment tangibles pour pouvoir être expliqués clairement aux parties prenantes.

Les attributs de la conception du système à étudier à ce stade sont les suivants :

- terminaux intermodaux spécifiques à desservir
- emplacements/sections transversales de routes et de structures (s'il y en a) à construire
- caractéristiques du véhicule (camions standard ou conceptions spéciales)
- mélange de couplages mécaniques et électroniques de chargements allant vers des destinations communes
- ampleur du travail manuel et de la supervision humaine nécessaires aux opérations de chargement et de déchargement à chaque extrémité.

Les alternatives concurrentielles comprennent :

- "rien à faire" (passage conventionnel de chargements de terminal à terminal)
- camions classiques (non automatisés) sur voies spéciales réservées
- liaisons ferroviaires directes entre les terminaux

La modélisation a été appliquée pour représenter des problèmes tels que :

- Les temps de trajet du véhicule et les temps de chargement/déchargement des conteneurs
- La distribution des temps de trajet des conteneurs pour relier les terminaux
- La capacité de conteneurs par voie automatisée
- Les interactions entre les opérations automatisées de transport de marchandises et la circulation transversale
- Les coûts de capitaux et d'exploitation
- Les émissions de polluants et la consommation de carburant

A partir des tâches ci-dessus, une analyse a été menée pour chaque concept de système affiné et ses alternatives en concurrence. Les impacts sur la performance du système de transport ont été estimés par rapport aux autres alternatives qui peuvent être étudiées (y compris ne rien faire) et les bénéfices et coûts supplémentaires et autres mesures pertinentes d'efficacité ont également été estimés.

Les résultats de ces analyses (à paraître au TRB 2004 Conférence annuelle en janvier) devraient comprendre les points suivants :

- La quantification de coûts des capitaux pour l'infrastructure et les éléments des véhicules
- La quantification des coûts d'exploitation pour l'infrastructure et les éléments des véhicules
- La quantification des économies en temps de trajet pour les marchandises
- La quantification des impacts sur le mouvement d'autres circulations (économies grâce à la suppression de mouvements de véhicules du reste du réseau et pertes éventuelles venant de la priorité donnée aux camions de marchandises automatisés)
- La quantification des coûts et bénéfices en main d'oeuvre, y compris les déplacements du travail, les changements de qualité de service de transport, et les impacts environnementaux (bruit, consommation d'énergie, émissions).

2.5.4 U.S. Travail de convoi par camions de l'armée américaine

L'armée américaine développe une technologie qui pourrait être appliquée à l'automatisation des camions et plusieurs autres applications de mobilité autonome. L'armée envisage de développer l'automatisation des camions pour améliorer le soutien logistique – au point de pouvoir livrer de la marchandise dans des zones de combat ou de quasi-combat par l'automatisation de camions, en risquant la vie de moins de soldats. Il n'y a pas plus de détail disponible concernant ce programme de développement.

Le bureau des projets de recherche avancés de la défense (Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA) fait actuellement de gros investissements dans la technologie de véhicules autonomes pour opérations sur route. Ils approfondissent fortement l'état de l'art dans les domaines des capteurs de véhicules, de la perception intelligente, et des systèmes de capteurs intégrés. Actuellement l'armée investit environ 100 M \$ par an dans ce domaine pour des véhicules tactiques téléguidés. En particulier, le DARPA travaille activement au développement de techniques de perception intelligente pour la conduite sur autoroute, dans le cadre d'un programme DARPA de 1,8 M \$ appelé Système de conduite compétente (Competent Road Driving System). Dans le cadre de ce travail, ils développent un véhicule capable de conduite autonome sur autoroute et même en ville.

Tandis que l'armée progresse dans la mise en œuvre de systèmes de convois de camions, on pense que les résultats des travaux DARPA joueront un rôle important.

2.6 Débat et étapes suivantes

Débat

Quite a variety of issues arise with regard to truck automation, both in terms of business issues and deployment. Il apparaît que le concept de routes à péage pour camions est assez bien soutenu par certains gouvernements locaux et d'états et au niveau politique – le modèle commercial proposé semble viable et traite les préoccupations à la fois de l'industrie et du public concernant le financement de nouvelles constructions de voies dédiées aux poids lourds.

Tandis que l'une des approches pour mettre en œuvre l'automatisation des poids lourds est de construire de nouvelles routes sur de nouveaux alignements, aucune des initiatives actives aux USA ne choisit cette option. Au lieu de cela il semble n'y avoir de consensus que pour la construction de voies dédiées aux poids lourds au milieu des autoroutes inter-états actuelles, au moins dans les zones rurales inter-urbaines. Les routes de contournement pour camions sur les nouveaux alignements sont à l'étude pour les zones urbaines. De plus, le potentiel d'utilisation des voies pour véhicules multi-occupants par les camions en dehors des heures de pointe, ou même la conversion de ces voies en voies poids lourds à plein temps fournit une autre option pour le cas des zones urbaines.

Concernant la formation de pelotons de façon dynamique plutôt que hors réseau, la réponse dépend des spécificités de la route et de l'environnement réglementaire. Le scénario le plus probable pour la formation de pelotons hors réseau serait celui des liaisons longues inter-urbaines, où des combinaisons longues de véhicules qui ne sont pas autorisées aux points de départ et d'arrivée sur les autoroutes classiques pourraient circuler. Dans d'autres cas, surtout avec les ensembles tracteurs remorques autorisés partout, la formation dynamique de pelotons serait préférable.

L'étude du Reason Institute et l'étude du couloir de transport de marchandises I-10 mentionnent l'une et l'autre le camionnage automatisé comme une option d'avenir. Une analyse importante doit être menée pour comparer les bénéfices des camions exploités de façon manuelle sur routes poids lourds dédiées aux bénéfices supplémentaires qui peuvent provenir de l'automatisation de ces véhicules.

De plus, bien que les débats sur "la circulation mixte" aient tendance à se référer au mélange voitures-camions, des questions se posent concernant le mélange de camions en mode manuel et en mode automatique sur les voies poids lourds, au fur et à mesure de l'introduction de l'automatisation.

Pour conclure, la réalisation de l'automatisation des poids lourds et des véhicules en général, demandera aux approches des systèmes d'éviter les "arrêts prolongés" de la technologie et/ou des investissements pour atteindre les premières exploitations. L'approche par étapes est absolument essentielle pour que les parties prenantes puissent bénéficier à chaque étape du développement, et constater pour eux-mêmes le potentiel des systèmes de véhicules automatisés. Notre société change vite de manière imprévisible, tout comme le développement de la technologie. C'est pourquoi notre capacité à définir cette approche par étapes ne peut être valide que pour les premières étapes ; la voie vers le transport de marchandises basé sur l'exploitation de véhicules automatisés ne peut être actuellement définie de façon solide. Il faut évaluer les options à chaque étape du développement en termes de problèmes commerciaux, d'exploitations, de sécurité et de problèmes sociétaux, en progressant pas à pas vers une innovation sociétale presque inévitable et bénéfique pour tous.

Prochaines étapes

Bishop Consulting et associés continuera à étudier les problèmes d'automatisation des poids lourds aux USA, ainsi que les développements du projet d'ensemble centré sur une mise en œuvre en France. Certaines des activités envisagées sont les suivantes :

- Etudier de façon plus approfondie les points de vues de l'industrie des poids lourds sur l'automatisation des camions, par le biais d'entretiens avec les représentants de l'industrie des poids lourds
- Evaluer les résultats des travaux CVHAS publiés au TRB 2004

ANNEXES : EXEMPLES DE SYSTEMES PROCHES

1 ETAT DE L'ART SUR LES PROJETS EUROPEENS SUR LES POIDS LOURDS : PROJETS CHAUFFEUR2 ET SAFETUNNEL

1.1 Introduction

Diverses études scientifiques ont été menées au cours de ses dernières années afin de diminuer le nombre des accidents de la route. Les projets de recherche CHAUFFEUR2 et SAFE TUNNEL se sont précisément intéressés à sécuriser la conduite automobile selon une approche globale du système « véhicule-véhicule ».

1.2 Les objectifs du projet CHAUFFEUR2

Le projet de recherche CHAUFFEUR2 a pour but :

- ❑ L'élaboration de plusieurs systèmes d'aide à la conduite : il s'agit de renforcer l'autonomie des véhicules par rapport au conducteur. Pour ce faire, CHAUFFEUR2 s'est attaché plus précisément à développer différentes techniques permettant de maintenir les véhicules sur une voie donnée et de conserver ou ajuster automatiquement les distances inter véhiculaires.

Les systèmes d'aide à la conduite étudiés dans CHAUFFEUR2 sont deux types:

- le Lane Keeping System (LK)
- le Safe Distance Keeping System (SDK)

Ces systèmes d'assistance au conducteur ont pour but d'une part de maintenir automatiquement le véhicule dans une voie courante (LK), d'autre part de respecter une distance de sécurité entre deux véhicules consécutifs (SDK). S'il n'existe pas de véhicule en amont, le véhicule sera commandé et asservi au niveau de la trajectoire (longitudinale et latérale).

- ❑ La mise en peloton : il s'agit de réaliser un peloton de camions et de le soumettre à différentes manœuvres typiques afin d'en analyser le comportement,

Un peloton de véhicule peut être défini comme l'association de plus de deux véhicules avec un conducteur actif dans le véhicule de tête. Ce dernier impose la trajectoire au véhicule suiveur via une attache virtuelle et en utilisant la technologie du « X by Wire ». Par ailleurs, les distances entre les véhicules sont supposées suffisamment faibles pour qu'aucun « intrus » ne puisse s'interposer entre deux véhicules constituant le peloton.

Afin de respecter les distances de sécurité, il est nécessaire que chaque véhicule appartenant à un peloton possède en temps réel des informations sur les véhicules environnants. En particulier, il est important de connaître, quasi instantanément, l'instant de freinage du véhicule de tête, ses angles de braquages, sa vitesse, son accélération et décélération, etc. Or, à elles seules, les capteurs ne fournissent pas des résultats satisfaisants. C'est pourquoi, CHAUFFEUR2 a mis en œuvre un système de communication robuste entre les différents véhicules.

1.3 Projet de recherche SAFE TUNNEL

1.3.1 Les objectifs du projet SAFE TUNNEL

Ce projet de recherche a pour but de sécuriser la traversée des poids lourds dans les tunnels. Suite à une étude d'accidentologie, il apparaît que les accidents dans les tunnels sont dus principalement à des défaillances mécaniques des véhicules et notamment des poids lourds pouvant conduire à une situation de feu : pression des pneumatiques, température du moteur et des freins, du carburant, etc. Aussi, afin de réduire le nombre des accidents, SAFE TUNNEL s'est précisément intéressé aux différents types d'accidents les plus fréquemment observés dans les tunnels et s'est attaché à développer les deux concepts suivants :

- communication bidirectionnelle entre le véhicule et l'infrastructure et analyse des informations par celle-ci
- systèmes d'autocontrôle du poids lourd (pression des pneumatiques, températures, autonomie en carburant...) et surveillance du véhicule via l'infrastructure

Dans les pages qui suivent, nous n'aborderons pas l'étude d'accidentologie menée par SAFE TUNNEL. Nous nous limiterons aux deux derniers points cités précédemment. Notons enfin que les produits présentés ici sont actuellement disponibles sur le marché.

1.3.2 Communication véhicule&infrastructure

SAFE TUNNEL a mis en œuvre un concept de communication bidirectionnel du diagnostic de l'état du véhicule à l'infrastructure et un système d'analyse des informations par celle-ci. Plus précisément, SAFE TUNNEL a développé un système capable d'identifier via l'infrastructure, les différents paramètres du véhicule présentant une quelconque anomalie. Une fois les données obtenues, le conducteur et le centre de commande sont informés du diagnostic.

Les véhicules potentiellement dangereux étant parfaitement identifiés, les opérateurs de tunnels peuvent alors en refuser l'accès. Par ailleurs, dès lors qu'un véhicule pénètre à l'intérieur d'un tunnel, l'infrastructure continue à enregistrer toutes ses caractéristiques. En cas de détection d'une défaillance du véhicule à l'intérieur du tunnel, le conducteur en est immédiatement informé via une alerte . Celui-ci peut alors immobiliser son véhicule sur une aire de secours ou une aire de stationnement et attendre les informations du centre de commande qui connaît en temps réel la position du véhicule en difficulté.

1.3.3 Systèmes de contrôle

1.3.3.1 Les systèmes pneumatiques

Le produit, développé par Michelin et WABCO, est un système récent qui permet de mesurer en temps réel la pression des pneus pour différents types de véhicules utilitaires (tracteurs, poids-lourd, autocars, semi-remorque, ...).

Chaque pneu est équipé d'un module de roue qui, à l'aide d'un capteur, mesure à chaque instant la pression de celui-ci. Les données ainsi obtenues sont transmises toutes les minutes à l'ECU par des ondes radio hautes fréquences.

1.3.3.2 Les systèmes de freinage

Au cours de ces dernières années les systèmes de freinage n'ont cessé d'évoluer. Au sein de SAFETUNNEL, c'est l'EBS (Electronic Braking System) qui a été intégré dans le démonstrateur. L'EBS est un système de freinage qui réduit de manière significative les distances d'arrêt.

1.3.3.3 Les systèmes de suspension

ECAS (Electronically Controlled Air Suspension)

ECAS a pour objectif de commander électroniquement les suspensions du véhicule afin de maintenir la bonne assiette du véhicule.

1.3.3.4 Les systèmes de radar et d'ACC (Adaptive Cruise Control)

Ces systèmes ont pour objectif d'identifier précisément l'environnement d'un véhicule donné. Après plusieurs années de recherche, ceux-ci ont évolué vers l'Adaptive Cruise Control (ACC), système initialement utilisé au Japon puis plus largement en Europe pour le marché automobile. L'originalité de l'ACC réside dans sa capacité à réguler automatiquement la vitesse du véhicule en agissant sur le moteur mais aussi sur le freinage. Grâce à ce système, le véhicule est alors capable d'adapter sa vitesse au véhicule précédent.

2 NOTE EXPLICATIVE DU SYSTEME EUROPEEN DE GESTION ET DE COMMANDE DU TRAFIC FERROVIAIRE : ERTMS, EUROPEAN RAIL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM

2.1 RESUME

L'objectif de ce chapitre vise à présenter les acquis dans le domaine ferroviaire et leurs éventuelles utilisations pour la gestion et la commande du trafic de la future autoroute automatique pour les poids lourds. Celles-ci pourraient s'inspirer de l'exploitation et de la gestion de la sécurité ferroviaires à l'échelle européenne. En effet la description du projet ERTMS, European Rail Traffic Management System, montre ici qu'il y a beaucoup de points communs, en terme de sécurité anticollision, entre l'exploitation ferroviaire et l'exploitation des camions ou convois de camions de la future autoroute automatique.

Dès la réalisation des premiers chemins de fer, il est apparu indispensable de réaliser un système de signalisation permettant la communication entre l'infrastructure et le matériel roulant. Ce système permettant de transmettre au conducteur à bord des trains, des autorisations de marche ou d'arrêt. Le système au sol a connaissance, en permanence, de la continuité et de la libération des voies, conditions essentielles pour assurer la sécurité des circulations. Cela conduit à réaliser certaines fonctions fondamentales à savoir :

- *La localisation des trains ;*
- *La protection des trains se suivant sur une même voie ;*
- *La répétition à bord des trains des indications des signaux ;*
- *La concentration de la commande des aiguilles d'une même zone d'appareils de voie et la réalisation des enclenchements, qui sont à la base des postes d'aiguillage.*

Le réseau ferroviaire européen dispose, actuellement, de systèmes de signalisation et de commande de trains différents selon chaque pays. En effet, les différents pays européens possèdent leurs propres techniques en ce qui concerne la gestion du trafic ferroviaire : les différents systèmes d'électrification et les différents écartements des rails, auxquels s'ajoutent les différents systèmes de contrôle de la vitesse, constituent un frein au passage des trains d'un pays à l'autre. Ces contraintes techniques sous-entendent donc la recherche d'une harmonisation du réseau ferroviaire européen. A cet effet, l'Union Européenne a la volonté de mettre en place un système européen de gestion et de commande du trafic ferroviaire : c'est le projet ERTMS (European Rail Traffic Management System). Il a pour but d'assurer, en toute sécurité, la circulation des trains sur les différents réseaux européens. Le projet ERTMS fait appel au principe de l'interopérabilité. L'interopérabilité consiste à permettre aux trains de circuler sur un réseau international sans s'arrêter et sans changer ni d'engin, ni de conducteur aux frontières. De plus, il exige que le conducteur ne réalise que des actions de conduite qui auront été, préalablement, établies et normalisées par le système ERTMS.

L'objectif ici est de présenter le projet ERTMS, sans entrer dans des aspects techniques trop complexes, afin de permettre une compréhension du sujet plus aisée. On s'attachera à présenter les

concepts de base relatifs aux différents niveaux d'ERTMS, aux différents modes d'utilisations et les procédures d'utilisation.

The objective of this chapter aims at presenting the assets in the railway field and their possible uses for management and the order of the traffic of the future automatic motorway for the heavy lorries. Those could take as a starting point the exploitation and the security management railway on a European scale. Indeed the description of the project ERTMS, European Rail Traffic System Management, shows here that there are many common points, in term of anti-collision safety, between the railway exploitation and the exploitation of the trucks or convoys of trucks of the future automatic motorway.

As of the realization of the first railroads, it appeared essential to carry out a system of indication allowing the communication between the infrastructure and the travelling material. This system allowing to transmit to the driver on board trains, authorizations of walk or stop. The system on the ground is informed, permanently, of the continuity and the release of the ways, essential conditions to ensure the safety of circulations. That resulted in fulfilling several fundamental functions as:

- localization of the trains;
- the protection of the trains following itself on the same way;
- the repetition aboard trains of the indications of the signals;
- concentration of the ordering of the needles of the same zone of trackside equipment and the realization of the interlockings, which are at the base of the signal boxes.

The European rail network lays out, currently, of systems of indication and ordering of different trains according to each country. Indeed, the various European countries have their own techniques with regard to the management of the rail traffic: the various systems of electrification and the various spacings of the rails, to which the various systems of control speed are added, constitute a brake with the passage of the trains from one country to another. These technical constraints thus imply the search for a harmonization of the European rail network. The European Union has the will to set up a European system of management and ordering of the rail traffic: it is project ERTMS (European Rail Traffic Management System). The purpose of it is to ensure, in full safety, the circulation of the trains on the various European networks. Project ERTMS calls upon the principle of interworking. Interworking consists in allowing the trains circulating on an international network without stopping and changing neither machine, nor of driver at the borders. Moreover, it requires that the driver carry out only actions of control which will have been, beforehand, established and standardized by system ERTMS.

The aim here is to present project ERTMS, without entering too complex technical aspects, in order to allow an easier comprehension of the subject. It will presented the basic concepts relative to the various levels of ERTMS, the various using modes and the using procedures.

2.2 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre vise à présenter les acquis dans le domaine ferroviaire et leurs éventuelles utilisations pour la gestion et la commande du trafic de la future autoroute automatique pour les poids lourds. Celles-ci pourraient s'inspirer de l'exploitation et de la gestion de la sécurité ferroviaires à l'échelle européenne. En effet la description du projet ERTMS, European Rail Traffic Management System, montre ici qu'il y a beaucoup de points communs, en terme de sécurité anticollision, entre l'exploitation ferroviaire et l'exploitation des camions ou convois de camions de la future autoroute automatique.

Le réseau ferroviaire européen dispose, actuellement, de systèmes de signalisation et de commande de trains différents selon chaque pays. En effet, les différents pays européens possèdent leurs propres techniques en ce qui concerne la gestion du trafic ferroviaire : les différents systèmes d'électrification et les différents écartements des rails, auxquels s'ajoutent les différents systèmes de contrôle de la vitesse, constituent un frein au passage des trains d'un pays à l'autre. Ces contraintes techniques sous-entendent donc la recherche d'une harmonisation du réseau ferroviaire européen. A cet effet, l'Union Européenne a la volonté de mettre en place un système européen de gestion et de commande du trafic ferroviaire : c'est le projet ERTMS (European Rail Traffic Management System). Il a pour but d'assurer, en toute sécurité, la circulation des trains sur les différents réseaux européens. Le projet ERTMS fait appel au principe de l'interopérabilité. L'interopérabilité consiste à permettre aux trains de circuler sur un réseau international sans s'arrêter et sans changer ni d'engin, ni de conducteur aux frontières. De plus, il exige que le conducteur ne réalise que des actions de conduite qui auront été, préalablement, établies et normalisées par le système ERTMS.

L'objectif ici est de présenter le projet ERTMS, sans entrer dans des aspects techniques trop complexes, afin de permettre une compréhension du sujet plus aisée. On s'attachera à présenter les concepts de base relatifs aux différents niveaux d'ERTMS, aux différents modes d'utilisations et les procédures d'utilisation. Le début du chapitre est consacré à la présentation des fonctionnalités de la signalisation ferroviaire suivie d'une présentation générale du projet et de son contexte. On remarquera, à travers cette première partie, la complexité, de par ses objectifs, du projet ERTMS et de sa mise en place. Par la suite, on s'intéressera à une partie plus "technique" où sera exposé, de façon synthétique, les deux sous-systèmes – voie et train – qui composent le système ERTMS. Il sera alors question, entre autre, de transmissions et d'échanges d'informations entre la voie et le train, ce qui amènera à introduire dans cette synthèse, la notion de niveaux, notions capitales dans le projet ERTMS. Ensuite, on définira, les modes relatifs au projet ERTMS, à savoir les possibilités d'échanges d'informations entre le conducteur et l'équipement ERTMS qui se situe à bord du train. Cette partie consacrée à la notion de modes fera intervenir différents points tels que les transitions entre les niveaux. Le système ERTMS possède également, dans son cahier des charges, un ensemble de procédures à respecter pour un bon fonctionnement général. Chaque procédure définit un ensemble de conditions obligatoires. On terminera donc ce chapitre en décrivant ces différentes procédures.

Les fonctionnalités de la signalisation ferroviaire

Dès la réalisation des premiers chemins de fer, il est apparu indispensable de réaliser un système de signalisation permettant la communication entre l'infrastructure et le matériel roulant. Ce système permettant de transmettre au conducteur à bord des trains, des autorisations de marche ou d'arrêt. Le système au sol a connaissance, en permanence, de la continuité et de la libération des voies, conditions essentielles pour assurer la sécurité des circulations. Cela conduit à réaliser certaines fonctions fondamentales à savoir :

La localisation des trains ;

La protection des trains se suivant sur une même voie ;

La répétition à bord des trains des indications des signaux ;

La concentration de la commande des aiguilles d'une même zone d'appareils de voie et la réalisation des enclenchements, qui sont à la base des postes d'aiguillage.

2.3 LE SYSTEME ERTMS/ETCS [FLA-00]

L'ERTMS/ETCS existe officiellement depuis 1995 [POR-00]. Chaque pays possède pratiquement toujours une signalisation ferroviaire et ses règles qui lui sont propres. La France a, depuis avant la seconde guerre mondiale, équipé presque toutes ses lignes du système ponctuel à crocodile ; celui-ci a été complété du contrôle de vitesse à Balises, le KVB, et puis il y a aussi la TVM : la Transmission Voie-Machine, qui équipe l'ensemble des lignes à grande vitesse de la SNCF. Ce qui fait trois familles de systèmes et de produits de contrôle de vitesse que pour la France. L'harmonisation de la signalisation ferroviaire des pays européens utilise les techniques les plus modernes. Ceux-ci concernent les domaines suivants :

- ❑ Les transmissions : utilisation de la radio numérique GSM.
- ❑ L'exploitation des lignes à haut débit.
- ❑ L'intelligence embarquée : signalisation et fonction de sécurité.
- ❑ L'autolocalisation des véhicules.

Le système prend place dans un environnement spécifique composé :

- ❑ du train
- ❑ du conducteur
- ❑ des autres interfaces situées à bord du train
- ❑ des systèmes externes aux rails tels que les centres de contrôle...

Du fait de la nature des fonctions requises, le système ERTMS/ETCS sera mis en place partiellement :

sur la voie

à bord du train.

ERTMS/ETCS est composé de deux constituants appelés : sous-système "fixe" et sous-système "embarqué".

Nous allons, par la suite, décrire de manière synthétique les éléments de base qui constituent ces deux sous-systèmes.

2.3.1 Le sous-système "fixe".

La composition du sous-système "fixe" est différente selon le niveau appliqué. Le sous-système peut être composé : [SRS-00]

- **de balises (appelées Eurobalise) :**
 - la balise est un dispositif de transmission qui envoie des messages au sous-système "embarqué",
 - les balises étant réunies en groupe et chaque balise transmettant un télégramme, le regroupement de tous les télégrammes définit le message qui sera envoyé par le groupe de balise au sous-système "embarqué".
- **d'un dispositif électronique au sol (DES) :**
 - ce sont des dispositifs électroniques qui génèrent les messages qui seront envoyés par les balises ou par des radars, à partir des informations reçues des systèmes externes aux rails.
- **d'un réseau de communication par radio (GSM-R) :**
 - il est utilisé pour les échanges bidirectionnels de messages entre le sous-système "embarqué", le centre de regroupement radio et le dispositif de réouverture par Euroloop par câble.
- **d'un centre de radio (RBC : Radio Block Centre) :**
 - il reçoit les informations provenant de la voie et celles échangées avec le sous-système "embarqué" et se charge d'envoyer les messages aux trains, le plus souvent les messages d'autorisations de mouvement qui permettent aux trains de se déplacer, en toute sécurité et sous la responsabilité du RBC,
- **d'un circuit Euroloop :**

- le système Euroloop opère uniquement sur le niveau 1 (notion qui sera présentée dans la suite de ce rapport), il fournit les informations du signal en aval, ce qui permettra éventuellement au train de ne pas s'arrêter totalement si le canton en aval se libère,
- le système Euroloop est présent essentiellement sur la voie avec un équipement de détection à bord.

- *d'un dispositif de réouverture par radio :*

- il opère, également, uniquement sur le niveau 1, il fournit les informations relatives au prochain signal et permet au train de ne pas s'arrêter complètement si le canton suivant a été libéré en franchissant le signal d'arrêt.

2.3.2 *Le sous-système "embarqué".*

La composition de ce sous-système dépend également du niveau appliqué. Le sous-système peut-être composé : [SRS-00]

- *du matériel ERTMS/ETCS situé à bord du train :*

- ERTMS/ETCS est un système informatisé embarqué qui contrôle le mouvement du train auquel il appartient et assure les échanges données avec :
 - le sous-système "fixe"
 - le conducteur
 - le train
 - les modules spécifiques de transmission (STM) qui offrent la possibilité d'interfacer l'équipement embarqué d'ERTMS/ETCS avec un équipement de contrôle des trains déjà existant, ils ont donc une fonction de traducteur.

- *d'un système de communication radio embarqué (GSM-R) :*

- ce système radio est utilisé pour les échanges bidirectionnels entre le sous-système "embarqué" et le centre de regroupement radio (RBC) ou le dispositif de réouverture par Euroloop par câble.

2.4 NIVEAUX D'APPLICATION DU SYSTEME ERTMS/ETCS

Les différents niveaux d'application du système ERTMS/ETCS caractérisent et définissent les règles et les procédures d'exploitation du couple : voie et train. Le système ERTMS/ETCS peut être configuré pour opérer selon l'un des cinq niveaux : le niveau 0, le niveau STM, les niveaux 1, 2 et 3. Selon la configuration du train et de la voie

Dans la suite, on se propose d'explicitier sommairement les 5 niveaux ERTMS. [SRS-00]

2.4.1 Niveau 0.

Le niveau 0 est le niveau le plus bas d'ERTMS qui caractérise les opérations et les situations où les trains sont équipés du système ERTMS/ETCS mais circulent sur des voies normales, c'est-à-dire non équipées en ERTMS/ETCS. C'est un niveau qui permet donc aux trains équipés ERTMS/ETCS de circuler sur toutes les voies, y compris celles qui ne sont pas équipées ERTMS/ETCS.

Le système ERTMS/ETCS est donc caractérisé, pour ce niveau, de la façon suivante :

[SRS-00]

- *Equipement de la voie :*
 - Aucun, sauf, éventuellement, une transmission Eurobalise qui annonce les transitions de niveaux.
- *Fonctions du système ERTMS/ETCS installé sur la voie :*
 - Aucune.
- *Equipement du train :*
 - Transmission Eurobalise : antennes.
- *Fonctions du système ERTMS/ETCS à bord du train :*
 - Surveillance de la vitesse maximale du train.
 - Lecture des balises (Eurobalise) pour détecter les niveaux de transitions et les commandes spécifiques.
 - Pas de système de signalisation en cabine de conduite.

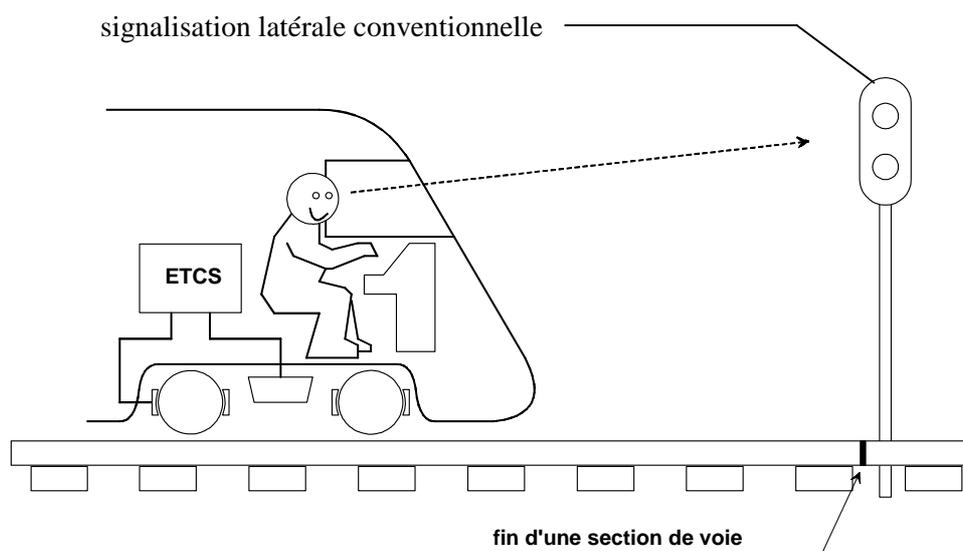


Figure 1 : Schéma descriptif du niveau 0

Comme le montre la figure 1 ci-dessus, la voie est équipée uniquement du système de signalisation déjà existant et conventionnel et le train est équipé du système ERTMS/ETCS. Il n'y a pas de signalisation en cabine de conduite, le conducteur effectue donc un contrôle visuel extérieur pour connaître les informations (autorisation d'avancer,...).

2.4.2 Niveau STM.

Le niveau STM est utilisé pour les trains équipés ERTMS/ETCS qui circulent sur des voies équipées avec des systèmes de contrôle de trains différents du système ERTMS/ETCS.

Les informations venant des voies sont alors transformées à bord du train en informations interprétables par le système ERTMS/ETCS.

Le dispositif qui permet au système ERTMS/ETCS, installé à bord du train, d'utiliser le système de transmission implanté sur les voies est appelé STM (Specific Transmission Module).

Pour ce niveau, le système ERTMS/ETCS est installé de la façon suivante : **[SRS-00]**

- **Equipement de la voie :**

- Aucun, le niveau STM utilise un système de transmission voie-train qui ne fait pas partie du système ERTMS/ETCS.

- Des balises.
- **Fonctions du système ERTMS/ETCS installé sur la voie :**
 - Aucune.
- **Equipement du train :**
 - Transmission Eurobalise.
 - Système de transmission STM compatible avec les équipements de l'infrastructure.
 - EVC.
- **Fonctions du système ERTMS/ETCS à bord du train :**
 - Lecture des balises (Eurobalise) pour détecter les transitions de niveaux et les commandes spécifiques.
 - Gestion du système STM, c'est-à-dire interpréter correctement les informations reçues.
 - Système de signalisation en cabine de conduite, éventuellement utilisé.

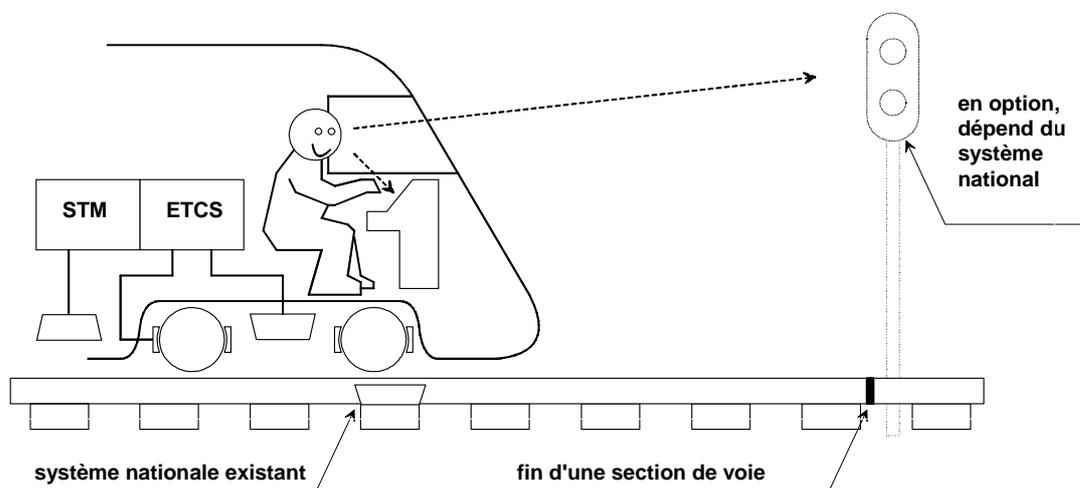


Figure 2 : Schéma descriptif du niveau STM

La figure 2 ci-dessus montre que le train est équipé d'un dispositif STM permettant d'interpréter les informations transmises de la voie au train. La voie n'a, quant à elle, pas subi de modifications.

2.4.3 Niveau 1.

Le niveau 1 caractérise un système de contrôle de train, basé sur la transmission par balises essentiellement, qui vient se greffer sur le système de signalisation latérale conventionnelle.

Il est utilisé pour les trains équipés ERTMS/ETCS circulant sur une voie équipée ERTMS/ETCS avec des balises et, éventuellement, des systèmes de réouverture : Euroloop ou par radio.

Les informations, telles que les autorisations de mouvement, engendrées par la voie sont transmises au train par les balises. Le niveau 1 possède un système de surveillance de la vitesse, qui contrôle et évite un dépassement éventuel de celle-ci. **[SRS-00]**.

- ***Equipement de la voie :***
 - Transmission Eurobalise pour les informations de signalisation de la voie au train.
 - Eventuellement, Euroloop ou le système de réouverture par radio, pour les informations de réouverture, c'est-à-dire les autorisations de passage au canton suivant.
- ***Fonctions du système ERTMS/ETCS installé sur la voie :***
 - Le système détermine les autorisations de mouvement d'après le système de signalisation déjà existant.
 - Il transmet les autorisations et les données décrivant la voie au train.
- ***Equipement du train :***
 - Transmission Eurobalise.
 - Transmission Euroloop si la réouverture par Euroloop est exigée.
- ***Fonctions du système ERTMS/ETCS à bord du train :***
 - Réception des autorisations de mouvement et des informations sur la voie.
 - Comparaison de la vitesse actuelle avec la vitesse permise et commande du freinage, si nécessaire.
 - Système de signalisation en cabine de conduite.

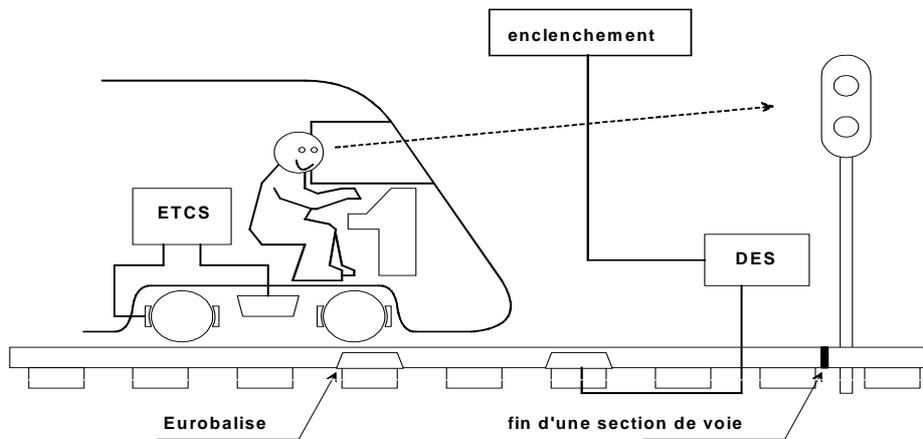


Figure 3 : Schéma descriptif du niveau 1 sans fonction de réouverture

La figure 3 ci-dessus et la figure 4 ci-dessous montrent que le niveau 1 possède un système de transmission par balise qui vient s'ajouter au système de signalisation existant. La figure 4 diffère de la figure 3 par le simple fait que la voie possède un système de réouverture Euroloop ou par radio qui permet au train de ne pas s'arrêter complètement si le canton en aval se libère. Le niveau 1 peut donc être configuré selon les deux modèles.

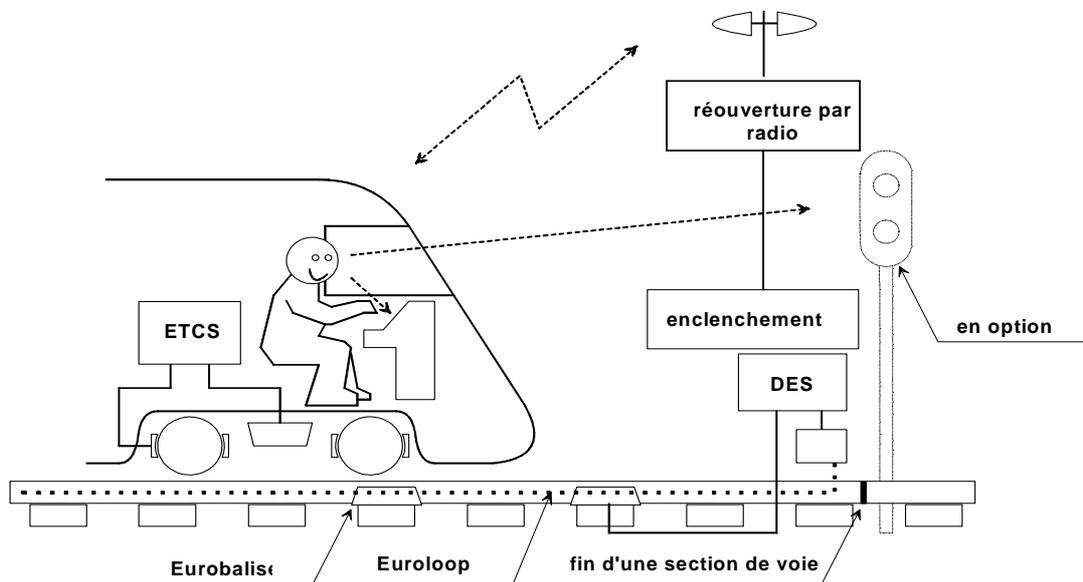


Figure 4 : Schéma descriptif du niveau 1 avec fonction de réouverture par Euroloop ou par radio

2.4.4 Niveau 2.

Le niveau 2 est, également, implanté ou non en superposition de la signalisation existante. Il est utilisé pour les trains équipés ERTMS/ETCS sur une voie équipée ERTMS/ETCS, contrôlée par RBC.

Les autorisations d'avancer sont transmises à bord du train en utilisant une transmission voie/train par radio.

Le niveau 2 possède un système de surveillance de la vitesse, qui contrôle et évite un dépassement éventuel de celle-ci.

Il utilise la transmission par radio (Euroradio) pour la communication voie/train et les balises (Eurobalise) comme dispositif de transmission pour l'information sur la position du train.

La surveillance de la détection et le contrôle de l'intégrité du train se fait à l'aide du matériel installé sur la voie.

La voie et le train sont donc équipés de la manière suivante : **[SRS-00]**

- **Equipement de la voie :**
 - RBC (Radio Block Centre).
 - Transmission Eurobalise pour l'information sur la position.
 - Transmission Euroloop pour la communication bidirectionnelle voie/train et train/voie.
- **Fonctions du système ERTMS/ETCS installé sur la voie :**
 - Connaître l'emplacement de chaque train contrôlé par le système ERTMS/ETCS, dans un domaine contrôlé par RBC.
 - Déterminer les autorisations de mouvement d'après le système de signalisation déjà existant.
 - Transmettre les autorisations et la description de la voie à chaque train.
- **Equipement du train :**
 - Transmission Eurobalise : antenne.
 - Transmission Euroradio : antenne.
- **Fonctions du système ERTMS/ETCS à bord du train :**
 - Lecture des balises (Eurobalise).
 - Envoi au RBC de la position du train, détecté à l'aide des Euroloop par câble.

- Réception des autorisations de déplacement et des informations concernant la description des voies par Euroradio.
- Comparaison de la vitesse actuelle avec la vitesse permise et commande du freinage, si nécessaire.
- Système de signalisation en cabine de conduite.

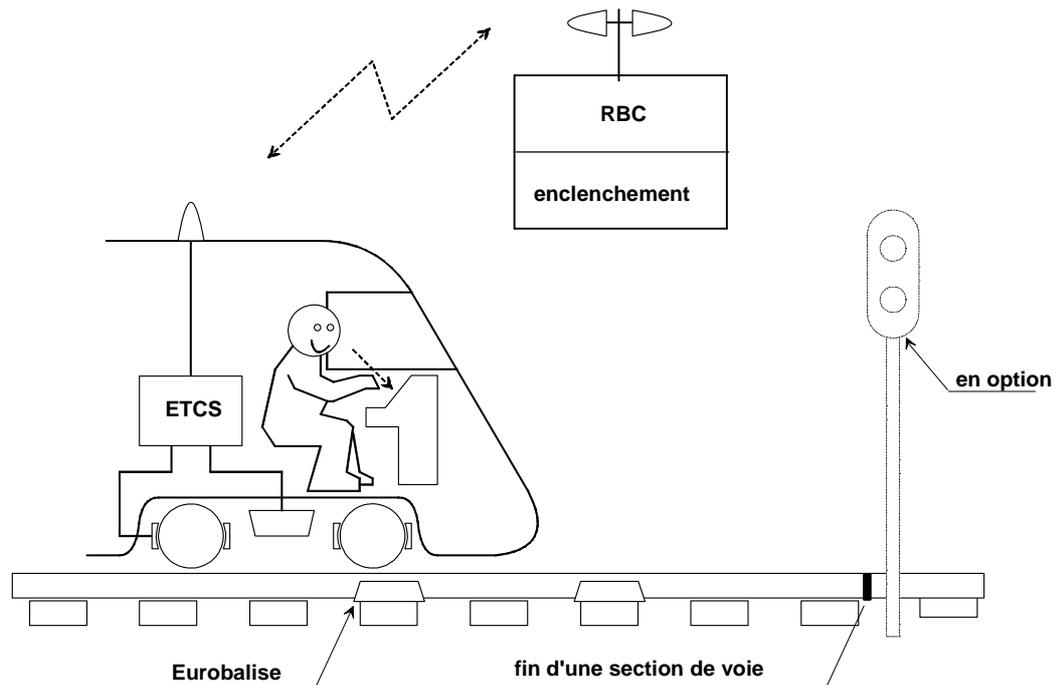


Figure 5 : Schéma descriptif du niveau 2

On voit, aisément, sur la figure 5 que la voie est équipée de balises et d'un centre radio (RBC) permettant l'échange d'informations entre la voie et le train. Le train est, quant à lui, équipé du système ERTMS/ETCS muni d'un récepteur radio qui transmet les informations et d'un récepteur d'informations provenant des balises.

2.4.5 Niveau 3.

Les trains reçoivent, en plus des équipements du niveau 2, un système de contrôle d'intégrité du train. Les équipements de la voie et les fonctions du système ERTMS/ETCS sur la voie sont identiques à ceux du niveau 2. Les seuls changements qui existent entre ces 2 niveaux se situent au niveau du train :

[SRS-00]

- **Equipement du train :**

- En plus des équipements du niveau 2, vient s'ajouter un système fournissant l'intégrité du train.

- **Fonctions du système ERTMS/ETCS à bord du train :**

- En plus des fonctions du niveau 2, viennent s'ajouter la surveillance de l'intégrité du train ainsi que l'envoi de cette information au RBC. Il sert aussi à déclencher un FU.

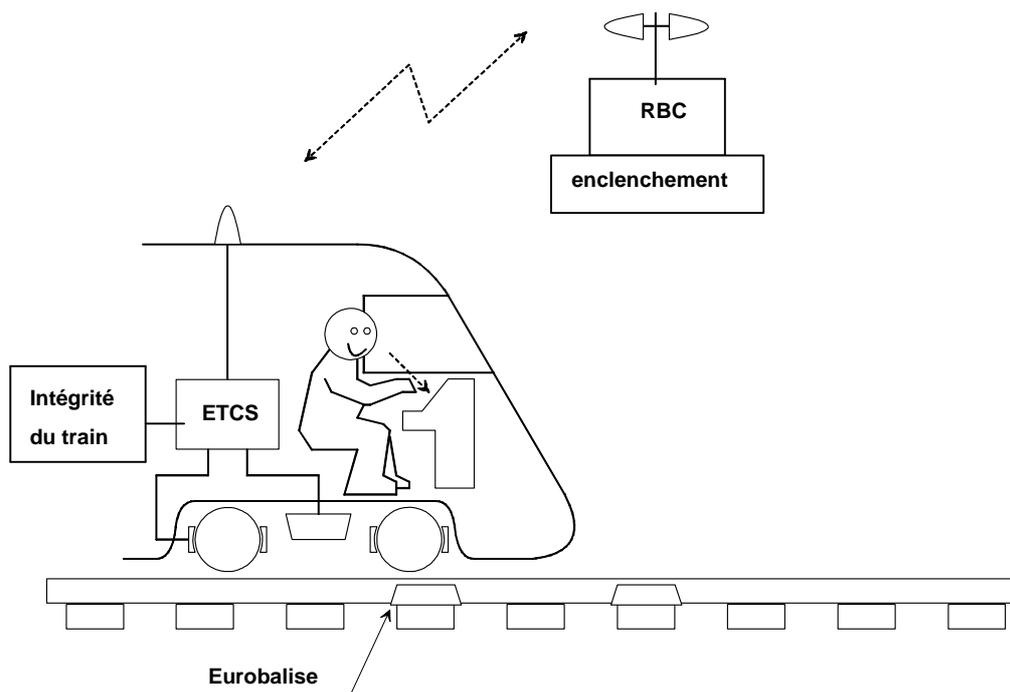


Figure 6 : Schéma descriptif du niveau 3

On constate donc, grâce à la figure 6, que le niveau 3 diffère du niveau 2 uniquement par l'ajout d'un système de contrôle de l'intégrité du train, installé à bord du train.

2.5 PROCEDURES

Les procédures dans le projet ERTMS viennent se greffer aux précédentes notions abordées, telles que les niveaux, les modes, les transitions ou les conditions à respecter. Elles clôturent, au moins en partie, la liste des mots-clés qui correspond au projet. La notion de procédure définit ici un ensemble de démarche à suivre pour assurer un bon fonctionnement du système. Chaque procédure est définie par un ensemble de conditions obligatoires et, lorsque c'est possible, par un diagramme de transitions d'états. Chaque procédure étant très précisément détaillée dans le document [SRS-00].

2.6 MODES D'EXPLOITATION DU SYSTEME ERTMS

Les modes d'exploitation d'ERTMS sont divers et constituent l'ensemble des modes opératoires et des procédures nécessaires pour assurer, en sécurité, les échanges d'informations entre le conducteur et le sous-système "embarqué". Chaque mode est associé à une configuration particulière (train, voie et conditions) dans laquelle le train pourrait se trouver. La liste suivante énumère tous les modes possibles et offre une définition simple de chaque mode. Le passage d'un mode à l'autre s'appelle une transition, mais il n'existe pas forcément de transitions entre tous les modes, c'est-à-dire que certains modes ne peuvent être consécutifs à d'autres.

Liste et définitions des modes.

Il a été défini 16 modes d'exploitation pouvant correspondre à une situation précise du train, engendrant un échange d'informations spécifique entre le conducteur et le sous-système "embarqué" : [SRS-00].

- **No Power** : Intervient lorsque l'équipement embarqué ERTMS/ETCS n'est pas actionné. Le freinage d'urgence sera donc commandé.
- **Stand By** : Constitue un mode par défaut qui intervient lors de la mise en route du système ERTMS/ETCS ou lorsque la cabine de signalisation n'est pas en service. Il correspond à un mode d'attente.
- **Shunting** : Permet au train de se déplacer sans que les données du train (telles que la position, la vitesse limite...) ne soient parvenues au conducteur.
- **Full Supervision** : Intervient quand toutes les données concernant le train sont disponibles à bord. Il assure une surveillance et un contrôle de la vitesse.
- **Staff Responsible** : Autorise le conducteur à déplacer le train dans une zone équipée ERTMS/ETCS, sous sa propre responsabilité. Ce mode est utilisé quand le système ne connaît pas l'itinéraire.(cas de travaux)
- **On Sight** : Permet au train d'entrer dans une section de voie qui pourrait être déjà occupée par un autre train ou par un obstacle quelconque. Le conducteur a alors l'entière responsabilité de la sécurité du train.

- ***Sleeping*** : Intervient lorsque le système est en veille. *Non Leading* Intervient lorsque le matériel embarqué et le conducteur ne sont pas dans la cabine principale.
- ***Unfitted*** : Permet à un train équipé du système ERTMS de traverser une zone non-équipée.
- ***Trip*** : Prévoit un déclenchement du freinage d'urgence. Il intervient, par exemple, lorsque le train a dépassé la distance qu'il avait à parcourir ou lorsqu'il a reçu l'information "DANGER".
- ***Post Trip*** : Intervient après un arrêt du train en urgence en mode Trip et dès que le conducteur a pris connaissance de la situation.
- ***System Failure*** : Intervient lorsqu'une panne détectée pourrait influencer sur la sécurité. Le freinage d'urgence sera commandé.
- ***Isolation*** : Intervient quand le système de freinage est déconnecté du système ERTMS/ETCS.
- ***STM (European)*** : Permet l'utilisation d'un système national de signalisation tout en appliquant les fonctions d'ERTMS/ETCS. Il est utilisé uniquement au niveau STM.
- ***STM (National)*** : Permet l'utilisation d'un système national et applique les règles nationales.
- ***Reversing*** : Autorise le conducteur à changer de sens de conduite, tout en restant dans la même cabine. Ce mode permet au train d'échapper à des situations dangereuses.

2.7 CONCLUSION

Le projet ERTMS a de nombreux aspects techniques plus ou moins complexes. Le système ERTMS est constitué de 2 sous-systèmes, le sous-système "fixe" et le sous-système "embarqué", qui se décomposent en différents équipements tels que les balises, les circuits Euroloop... L'association de différentes caractéristiques techniques contrôle et assure la sécurité du trafic ferroviaire. Le contenu de ce document a été, essentiellement, extrait du rapport *System Requirements Specification* [SRS-00]. Plusieurs autres documents ont néanmoins été consultés pour permettre une bonne compréhension des concepts complexes et non encore stables du projet ERTMS.

2.8 BIBLIOGRAPHIE

[PCA-97] P.CASTAN - "Présentation de projet ERTMS- Développement des systèmes ERTMS et réalisation des bases de pré-série" – 1997.

[ECS-99] ECSAG, Safety Requirement & Objective Group (ESROG), Special Study Proposal, RT_ESROG_SSP_01, Issue 1 June 1999.

[CSP-99] Risk Profiling of Railways, Current Safety Performance of Railways Models (CSPR0 & CSPR1) Master Report, RT_RPR_CSPR_01, Issue 1 Draft 1, Railtrack plc, April 1999.

[FUN-99] Functional Requirements Specification, A200/FRS, Version 4.27, 17 Nov. 1999.

[UNI-99] UNISIG SRS, ERTMS/ETCS-Class 1 Subset 026, Issue 2.0.0, 22 Dec. 1999.

[ESR-00] Safety Requirements and Objectives Group (ESROG), ERTMS Scope, Boundary and Hazards, ESROG_SBH_01, Issue 1 Draft 3, January 2000.

[HER-00] Transport RTD Program Tasks 38-39-40, Technical Annex HEROE, European Commission, Directorate General Transport, Version 0c, 22 February 2000.

[ESR-00] Safety Requirements and Objectives Group (ESROG), ERTMS Hazard rates and Safety Forecasts, ESROG_HRF_01, Issue 1, May 2000.

[AEI-00] The Trans-European High-Speed Rail System, Technical Specification for Interoperability Control-command and Signalling Subsystem, AEIF, V2.07, May 2000.

[SRS-00] ERTMS "European Rail Traffic Management System", EEIG – ADTRANZ ALCATEL – ALSTOM - ANSALDO SIGNAL - INVENSYS RAIL – SIEMENS "UNISIG System Requirements Specification" – Avril 2000.

2.4.5.1.1 [FLA-00] Gaëlle FLAHAUT, « Projet ERTMS Harmonisation du réseau ferroviaire européen », Rapport de stage l'INRETS-ESTAS en 2000.

[EUG-00] ERTMS USERS GROUP – "HEROE PROJECT WP B Qualitative assessment " – référence EEIG : 00C575 – Août 2000.

[ELE-01] E. El kursi, G.Flahaut, H.Zaalberg and A.Hessami, "Safety Assessment of European Rail Rules for Operating ERTMS", APM, San francisco, USA, 2001.

[POR-00] Jacques PORÉ, « La signalisation ferroviaire européenne », RMF n°424, Juin 2000.