



UNIVERSITÉ DU HAVRE



INSTITUT FRANÇAIS DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES DES
TRANSPORTS, DE L'AMÉNAGEMENT
ET DES RÉSEAUX

STAGE DE FIN D'ÉTUDE

MASTER 2 GÉNIE CIVIL
SPÉCIALITÉ RENEWABLE ENERGY IN CIVIL
ENGINEERING

Eco-conception routière

**Etude de l'impact de la géométrie routière sur la
consommation d'énergie des véhicules**

Auteur :

Freddy TOYNAN

Responsables :

M. Gregory PINON
M. Alex COIRET
M. Pierre-Olivier VANDANJON

Juin 2013

Table des matières

Remerciements	4
Introduction	5
1 Partie A : ETAT DE L'ART	6
1.1 LA NECESSITE D'UNE INFRASTRUCTURE ROUTIERE .	6
1.2 TYPOLOGIE DES ROUTES	7
1.2.1 Les réseaux structurants :	7
1.2.2 Les autres voies principales :	8
1.3 CONCEPTION ET GEOMETRIE	8
1.3.1 Tracé en plan	9
1.3.2 Profil en long	11
1.3.3 Profil en travers	11
1.4 STRUCTURE DE CHAUSSEE	12
1.4.1 Revêtement de chaussée	13
1.4.2 Adhérence et uni	13
1.4.3 Adhérence	14
1.4.4 Uni	16
1.5 LE TRAFIC	18
1.5.1 Scénario Français	18
1.5.2 Scénario Allemand	18
1.5.3 L'état du trafic en Chine	19
1.6 DYNAMIQUE DU VEHICULE	20
1.6.1 Dynamique longitudinale	20
1.6.2 Dynamique transversale	23
1.6.3 principe de fonctionnement d'un moteur thermique .	25
1.7 PROBLEMATIQUE DES ENERGIES FOSSILES	25
1.7.1 Energies renouvelables et perspectives des nouveaux modes de mobilités	27

2	Partie B : ETUDE DES PARAMETRES D'INFLUENCE	29
2.1	Méthodes d'évaluation des consommations [19]	29
2.1.1	Modèles de consommation	29
2.1.2	Effet des pentes	30
2.1.3	Effet des virages relevés	31
2.2	Méthode d'évaluation par modèle de simulation [17]	32
2.3	Etude paramétrique de consommation [20]	34
2.4	Rapport temps de parcours-consommation en situations de pentes [12]	37
2.5	Influence d'un point d'arrêt du type péage routier [15]	39
2.6	Modèle numérique ; Estimation par paliers de vitesse : [10]	40
2.7	Modèle numérique ; Pente et dissipation d'énergie [22]	42
3	ETUDES EXPERIMENTALES - PROPOSITION D'UN PLAN D'ESSAIS	44
3.1	Généralités	44
3.2	Instrumentation du véhicule	44
3.3	Personnel impliqué	46
3.4	Précautions à envisager	46
3.5	Procédure de validation des instruments	47
3.6	Essais à réaliser	47
3.6.1	Identification de l'influence du dévers	47
3.7	Identification de l'influence des virages	47
3.8	Identification de l'influence de la pente	47
3.8.1	Influence des points d'arrêt (carrefours, feux et ronds-points)	48
3.8.2	Récapitulatif des essais	48
4	Essais réalisés sur la piste d'expérimentation de l'IFSTTAR	50
4.1	Essai 1 : Influence du dévers sur la consommation d'énergie	50
5	TRAITEMENT DES DONNEES ACQUISES EN ESSAIS D'INTE-	

GRATION (SUR PISTE) - Mise en évidence de l'effet du dévers	52
5.1 Traitement	52
5.2 Objectif	52
5.3 Résultats	52
6 Essais sur route	56
6.1 Les itinéraires	56
6.1.1 Itinéraire 1	56
6.1.2 Itinéraire 2	57
6.1.3 Itinéraire 3	57
6.2 Déroulement des essais	58
6.3 traitement des données	59
6.3.1 Anémomètre	59
6.3.2 GPS	60
6.3.3 Débitmètre	61
Conclusion	62

Remerciements

Introduction

1 Partie A : ETAT DE L'ART

1.1 LA NECESSITE D'UNE INFRASTRUCTURE ROUTIERE

Il existe un lien historique qui lie la route et le développement de l'humanité et des civilisations. On s'accorde à croire que les romains ont été les précurseurs de l'infrastructure routière aussi bien de part l'élaboration du secteur viaire que celui de l'adduction en eau. Les ambitions expansionnistes des nations de l'époque faisaient d'ors et déjà appel à cette technologie faisant ainsi office d'appuis de développement. Il s'agissait de déplacer des troupes militaires et leur artillerie, appelant la notion de résistance mécanique au vu des importantes sollicitations induites à l'ouvrage ; cela explique bien pourquoi les premiers matériaux utilisés dans la construction des routes étaient des minéraux durs ayant la résistance mécanique adéquate, bien souvent même, sur-dimensionnant pour l'ouvrage.

En France, on se situe au dix-septième siècle pour parler de réel réseau routier avec une toile de 30000 Km avant 1789. Les difficultés ont commencé à faire surface avec l'expansion des parcs automobiles qui ont fait appel à une nécessité d'aménagement rapide du réseau. Selon les chiffres et les termes du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), le réseau national routier comporte, à l'issue de la nouvelle étape de décentralisation, environ 20000 Km de voies, soit 11000 Km d'autoroutes et 9000 Km de routes nationales. Il faut ajouter à celles-ci 378000 km de routes départementales, 630000 km de routes communales et 600 000 km de chemins ruraux ; soit un total 1628 260 km de longueur totale du réseau routier français selon les chiffres de l'USIRF. Notons que l'année 2010 a affiché un indice de circulation de +1.6%.

La route occupe une fonction économique. Par exemple le développement économique et industriel qui a suivi la deuxième guerre mondiale a été possible grâce au réseau routier permettant une distribution efficace de la production agricole sur d'importantes distances, comme le révèlent les travaux d'Hervé Brunel [2]. L'impact d'un investissement public en infrastructure routière selon lui, serait de l'ordre de 60%. Sachant que les activités de construction et d'entretien que génèrent les routes représentent également une fonction économique. L'infrastructure routière est enfin un outil d'aménagement du territoire en ce sens où elle transforme son organisation et la distance entre les bassins d'activité et d'habitation.

PROBLEMATIQUES

- Sécurité routière : La problématique de la sécurité routière est bien évidemment liée à l'augmentation constante du trafic. Trois composantes interagissent pour définir la circulation d'un véhicule sur une route : l'Homme, l'automobile et l'environnement. C'est lorsqu'il y a un dysfonctionnement de la relation qui les lie qu'arrive un accident. Nous verrons que les paramètres de dimensionnement géométrique des routes tiennent compte des aspects de la sécurité routière.
- Impact environnemental : La situation initiale de tout projet est son environnement et il est clair que celui-ci se verra modifié sous différents aspects. Qu'il s'agisse de travaux neufs ou de modernisation d'itinéraire, l'ouvrage ne cesse d'impacter sur son environnement à tous les stades de sa vie et l'étude de ces impacts est aujourd'hui l'une des préoccupations majeures en amont de tout projet routier. C'est une préoccupation assez récente des aménageurs et ce stade se situe dans ce contexte environnemental.

1.2 TYPOLOGIE DES ROUTES

La typologie des routes en France est définie par le catalogue établi par le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) [2]. On distingue deux principales catégories :

1.2.1 Les réseaux structurants :

Les autoroutes : Ce sont des routes de liaison du type L qui sont justifiées pour des itinéraires structurants. Elles sont destinées à recevoir un trafic important à moyenne ou longue distance. Les autoroutes se caractérisent par :

- Des chaussées séparées par un terre-plein central
- Des échanges dénivelés
- Des accès limités aux échangeurs
- Une bande d'arrêt
- Une signalisation spécifique
- Une limitation de vitesse à 130 Km/h

Les routes express : Elles sont du type T, caractéristique des routes de transit. Elles ont pour vocation de recevoir un trafic à moyenne ou longue distance mais uniquement dans des proportions notables. On

conçoit ce genre de route dans le cas où le trafic capté est insuffisant pour construire une autoroute. Elles se distinguent par :

- Une chaussée unique
- Des créneaux de déplacement
- Des limitations de vitesse allant de 90 Km/h (chaussée unique) à 110 Km/h (chaussées séparées)

1.2.2 Les autres voies principales :

Les artères interurbaines : Les artères interurbaines : Elles répondent à un schéma directeur supportant un trafic élevé. Routes de type R, les artères interurbaines sont adaptées aux liaisons très chargées et se possèdent intrinsèquement :

- De carrefours plans possibles sans traversées du terre-plein central
- D'accotements dérasés
- D'une limitation de vitesse de 90 Km/h à 110Kmh selon qu'il y ait un accès aux riverains ou pas.

Les autres routes : Destinée à accueillir un faible trafic, elles se structurent d'une chaussée unique avec possibilités de créneaux, des carrefours plans et des accotements dérasés. La limitation de vitesse y est de 90 Km/h.

A ces principales catégories viennent s'ajouter les voies secondaires du type S qui ont les mêmes caractéristiques que les autres voies principales mais avec un faible trafic ainsi que les voies urbaines qui peuvent être principales (à une ou deux voies) ou encore à desserte d'activités locales à une seule chaussée.

1.3 CONCEPTION ET GEOMETRIE

L'objectif ici est de justifier la présence sur le tracé des éléments de géométrie routière qui ont une influence sur la consommation d'énergie des véhicules. Les considérations prises en compte par les concepteurs des routes ont évolué au fil du temps dans un souci d'adaptation aux contraintes imposées par la société et l'environnement immédiat des voies de circulation. C'est ainsi que les seuls facteurs prépondérants étaient liés à la norme et à la topographie des lieux. Il s'en est ensuite suivit d'une période où l'on a ressenti le besoin de prendre en compte les notions de

trafic et d'économie et aujourd'hui les concepteurs intègrent les notions d'esthétique, de bruit et d'environnement par exemple. Lors de la conception, les contraintes d'une route sont classées en cinq catégories :

- L'aspect Génie Civil
- L'aspect fonctionnel
- L'aspect économique
- L'aspect écologique
- L'aspect politique

Une route se caractérise par ses éléments géométriques. Le tracé en plan, le profil en long ou encore le profil en travers, ont tous une influence sur la dynamique du véhicule, le comportement de l'utilisateur et donc induisent des variations d'énergie consommée ou dissipée selon les cas.

1.3.1 Tracé en plan

Il est effectué selon les logiques de sécurité et de confort mais aussi et surtout de topographie du site. Il répond en réalité à un choix ; on parle de « choix de tracé ». La vision simpliste selon laquelle la ligne droite est le plus court chemin n'est pas valable ici car au-delà des obstacles qu'il faut parfois éviter et contourner il y a également la question de la vigilance du conducteur qui risque d'être altérée en restant trop longtemps sur une ligne droite. Les virages sont caractérisés par leurs rayons de tracé et des dévers et ces paramètres de conception sont liés à la dynamique du véhicule, l'interaction entre la pneumatique et la chaussée, mais également le confort encore une fois. Son élaboration implique la définition d'une valeur minimale de rayon en fonction de la vitesse et du dévers ainsi que la définition d'un seuil de sécurité. Deux notions sont fondamentales en termes de virage :

- Le rayon minimal : qui est associé au dévers et garanti la stabilité des véhicules en fonction de la vitesse de référence de la route.
- Le rayon non déversé : qui garanti la stabilité hors dévers ; Selon [8], des essais ont été réalisés pour déterminer des relations entre la sécurité, le confort et la stabilité en zone de virage. on définit ainsi un seuil de stabilité. Il est aussi ajouté :
 - Le seuil de sécurité = $2/3$ du seuil de stabilité ;
 - Seuil de confort = $1/2$ du seuil de stabilité, sachant qu'une marge de confort correspondant à l'accélération transversale admise par l'utilisateur est prise en compte.

Cette étude a également montré que dans le cas du trafic des poids lourds, lorsqu'il devient important, une sur-largeur des virages d'environ $50/R$ est requise pour les cas de rayons inférieurs à 200m. Elle souligne par la suite la nécessité de pousser plus loin les études de giration pour des rayons très faibles.

[8] met en évidence les caractéristiques minimales d'un virage permettant la giration d'un véhicule (autocar TRACER) à empattement maximal par une simulation numérique (Figure 1).

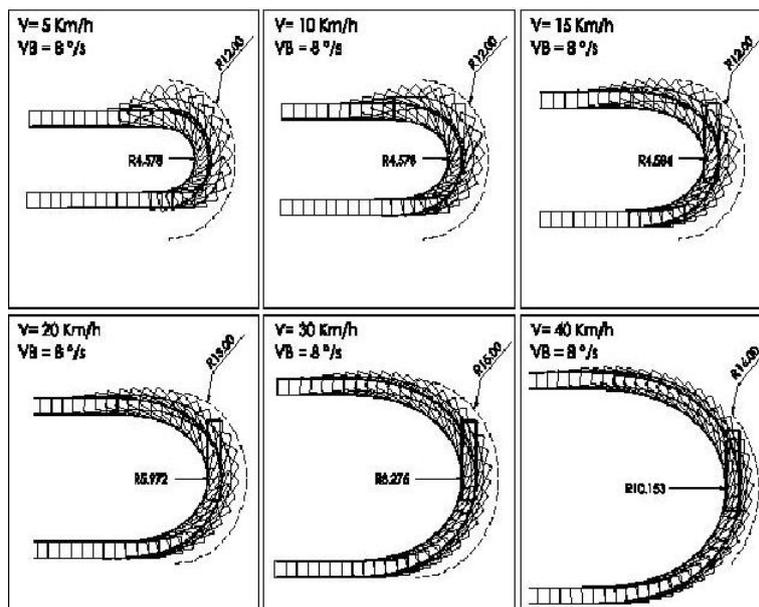


FIGURE 1 – Modélisation de situations de virages (source SETRA)

Sachant que les normes des véhicules leur imposent de pouvoir tourner entre deux cercles concentriques avec rayon intérieur 5,30m et de rayon extérieur 12,50m, la simulation montre qu'avec des vitesses allant de 5Km/h jusqu'à 40Km/h, les rayon enveloppe varient de 12m à 16m en extérieur et de 4,58m à 10,15m en intérieur. Dans le cas d'un projet réel, les conditions de giration sont moins optimales et tiennent compte de la marge sécuritaire de l'utilisateur, des conditions de non arrachement des chaussées, de la pente interne et de la nécessité d'une sur-largeur.

1.3.2 Profil en long

Nous nous intéressons à cette caractéristique géométrique de la route du fait que sa composition soit essentiellement faite de successions de déclivités liées entre elles par des raccordements circulaires.

Pentes et rampes

On admet des valeurs maximales de pentes et rampes dans une fourchette comprise entre 8% et 10%. En plus des fonctions d'écoulement d'eaux pluviales et d'assainissement, ces valeurs sont également tributaires de la sensibilité de l'ouvrage aux phénomènes hivernaux. La valeur adoptée d'une pente doit cependant rester dans la logique d'une optimisation car une forte pente induirait des problèmes lors du freinage des véhicules du type poids lourd, compromettant ainsi la fonction sécuritaire de l'infrastructure. Il est aussi à noter que dans un enchaînement de deux fortes pentes, il vaut mieux éviter d'insérer une moyenne pente pour parer au problème de remise des véhicules, qui, dans une variation de rapport du moteur, couplée à d'autres facteurs, entraînera une surconsommation d'énergie. Les rampes peuvent elles aussi être facteurs d'un problème vis-à-vis de la fluidité du trafic, entraîner des surconsommations pour les véhicules tel que le montre les études [8].

1.3.3 Profil en travers

C'est une coupe perpendiculaire à l'axe de la route. De manière générale, il se compose des éléments comme représentés sur la figure 2.

Sa géométrie sera intéressante dans le cadre de notre étude du fait que le profil en travers de la route impose un dévers, une pente transversale qui, en ligne droite joue un rôle d'assainissement vis-à-vis des eaux de pluie mais dans un rayon de courbure, contribue à l'équilibre dynamique du véhicule. Un véhicule en mouvement dans un virage est soumis à un effet centrifuge qui se traduit par une sensation d'éjection, une tendance à l'éloigner du centre de rotation. Le dévers en virage comme le souligne [6], permet de réduire le rayon de courbure pour atteindre l'équilibre dynamique. Une étude que confirment les travaux de thèse d'Ouahi Mohamed en 2012 [14], élaborant un modèle construit sur le principe

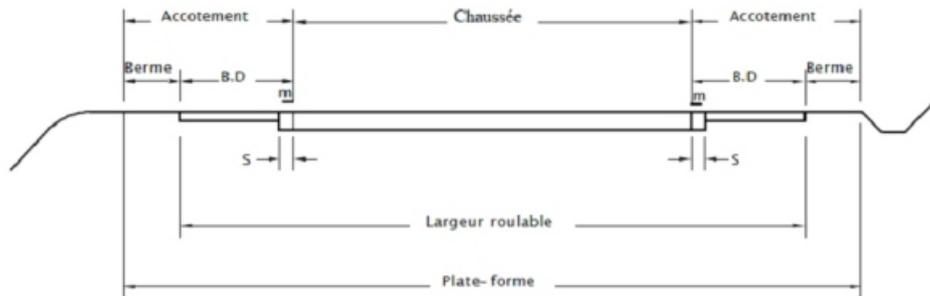


FIGURE 2 – Profil en travers (source SETRA)

d'une masse subissant une accélération latérale et pouvant tourner autour d'un axe de roulis. L'angle de dérive du centre de gravité du véhicule et l'angle de dévers sont donc étroitement liés ; une estimation qui a fait l'objet d'études [24] dans le but de développer l'optimisation de la contrôlabilité des véhicules en zone de dévers, des limitations de vitesse en virage ; des paramètres qui retiennent notre attention du fait de leur impact sur la consommation d'énergie des véhicules, objet de notre étude.

1.4 STRUCTURE DE CHAUSSEE

La structure de chaussée joue le rôle d'interface entre la pneumatique des véhicules et le sol support. Elle assure le transport des charges induites par les véhicules roulant à sa surface. Ce sont ici les poids lourds qui sont pris en compte car ils sont considérés comme dimensionnant. La chaussée se compose de différentes couches et s'apparente globalement à une poutre en flexion à laquelle s'applique des charges roulantes. La structure de chaussée converti donc les sollicitations à un niveau admissible par le sol support en amoindrissant les déformations. Le constat logique qui en découle est que les performances d'une chaussée sont inversement proportionnelles à l'importance des sollicitations reçues et donc du trafic. Une structure de chaussée se compose de quatre éléments structurels : le sol en place, la couche de forme, la couche de fondation et la couche de roulement, assimilée au revêtement, qui retient le plus l'attention de notre étude. Les paramètres de performances mécaniques, de coût et de dimensions vont croissants de la couche la plus basse à la plus haute.

1.4.1 Revêtement de chaussée

Le revêtement est la couche qui est en contact direct avec la pneumatique avec qui il réagit. De manière basique, c'est une association de liant et d'agrégats qui vont donner naissance à la notion de rugosité. D'un point de vue sécuritaire cela offre de bonnes conditions de roulage et de freinage. L'observation d'une rugosité qui interpelle sur la texture de la chaussée peut se faire à trois différentes échelles :

- On parle de micro-texture pour des longueurs d'onde $\lambda < 0,5mm$;
- De macro-texture pour des longueurs d'onde $0,5mm < \lambda < 50mm$;
- Et de mega-texture pour des longueurs d'onde $50mm < \lambda < 500mm$.

D'un point de vue concepteur la micro-texture sert à rompre le film d'eau pour les revêtements humides et joue un rôle important pour l'adhérence à faible vitesse. La macro-texture quant à elle assure l'évacuation des eaux qui entraîne une diminution de l'adhérence quand la vitesse augmente.

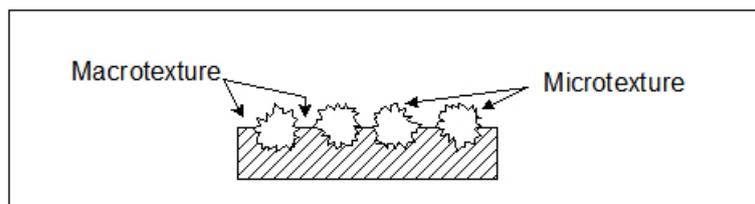


FIGURE 3 – Macro et microtexture

Les facteurs qui influent la qualité d'un revêtement routier sont entre autres sa formulation, sa mise en œuvre, la structure de chaussée, l'âge, le trafic, le climat et la géométrie. En infrastructure routière, deux grandes familles de revêtement (dont nous exposerons le débat plus tard) existent : Le béton bitumineux (BB) : qui offre une grande élasticité et se compose de gros et petits granulats avec 20 à 25% de vides ; Le béton de ciment : renferme une plus grande proportion de sable et donc conduit à une plus grande compacité et une surface plus lisse. Du point de vue de la macro-texture, le béton de ciment présente une adhérence inférieure au béton bitumineux.

1.4.2 Adhérence et uni

L'impact de l'adhérence et de l'uni seront traités plus loin mais il est question dans ce chapitre de dégager les notions fondamentales les

concernant.

1.4.3 Adhérence

Dans son document traitant le sujet de l'adhérence des revêtements routiers pour le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement [4], Véronique CERZO définit l'adhérence comme la capacité à mobiliser des forces de contact entre le pneu et la chaussée sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite du véhicule en présence ou non d'eau.

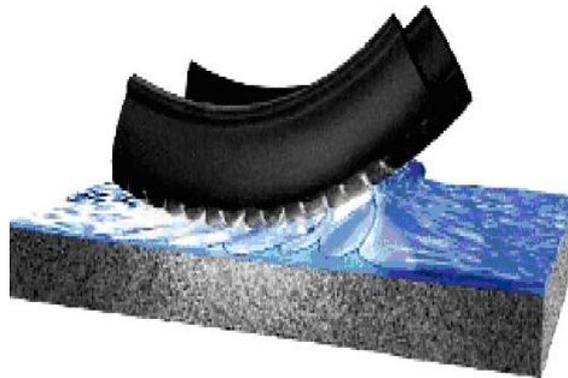


FIGURE 4 – Adhérence pneu-chaussée (source michelin)

L'objectif ici est d'obtenir le freinage le plus court possible et de conserver un pouvoir directeur de l'usager vis-à-vis de la trajectoire. On distingue l'adhérence longitudinale et l'adhérence transversale.

Éléments influençant l'adhérence

La formulation du revêtement : Ce sont les granulats qui vont définir la texture de la chaussée ; ainsi on aura la taille des granulats avec le pourcentage de gravillons qui seront déterminants pour la macro-texture et la nature du concassage ainsi que la dureté définiront la micro-texture.

Le choix des constituants : la nature minéralogique, liée à la résistance au polissage, ainsi que l'angularité des granulats impactera la micro-texture tandis que nature du liant, sera elle déterminante pour le vieillissement.

La mise en œuvre : joue un rôle peu soupçonné mais de grande importance car il en va de la disposition des granulats selon les engins utilisés. C'est par exemple le cas du compactage au cylindre qui aura tendance à coucher les granulats.

La géométrie : elle est influente dans le cas où un faible dévers et des

dégradations de chaussée du type orniérage par exemple peuvent entraîner l'accumulation d'eau ; les pentes et les virages peuvent induire de fortes sollicitations du type cisaillement sous trafic et enfin la méga-texture et l'uni peuvent entraîner un délestage des roues, augmentant ainsi la distance d'arrêt.

Le climat : la route est sujette aux variations saisonnières responsables de lessivage, pluies acides, micro-fragmentations, départs de gravillons, abrasion et des polluants.

Caractérisation de l'adhérence

Le CETE répertorie un certain nombre de méthodes, d'appareils de mesure et d'indicateurs qui sont utilisés pour recueillir des informations et caractériser les niveaux d'adhérence.

Macro-texture : La mesure statique ou méthode volumétrique se compose :

- Des essais à la tâche de bille de verre, informant sur la Profondeur Moyenne de Texture (PMT)
- De la mesure quatre tâches par zone et quatre diamètres par tâche, définissant la PMT par un rapport entre un volume de 25cm^3 et une surface donnée. $\text{PMT}=\text{V}/\text{S}$

La mesure dynamique dite méthode profilométrique, moins empirique, fait appel à une instrumentation (essais RUGO) utilisant un émetteur à source laser envoyant un signal à la surface étudiée, s'en suivront des phénomènes de diffusion et réflexion puis le signal est renvoyé à un potentiomètre optique via une optique de focalisation. On en extrait donc une série d'information dont les plus prépondérantes sont la profondeur Moyenne de Profil (PMP) et la Profondeur de Texture Equivalente (PTE).

Micro-texture :

Ce sont des évaluations indirectes qui se font en mesurant le frottement à une faible vitesse de glissement.

Une mesure statique est assurée par des appareils ponctuels dont le pendule SRT qui assure une mesure de coefficient de frottement longitudinal (CFL) selon un mode de fonctionnement simple décrit dans Les Méthodes d'Essais LPC n° 50 [11] : le pendule portant à son extrémité un patin de caoutchouc normalisé est lâché sans élan d'une position horizontale fixe. Le patin se déplaçant à environ 10Km/h entre par la suite en contact avec la surface de chaussée après rotation d'1/4 de tour ; ils se développent donc des forces de frottement entre le patin et la surface de chaussée au cours de ce glissement. La hauteur de remontée du pendule, fonction de

l'énergie absorbée au frottement est aussitôt mesurée par un dispositif de graduation donnant la valeur du coefficient de frottement.

Des mesures dynamiques par des appareils à grand rendement (AGR) ; Il s'agit :

- Du GRIPTESTER : il effectue une mesure de CFL en continue à une vitesse d'avancement d'environ 30Km/h. L'axe de la roue, équipée d'un système de jauge de contrainte permet de quantifier la réaction du sol sur le pneu suivant ses deux composantes (forces horizontales et verticales) auxquelles est proportionnel le coefficient de frottement mesuré.
- De l'ADHERA : il effectue ses mesures de CFL roue bloquée en continue ou semi-continue sur chaussée mouillée. Les essais sont réalisés à une vitesse allant de 40 à 110Km/h et avec une charge de 250Kg. Un véhicule tracteur arrose le revêtement sur une épaisseur de film d'eau d'1mm.
- Du SCRIM (Sideway force Coefficient Routine Investigation Machine) : mesure de manière simultanée un CFL et un CFT avec une vitesse d'avancement autour de 60Km/h. Il est équipé d'une roue de mesure et prend en compte la réaction transversale pneu-chaussée ainsi que les efforts encaissés. L'acquisition des données se fait à temps réel sur son unité centrale.

1.4.4 Uni

C'est la « somme des écarts de la surface réelle d'une chaussée par rapport au profil de référence défini par le projeteur et dont les dimensions affectent la dynamique du véhicule» [16].

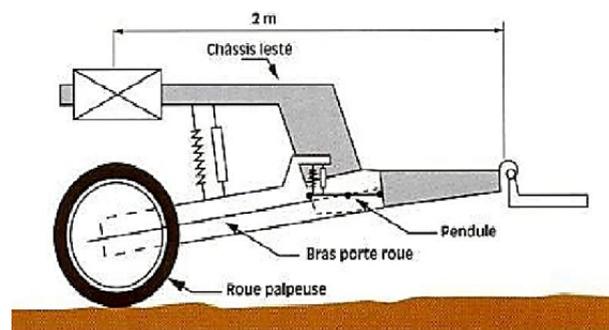


FIGURE 5 – Analyseur de Profil en Long

Tout comme l'adhérence, l'uni a une influence au sur le confort, la sécu-

rité et la consommation des véhicules. On distingue également l'uni transversal et l'uni longitudinal. Sa mesure est l'objet de l'Analyseur de Profil en Long (APL) dont le mode d'exploitation passe par le principe de la NBO (Notation par Bandes d'Ondes).

Analyseur de Profil en Long (source [3]) Le principe de mesure est explicitement décrit par le Centre de Recherches Routières Belge traitant [3] dans un document consacré à la sécurité et la gestion des routes. La roue qui équipe chacune des remorques APL subit des oscillations induites par le relief de la chaussée, ce qui va entraîner une variation de l'angle du bras porte-roue par rapport à son point d'articulation. Un pendule inertiel logé dans le bras porte-roue sert de référence horizontale. L'angle compris entre cette référence et la position du bras porte-roue est mis en mémoire tous les 5, 30 ou 66cm, permettant ainsi l'établissement d'un graphique du pseudo-profil du revêtement. Le fonctionnement se fait à une vitesse d'auscultation de 21.6, 54 ou 72Km/h et les longueurs d'onde enregistrées sont comprises entre 0.3 et 40m.

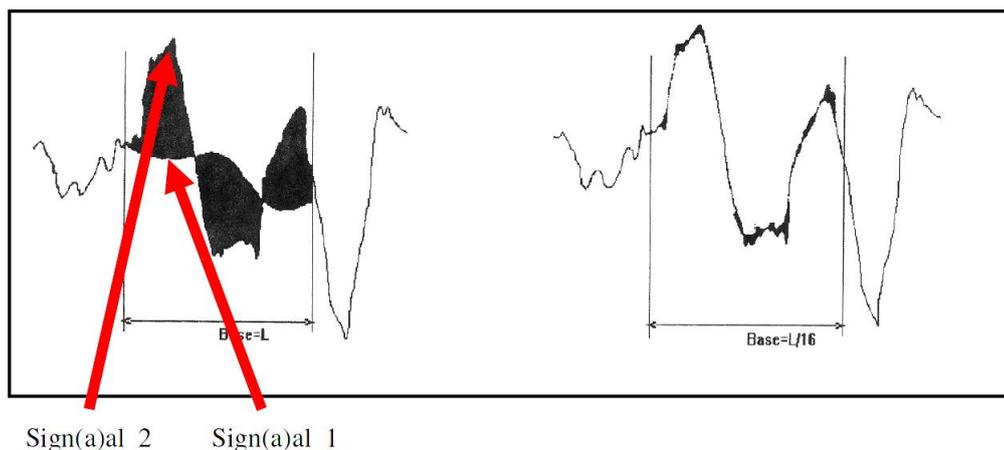


FIGURE 6 – Signaux

Les données sont traitées en appliquant une moyenne glissante (correspondant au premier signal) sur le pseudo-profil (signal 2) et en calculant par la suite la surface comprise entre ces deux courbes. L'aire obtenue en mm^2 par Km parcouru donne une valeur qui sera exprimée en Coefficient de Planéité (CP). La qualité du CP est donc inversement proportionnelle à celle de la route.

1.5 LE TRAFIC

Rappelons que le trafic est l'un des éléments clés et dimensionnant pour l'infrastructure routière. L'expansion des villes s'accompagne d'un accroissement rapide des transports motorisés. La plupart des pays de l'Europe occidentale connaissent des volumes de trafic routier assez similaires. Selon les chiffres du Department of the Environment, Transport and the Regions au Royaume uni, cette moyenne se situe entre 7500 et 8000 Km/an/habitant. Selon l'INRETS, l'allongement des distances et la place croissante de la voiture s'expliquent en grande partie par l'émergence de nouvelles configurations spatiales plus étalée, voire multipolaires. La croissance de cette mobilité urbaine des personnes et du trafic automobile sont à l'origine de problèmes aigus aussi bien sur le plan social (inégalités en terme d'accessibilité), économique (coût des infrastructures) qu'environnementaux. Les résultats de cette étude sont exposés dans la « structure des localisations intra-urbaines et mobilité domicile-travail ». Différents scénarii sont envisagés en Europe, notamment ceux de la France, l'Allemagne, les Pays-Bas et le Royaume Uni. Ils ont fait en 1996 l'objet de la table ronde 110 de la conférence européenne des ministères des transports [7] dont le centre de recherches économiques a publié la synthèse.

1.5.1 Scénario Français

Les premières hypothèses retenues pour estimer la progression moyenne du trafic sur les autoroutes interurbaines européennes de l'Ouest étaient qu'elle serait de 50% en 2011 et 100% en 2026.

	Situation en 1996	Année 2011	Prévisions 2026
Catégorie 1 (3300Km)	< 50000 véh/jr	< 75000 véh/jr	< 100000 véh/jr
Catégorie 2 (5000Km)	50000-80000 véh/j	75000-120000 véh/j	100000-160000 véh/j
Catégorie 3 (300Km)	>80000 véh/jr	>120000 véh/jr	>160000 véh/jr

1.5.2 Scénario Allemand

Le scénario Allemand de développement des transports en Europe part du volume de trafic connu en 1995 et fait une estimation de cette croissance 25 ans plus tôt et 25 ans plus tard (voir tableau 2).

	Vol. trafic 1995	Croiss. 1970-1995	Croiss. 1995-2020
Voitures particulières	3590	125%	50%
Autocars et Autobus	370	50%	30%
Poids lourds	1150	160%	100%

L'évolution du parc automobile est un élément déterminant pour le transport routier qu'il s'agisse des véhicules particulier ou des camions. Cependant le développement de l'infrastructure routière en Europe n'a pas suivi le même rythme selon les conclusions du ministère Allemand des transports, soulignant une réduction de l'espace routier disponible par voiture et par camion dans la majeure partie des pays européen.

1.5.3 L'état du trafic en Chine

Le fort essor économique qu'a connu la Chine et l'urbanisation à grande échelle des villes ont fait du transport une composante cruciale de la vie moderne. Le gouvernement chinois appliquait une régulation stricte sur la possession des véhicules privés mais ces dernières années, l'industrie automobile revêt un intérêt majeur pour l'économie du pays. Une étude sur les besoins énergétique et les émissions des véhicules en chine [23] révèle qu'en 2008, une baisse de 7% a été enregistrée sur la vente des véhicules particuliers du fait de la baisse affichée par l'économie du pays à cette période. Le parc automobile chinois a connu entre 1978 et 2007, une croissance par un facteur de 32, soit de 1,36 millions à 43,58 millions ; Parmi lesquels les véhicules privés ont eux, connu une croissance d'un facteur de 101, soit de 0,29 millions à 28,76 millions de 1985-2007. Les tendances historiques et les perspectives futures établis sur la base d'un modèle économétrique d'estimation sont représentées sur le graphique ci-dessous :

Des investissements massifs ont été fait dans l'optique d'accélérer l'expansion des réseaux de communications et le développement des qualités des routes. La longueur totale des autoroutes est passée de 0,9 à 3,6 millions de km de 1978 à 2007, pendant que les voies express ont augmenté de 0,1 à 53,9 millions entre 1988 et 2007. Comparativement, la croissance des infrastructures routière en Chine reste relativement inférieure à celle de l'Europe ou des Etats-Unis. Mais à l'image de ces deux pays, le trafic croît plus vite que l'infrastructure.

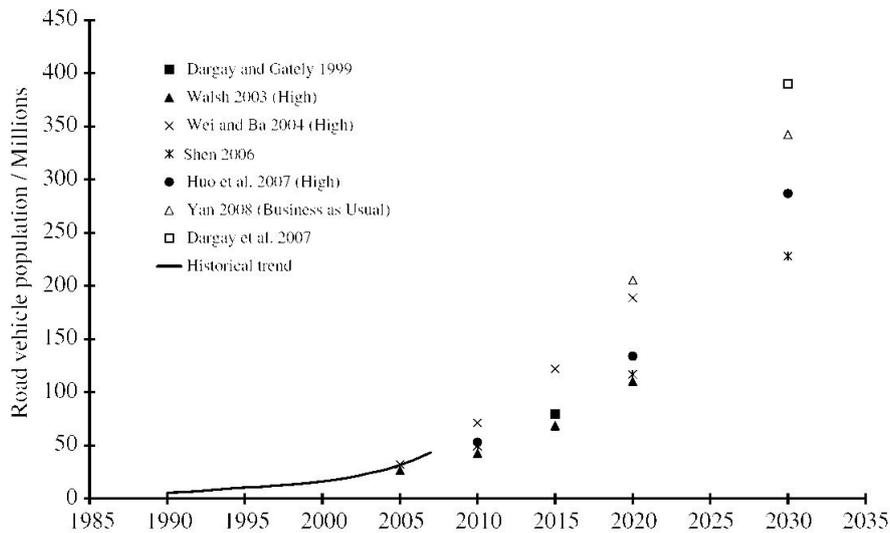


FIGURE 7 – Croissance et prévisions du trafic en Chine

1.6 DYNAMIQUE DU VEHICULE

Le véhicule automobile est assimilé à un système possédant six degrés de libertés. Propulsé dans la plupart des cas par un moteur à combustion interne, il est formé d'un châssis posé sur quatre roues et un habitacle (carrosserie). C'est cette caisse qui va définir ses mouvements de translation et de rotation. L'étudiant comme un modèle physique, on définit trois axes ayant pour origine son centre de gravité :

- Un axe z orthogonal au plan de la route : c'est la translation sur cet axe qui caractérise le déplacement vertical (pompage) et la rotation autour de lui définira le lacet ;
- Un axe x, axe longitudinal du véhicule : la translation suivant x engendre un déplacement longitudinal (avance) et la rotation autour de cet axe génère un roulis ;
- Un axe y, troisième du repère et formant une base orthonormée directe avec les deux autres : le déplacement selon l'axe y définit le ballant et la rotation autour de lui, un tangage.

1.6.1 Dynamique longitudinale

Forces motrices et résistantes

Le déplacement du véhicule passe par une mise en mouvement et donc

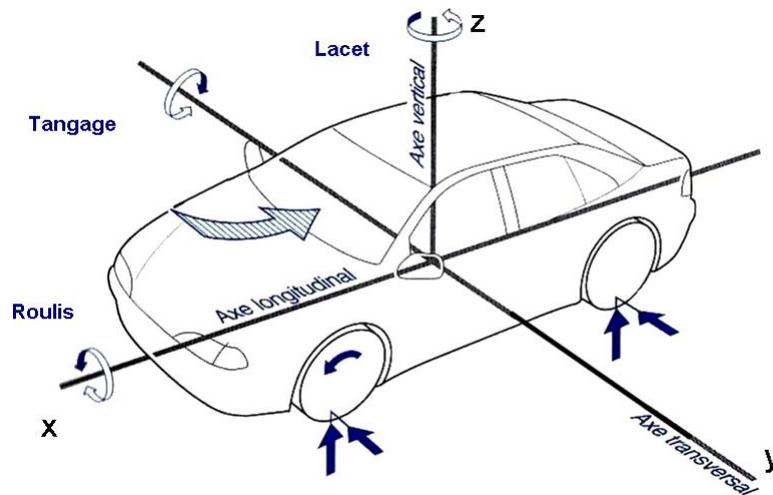


FIGURE 8 – Forces de résistances (source AFISM BT- après vente Automobile)

une force motrice. Celle-ci est engendrée et transmise aux roues par un couple moteur. Plus élevés sont le couple et le rapport de transmission total et faibles sont les pertes de transmissions et plus importante est la force motrice. Le véhicule est également soumis à des forces résistantes qui s'opposent à son mouvement et cette résistance peut avoir diverses origines :

- Roulement en ligne droite : Le contact entre la pneumatique du véhicule et la chaussée crée des déformations qui engendrent une force s'opposant à son mouvement. Cette force se calcule par la formule :

$$F_{roul} = \eta_{roul} \cdot P$$
Avec : $P = m \cdot g$: poids du véhicule et η_{roul} : coefficient de résistance au roulement.
Le coefficient de résistance au roulement est fonction du rayon des roues (inversement proportionnel), de la surface de contact pneu-sol (proportionnel) mais aussi de l'inertie et la vitesse du véhicule. Une approximation du coefficient de résistance au roulement est donnée par la relation : $\eta_{roul} = 0.01 + 10^{-5} \cdot v^2$
- Résistance aérodynamique : c'est la traînée ou résistance à la pénétration dans l'air. Cette force s'écrit : $F_{air} = 1/2 \cdot C_x \cdot S \cdot \rho \cdot (v_{nu} - v_{air})^2$
Avec : C_x : coefficient aérodynamique de pénétration dans l'air ;
 S : surface frontale projetée du véhicule ; ρ : masse volumique de l'air ambiant ; v_{nu} : vitesse du véhicule par rapport au sol ; v_{air} : vitesse

de l'air par rapport au sol.

- Résistance en pente : On parle en réalité de rampe ici car le mouvement d'un véhicule sur une pente réelle est un mouvement moteur dont la force s'ajoute à la force motrice. On adoptera cependant le terme courant « pente » pour décrire une déclivité ascendante. Il se crée un angle d'inclinaison de la pente par rapport au sol divisant la force due à la pesanteur en deux dont la composante parallèle à la trajectoire définira la force de résistance. $F_{pente} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$

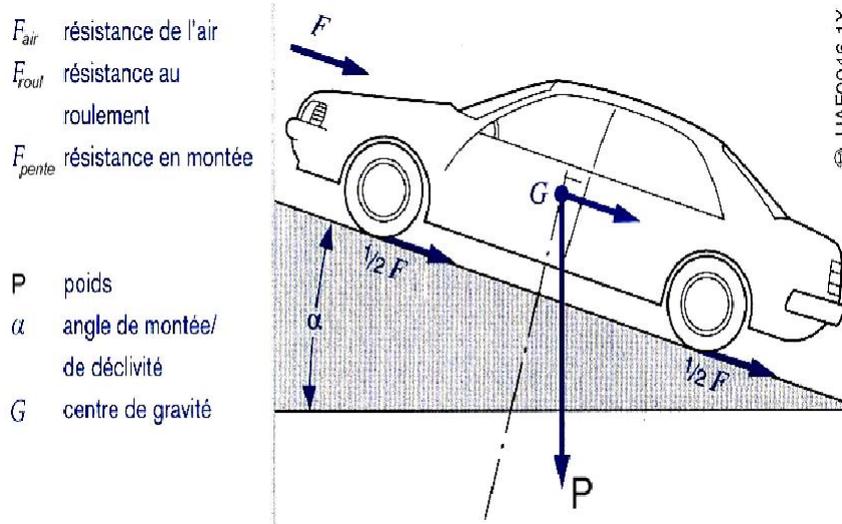


FIGURE 9 – Forces de résistances en pente (source AFSM BT- après vente Automobile)

Notion de distance d'arrêt

La conception des routes s'accompagne aussi bien de notions concrètes que d'éléments abstraits issus de la physiologie de l'utilisateur. C'est pourtant là un paramètre clés définissant l'interaction liant le conducteur, le véhicule et la route. Au sens mécanique du terme il faut prendre en compte l'énergie cinétique ($E_c = 1/2 \cdot mv^2$) qui anime un véhicule en mouvement. Et cette distance dépendra donc de la masse, de l'effort de freinage et de la vitesse du véhicule [1]. Le guide du SETRA [8] définit la distance d'arrêt comme la distance conventionnelle théorique nécessaire à un véhicule pour s'arrêter compte tenu de la vitesse pratiquée. Elle fait appel aux notions distance de freinage et de distance de perception-réaction. Le temps de perception-réaction se situe entre 2 et 2,5 secondes, quoiqu'elle soit dans les détails fonction de la vitesse et la distance d'arrêt est elle, fonction de deux paramètres extérieurs à savoir le coefficient de frottement longitudinal et la déclivité du profil en long de la route : $Df = v^2/2g(cfl \pm p)$

La distance d'arrêt nous intéresse particulièrement dans le cadre de notre étude du fait que l'introduction des virages, giratoire et des carrefours impliquent une prise en compte de la modification du régime du véhicule sous l'influence de l'utilisateur et il sera donc à déterminer (entre autres) dans quelle mesure cela affecte la consommation en énergie.

1.6.2 Dynamique transversale

Les pneus du véhicule subissent un certain nombre de forces transversales qui sont responsables d'une modification de la trajectoire que se fixe le conducteur. Résistance au roulement : il se développe lors d'un virage une résistance en courbe qui est fonction de la vitesse, du rayon de virage, des propriétés d'essieu et des caractéristiques pneumatiques.

- Résistance au vent latéral : Cette force agit localement au centre de pression du véhicule, soit sur la moitié avant généralement. L'effort transversal va engendrer autour du centre de gravité du véhicule un moment de lacet ;
- Les forces directionnelles : elles sont issues de l'effet de la direction sur les rotules de direction ;
- La force centrifuge : qui tend à éloigner le véhicule du centre de rotation de sa trajectoire de virage. Elle est donc orientée vers l'extérieur du virage et la conception des routes introduit un dévers au profil en travers qui permet de réduire le rayon de courbure du virage pour lequel l'équilibre dynamique est atteint, comme le décrit [1]. Cette force s'écrit : $F_c = m \cdot \gamma_t$ ou $F_c = m \cdot v^2 / r$

Avec m : masse du véhicule ; r : rayon du virage ; γ_t : accélération transversale.

Comportement en virage

Lorsque l'utilisateur veut orienter son véhicule, il donne un angle de braquage qui commence par être un angle de dérive pour les roues directrices. Il en résulte une force transversale et un moment par rapport au centre de gravité ; la voiture commence à tourner. On remarque que le véhicule ne prend pas immédiatement la valeur de braquage choisie, mais obéit au commandement de la direction avec un certain retard. La rapidité de réponse est un point important pour la sécurité : les facteurs qui ont le plus d'influence sur elle sont la rigidité à la dérive du pneu et le moment d'inertie par rapport à l'axe vertical passant par le centre de gravité. La voiture sera d'autant plus rapide à répondre que les pneumatiques seront plus rigides et que le moment d'inertie sera plus petit. La rapidité de réponse aug-

mente également avec l'empattement. L'un des avantages des voitures à moteur central est précisément d'avoir une faible valeur du moment d'inertie par rapport à l'axe vertical. Les études que présente Michel Martin en [13] mettent cela en évidence par l'étude de l'angle de lacet du véhicule qui renseigne sur sa qualité de guidage.

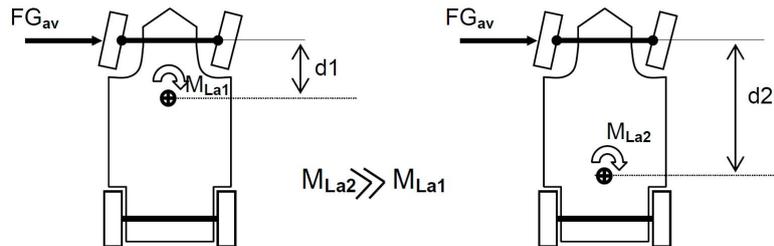


FIGURE 10 – Un CDG centré arrière améliore grandement la vivacité du véhicule en entrée de virage alors que la configuration habituelle des véhicules modernes le rend beaucoup plus "paresseux" en entrée de virage (source [13])

En somme le véhicule est soumis à une force centrifuge - donc transversale - qui doit être équilibrée par des forces transversales d'adhérence. Un pneumatique fournissant un effort transversal subit une déformation qui modifie sa trajectoire d'un angle de dérive. C'est l'angle entre la tangente à la trajectoire et le plan de roue qui émane du sur-braquage nécessaire pour placer le véhicule sur la trajectoire réelle (désirée par le conducteur). Celui-ci est d'autant plus petit que le pneumatique a une plus forte rigidité transversale et que la force verticale est plus grande. On mobilise en général selon [1], jusqu'à 5° d'angle de dérive en ville mais guère plus de 2° sur route.

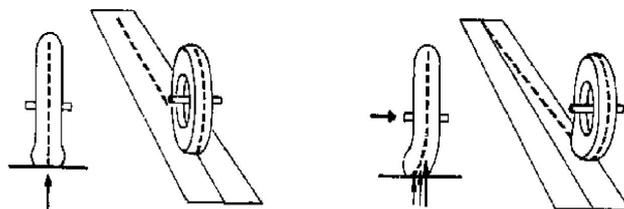


FIGURE 11 – Angle et effort de dérive

Si l'on augmente la pression des pneumatiques, ou encore la charge, la dérive diminue. De l'angle de dérive dépend le comportement caracté-

ristique de la voiture. Il peut être sous-vireur, sur-viveur ou encore neutre (dérive nulle). L'angle de braquage nécessaire pour suivre un virage circulaire de rayon donné varie d'une voiture à l'autre et, pour une même voiture, il dépend de la vitesse.

1.6.3 principe de fonctionnement d'un moteur thermique

Le principe de fonctionnement d'un moteur thermique de véhicule est la transformation d'une énergie chimique (air + carburant) en énergie mécanique (mouvement de rotation).

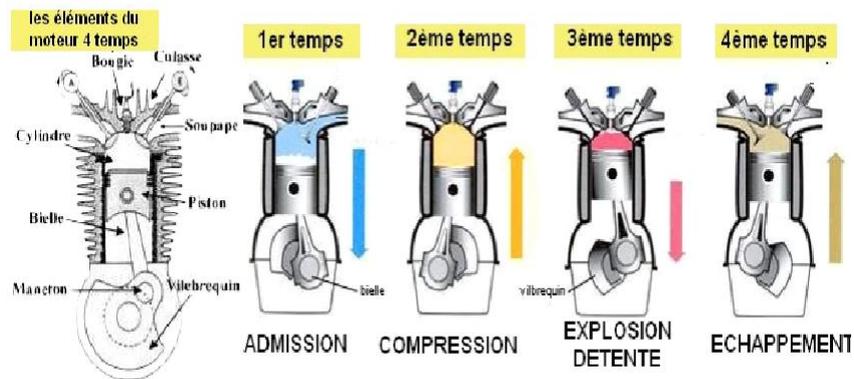


FIGURE 12 – Fonctionnement d'un moteur 4 temps

Un piston se trouvant à une extrémité dans un cylindre fermé vient comprimer le mélange air/carburant entrant dans la chambre à combustion par le biais d'un conduit d'admission. Une explosion se fait alors lorsque le piston se trouve à hauteur de la bougie qui produit une étincelle qui va enflammer le mélange, propulsant le piston vers le bas. La fumée qui résultera de l'explosion sera par la suite évacuée par la soupape d'échappement pour éviter son accumulation.

1.7 PROBLEMATIQUE DES ENERGIES FOSSILES

Le CO₂ contribue pour 70% à l'effet de serre et cela est principalement dû à l'augmentation des mobilités individuelles et du trafic des marchan-

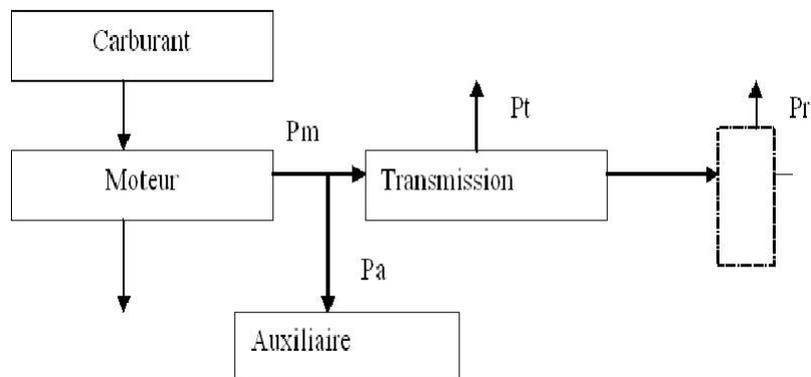


FIGURE 13 – Organigramme des besoins en puissance ; (Pm : Puissance arbre moteur Pr : puissance fournie à la roue Pa : puissance absorbée par les auxiliaires Pt : Puissance pertes transmission)

dises. Les émissions de CO_2 dont les transports détiennent 21% des parts sont corrélées avec la consommation des énergies fossiles comme le démontre [18]. Le secteur des transports, de part ses importantes émissions de gaz à effet de serre, représente l'un des principaux concernés par la question du changement climatique.

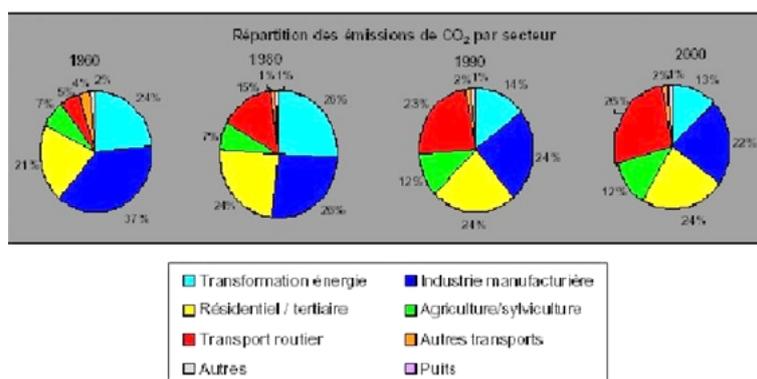


FIGURE 14 – Répartitions des émissions de CO_2 en France (source CI-TEPA)

Etat des ressources énergétiques et pic pétrolier L'étude [5] montre que pendant 60 ans, la moyenne des estimations des réserves ultimes d'hydrocarbure est restée stable, autour de 2000 Gigabarils (Gb) ; elle se

situé aujourd'hui entre 2500 et 3000 Gb. Cependant, il est difficile de comparer les interprétations des chiffres. En ce qui est des réserves prouvées, elles se situent à 1653 Gb en 2012 selon BP, une hausse de 20% par rapport à l'année précédente. La seconde guerre mondiale a marqué l'entrée dans l'ère du pétrole et la consommation a augmenté de façon exponentielle, jusqu'aux chocs pétroliers. Depuis le début des années 1970, l'OPEP parvenait à réguler l'offre et la demande et à imposer ses prix. Depuis 2005, seulement 33 pays produisent plus qu'ils ne consomment et tous les autres sont donc importateurs. Malgré le fait que les prix soient élevés, cela ne suffit plus pour augmenter la production et répondre à une demande qui ne cesse de croître.

Le terme peak oil est issu d'une modélisation mathématique qui doit son nom à l'ingénieur géophysicien Marion King Hubbert, qui a fait le constat que l'évolution des découvertes de gisements suit une courbe en cloche, partant de zéro, atteignant un maximum (pic) puis retombant à zéro.

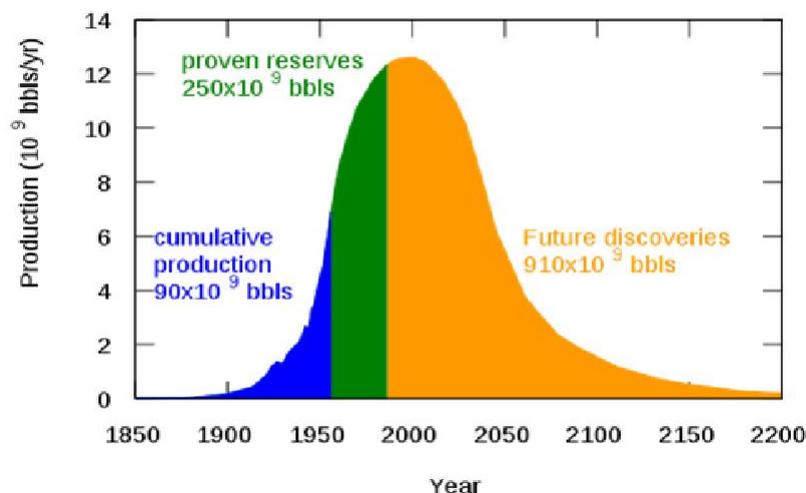


FIGURE 15 – Modélisation de Hubbert appliquée à la production pétrolière américaine ([9])

1.7.1 Energies renouvelables et perspectives des nouveaux modes de mobilités

Le secteur des transports routiers étant majoritaire en termes d'émissions de CO_2 , c'est là le chantier sur lequel il faut étendre le champ des possibilités d'une transition énergétique. En effet de nombreuses avan-

cées ont été faites dans ce sens mais les énergies fossiles n'ayant pas d'équivalent en termes d'efficacité restent très difficiles à remplacer. On s'oriente donc une transition progressive vers des énergies alternatives. Il faudra donc agir sur tous les bras de levier disponible ; des technologies du véhicule aux habitudes des usagers.

Objectifs

Les moteurs thermiques alimentés par des carburants hydrocarbonés occupent une position prédominante dans le domaine des transports routiers et cela devrait vraisemblablement perdurer selon [21]. En utilisation en milieu urbain, le rendement des moteurs thermique est d'environ 20% ; sollicités tantôt à forte charge, tantôt à faible charge. L'objectif fixé par les constructeurs est d'aujourd'hui de trouver des solutions pérennes sans toutefois affecter la sécurité ni le confort. La consommation des véhicules étant directement reliée à la puissance ; dans ce contexte la stratégie envisagée est donc de réduire la puissance demandée. Cela est possible en :

- Réduisant les frottements des pneumatiques
- Améliorant l'aérodynamique des véhicules
- Réduisant la masse des véhicules.

Les carburants et technologies de remplacement

Un certain nombre de technologies et de carburants sont disponibles et peuvent prétendre remplacer les carburants fossiles. Nous répertorions sommairement les principaux d'entre eux :

- L'éthanol : carburant renouvelable extrait du matériel végétal absorbant du CO₂ durant sa croissance. Présente l'avantage de réduire la production de gaz à effet de serre.
- Biodiesel : carburant tiré de ressources animales ou végétales. Son mélange avec du diesel peut réduire les émissions de GES.
- Electricité : utilisée comme carburant dans les véhicules électriques à batterie, hybride et hybride rechargeable.

2 Partie B : ETUDE DES PARAMETRES D'INFLUENCE

2.1 Méthodes d'évaluation des consommations [19]

Ils existent trois types de modélisation pour l'évaluation de la consommation unitaire de carburant :

1. Méthode d'évaluation directe Elle peut se faire par mesure directe à bord d'un véhicule en conditions réelles de circulation à l'aide d'un débitmètre volumétrique. Cependant le nombre élevé de paramètres de dispersion l'ont rendu trop onéreux et long à réaliser.
2. La méthode « banc à rouleau », prend en compte les conditions de fonctionnement du véhicule en circulation réelle ou en cycles normalisés. La reproduction d'un banc véhicule entraîne un suivi de cycle à $V(t)$ imposée. La méthode permet également un calcul de la consommation totale par rapport à l'émission de polluants sur tout le cycle pour l'établissement d'un bilan massique carbone.
$$Conso = (12 + r) \cdot (CO_2/44 + CO/28 + HC/16 + partic/12)$$
3. La méthode « banc moteur » + simulation établit des cartographies du moteur vis-à-vis de la consommation et des émissions ; un code de calcul pour une simulation du véhicule pour établir la consommation instantanée en fonction du couple C et la vitesse de rotation N en suivi de cycle $V(t)$. La méthode fait par la suite une sommation des consommations instantanées sur le cycle.

2.1.1 Modèles de consommation

On y distingue trois principaux types de modèles de consommation :

Modèles empiriques : exemple COPERT 3

- Mesures des émissions de polluants sur banc à rouleau
- Modélisation empirique des émissions de polluants= $f(V + \text{facteurs de correction (pente, charge, température, départ à froid, ...)})$
- Calcul de consommation par méthode du bilan carbone
 $CO_2(g/km) = 264 + 0,0103V^2 + 2049/V + 49,8 \text{Log}V$ Pour : Véhicule léger essence, 1.4 - 2.0 litres, moteur chaud, $V = 10$ à 130 km/h

Modèles intégrés : circulation sur les investissements routiers, direction des Routes, 1986 : Consiste à caler les relations entre la consommation et les paramètres de circulation du trafic et d'infrastructure à partir de valeurs mesurées directement sur route et sur piste d'essai ou de simulations sur ordinateur. Expression analytique : $C = a \cdot (V/100)^2 + b + k \cdot p$

Résultats :

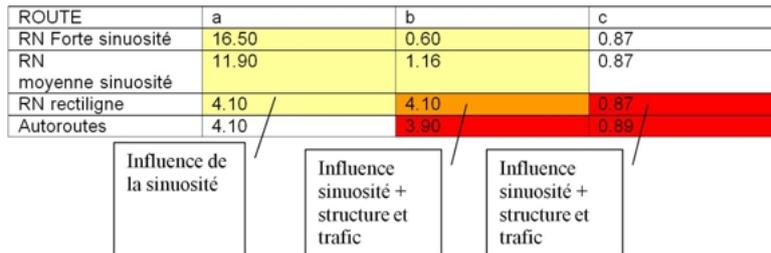


FIGURE 16 – Consommation de carburant (l/100) des VP en rase campagne par modèle intégré

Modèles de consommation instantanée : l'objectif est de calculer la consommation de carburant et l'émission de CO₂ et autres polluants dans toutes les situations concernées. Elle est mise en œuvre par simulation informatique en prenant en compte les caractéristiques techniques, la carte de consommation et d'émissions, les cycles de fonctionnement. On obtient au final une consommation de carburant et émissions de polluants instantanées.

2.1.2 Effet des pentes

Mesures effectuées sur route et en ville pour des pentes comprises entre -4% et +4% à vitesse quasi-stabilisée. Le véhicule est une voiture essence. Trois mesures de consommation (l/100km) en ordonnées [C1 (en pied de pente), C0 (en milieu de pente, origine du repère) et C (au sommet de la pente)] auxquelles correspondent trois abscisses de pente P1, 0 et P2. Les résultats obtenus de sur les trois points de mesure sont :

$C=C1$

$C=C0 + 0,9P$

$C=C0 + 1,8(P-Pa)$ Pa : puissance absorbée par les auxiliaires

Mesures sur un poids lourd

Exemple de mesures de consommations à vitesses stabilisées maximales

Véhicule	Vitesses (km/h)	Pentes (%)	Conso (l/100)
PL 38t	106	0	51
	27	6	210

Véhicule	Vitesses (km/h)	Pentes (%)	Conso (l/100)
PL 6t	98	0	25
	52	6	41

2.1.3 Effet des virages relevés

La surconsommation de carburant due à l'effet de la sinuosité est fonction de la vitesse (v), du nombre de virage (n) et du rayon de virage (R).

Dévers

Matérialisation d'un cas de dévers pour un modèle de surconsommation à vitesse stabilisée :

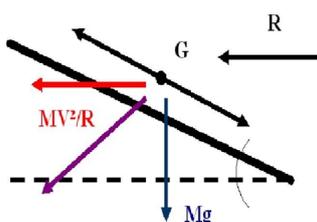


FIGURE 17 – Bilan des forces en dévers

$$\gamma_E = (V^2/Rg \cdot \cos\phi - \sin\phi) \cdot g \text{ Surconsommation : } \Delta C = 5M\gamma_E/g$$

Exemple : Pour une masse $M=1t$, un rayon $R= 200m$ et une vitesse $V=80km/h$
On obtient pour deux cas de dévers différents :

Dévers (°)	Surconsommation ($cm^3/100m$)
0	1.25
5	0.80

Les différences de consommation ne sont pas négligeables et cela souligne l'intérêt du dévers. Cela représenterait par exemple sur une autoroute un gain d'économie d'environ 6000 litres par an pour une estimation faite sur des mêmes valeurs de dévers avec un rayon de 1000m, sur un développé linéaire de 200m, 20 000 véhicules/jours à 120km/h.

Virage

Exemple d'un essai réalisé en poids lourd de 38 tonnes sur plusieurs parcours avec différents nombre de virages au km, différents rayon et en tenant compte de la vitesse. Notons que les routes sont horizontales (pente nulle).

Route	Nbre virage - Rayon	Vitesse (km/h)	Conso (l/100)
Rectiligne	0 – 0m	80	36
Sinueuse	5 – 20m	45	80

Une courbe regroupant l'ensemble des résultats met en évidence l'influence des virages sur la consommation d'énergie des véhicules.

2.2 Méthode d'évaluation par modèle de simulation [17]

Le modèle de simulation SIVA permet de calculer les conditions instantanées de fonctionnement moyennant des données cartographiques, en tenant compte des caractéristiques du véhicule et des conditions du parcours effectué (pentes, courbes, vitesses limites, arrêts). Les émissions de polluants et la consommation sont évaluées pour trois types de véhicules utilitaires différents :

- Petit véhicule de 3,5t
- Camion de 19t
- Tracteur semi-remorque de 40t

Les simulations faites sont celles

- D'une autoroute : 65km
- Une route nationale : 93km

Les valeurs de pentes vont de -4% à +6%

Le modèle simule l'action du conducteur en fonction des caractéristiques de l'environnement. Les variables calculées instantanément sont :

- La position du véhicule sur le parcours
- La vitesse et l'accélération
- Le rapport de boîte de vitesse engagé
- Le couple et la vitesse de rotation du moteur
- La consommation de carburant et les émissions de polluants

Nous ne résumerons que les valeurs liées à la vitesse, la charge du véhicule et la consommation. Les pentes sont modérées et ne dépassent pas 3 à 4%. 60 à 70% de la distance est en pente comprise entre -1% et +1%. Les positions d'arrêts (stop, feux, péage) sont relevées ainsi que les vitesses maximales réglementaires.

Caractéristiques des véhicules simulés

Véhicule	Nbre de rapports boîte de vitesse	Pds à vide/Pds total (kg)	Vmax sur plat (vide/chargé) km/h
Fourgon 3,5t	5	1800	126
		3500	122
Camion 19t	9	12000	119
		19000	114
Tracteur 40t	18	13500	123
		40000	100

Résultats des consommations sur route

Véhicule	Charge	Vitesse (km/h)	Conso (l/100)
Fourgon 3,5t	Vide	76,5	9.1
	Pleine charge	74,2	10.8
Fourgon 3,5t	Vide	68,9	23.4
	Pleine charge	66,8	28.2
Fourgon 3,5t	Vide	69,2	25.1
	Pleine charge	62,2	43.6

Résultats des consommations sur autoroute

Véhicule	Charge	Vitesse (km/h)	Conso (l/100)
Fourgon 3,5t	Vide	123.7	16.4
	Pleine charge	117.7	17.0
Fourgon 3,5t	Vide	88.4	25.7
	Pleine charge	84.7	29.5
Fourgon 3,5t	Vide	88.0	27.0
	Pleine charge	75.6	42.1

L'influence de la pente sur la consommation est d'autant plus importante que le véhicule est lourd : dans le cas du fourgon, la vitesse a une influence presque aussi sensible que celle de la pente alors que dans le cas du camion et du tracteur, la pente à un effet prépondérant. La consommation de carburant passe par une valeur minimum en fonction de la vitesse. Ses variations en fonction de la pente sont très sensibles au poids du véhicule. La consommation du tracteur et du camion (lui à 80km/h) sont nulles pour les pentes de -2% alors que celle du fourgon ne s'annule qu'à partir de -6%.

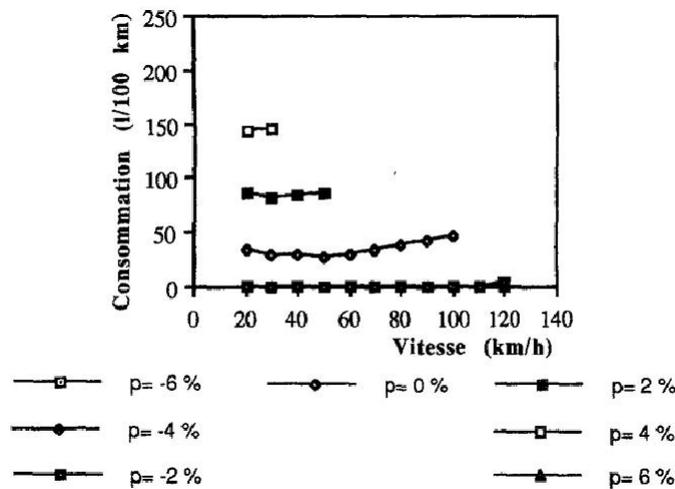


FIGURE 18 – Consommation de carburant en fonction de différents cas de pente-Tracteur 40t

2.3 Etude paramétrique de consommation [20]

Une étude de cas paramétrique de la consommation d'énergie des véhicules a été menée sur deux routes concurrentes interurbaines de banlieues au Royaume Uni. Ces voies relient les villes de Bristol et de Bath : la première est rapide et plate tandis que la seconde est relativement escarpée avec nombre de restrictions de vitesse. Elles sont nommées UBR (Upper Bristol Road) et LBR (Lower Bristol Road). Les deux parcours ont un flux de trafic élevé. Le but est d'analyser un certain nombre de paramètres et d'en déduire le plus prépondérant. Le modèle utilisé peut être résumé par l'équation ci-dessous :

$$U_{tot} = U_r + U_a + U_i + U_g + U_c$$

$$= \mu_r \cdot mg \cdot \cos \beta \cdot d_r + 0,5 \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot U_r^2 \cdot d_a + d_i \cdot C_i \cdot m \cdot d_u/d_t + mg \sin \beta d_g + (m^2 \cdot U_v^4 / R^2 \cdot C_{av}) \cdot d_c$$

U_{tot} :consommation totale d'énergie ; U_r :contribution de la distance de roulement ; U_a :contribution de la traînée aérodynamique ; U_i :contribution de l'accélération inertielle ; U_g :contribution des pertes gravitationnelles ; U_c :contribution des pertes de virage ;

d_r, d_a, d_i, d_g, d_c sont les distances parcourues pour ces forces respectives ; C_d : coefficient de résistance de traînée ; U_r : vitesse relative du véhicule (prenant en compte l'effet du vent) ; C_i : facteur de correction de la masse ; C_{α} : rigidité total de virage ; U_v : vitesse du véhicule.

Seuls 18km séparent les deux villes et les points principaux (départ et arrivée) ont été choisis comme étant aux centres-villes et proche des arrêts de voies ferrées. Des données géographiques sont intégrées ; distance, profile, exposition au vent, nombre et caractéristique des virages. L'UBR et le LBR ont des chaussées simples excepté 4km de chaussée double pour le LBR. L'UBR est légèrement plus longue en terme de distance, plus accidentée (relief) et moins exposée au vent. Sont également répertoriés les ronds-points, feux de carrefour, limitations de vitesse et jonctions ; soit 46 sur LBR et 47 sur UBR.

Résultats Les résultats montrent que la consommation totale d'énergie dans les deux cas varie presque proportionnellement avec la masse du véhicule. Cela est dû au fait que les paramètres affectant la consommation sont plus ou moins influencés par la masse du véhicule. Approximativement 80% des pertes d'énergie sont directement liées à la masse du véhicule (U_r, U_i, U_g, U_c) et 20% sont indirectement liés à la masse du véhicule (U_a). Les résultats révèlent également que les conditions de la route (pentes, virages, variations de vitesse, control de trafic) ont un impact significatif sur la consommation des véhicules. Au final UBR a une consommation d'énergie plus élevée du fait de ses configurations et sa sinuosité, ses pertes gravitationnelles et sa résistance au roulement. LBR est beaucoup impacté du point de vue de la résistance aérodynamique et affiche un rendement moindre en termes de consommation par unité de distance.

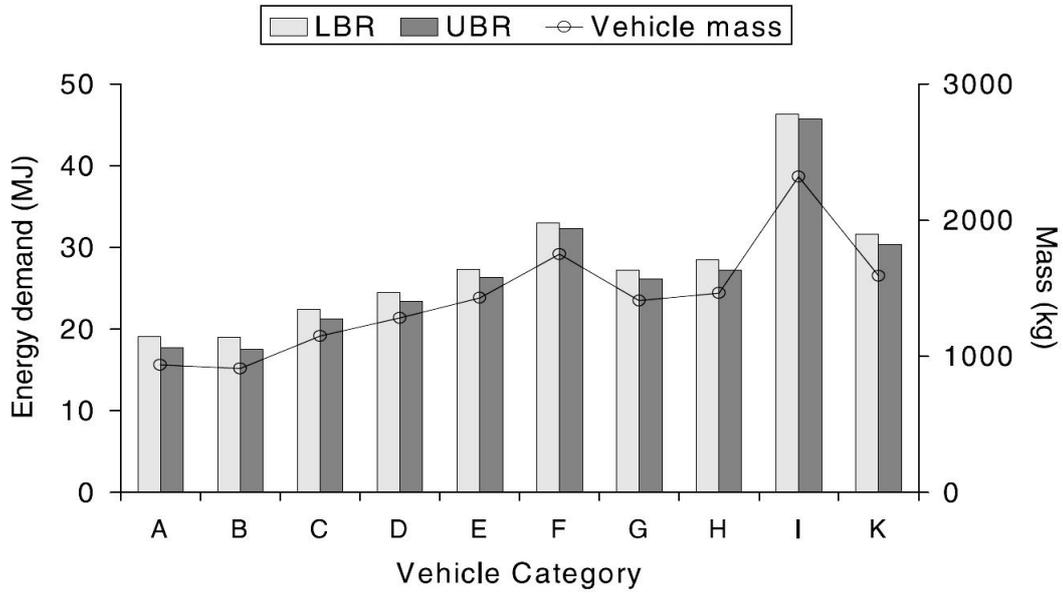


FIGURE 19 – Consommation d'énergie (hors vent et trafic) par catégorie de véhicule

Parameters															
U_{tot}	Car					Route								Human	
	η_{eng}	m	A_f	C_d	C_v	e_w	n_i	μ_r	R	β	v_v	v_w	θ	a	Driver
U_f	•	•					•	•		•					•
$U_{2(windless)}$	•		•	•							•				•
$U_{2(wind)}$	•		•	•		•					•	•	•		•
U_i	•	•									•			•	•
U_g	•	•							•						
U_c	•	•			•				•		•	•	•	•	•

FIGURE 20 – Influence des paramètres

2.4 Rapport temps de parcours-consommation en situations de pentes [12]

L'étude part d'une comparaison d'efficacité entre les conseils d'éco-conduite du constructeur et une optimisation établie en simulant plusieurs scénarii de conduite entre deux arrêts sur un trajet en pente. Les conseils d'éco-conduite préconisée par le constructeur pour gérer les situations de montée et de descente sont : Garder sa vitesse en descente → Ralentir en montée et se stabiliser si possible à une vitesse supérieure à 40 km/h → Profiter des descentes pour lever le pied.

Mode opératoire :

Le premier scénario consiste à franchir une montée sur 200m avec une pente de 5%. L'attitude adoptée par le conducteur consiste à augmenter la vitesse jusqu'à la moitié de la montée et puis ralentir par un faible couple ou par le frein moteur pendant la dernière moitié. Le frein moteur est ensuite utilisé jusqu'à l'arrêt. Les consignes d'éco-conduite ne sont appliquées qu'à la moitié de la côte quand le véhicule a atteint une vitesse suffisamment élevée pour décélérer doucement pendant le reste du trajet.

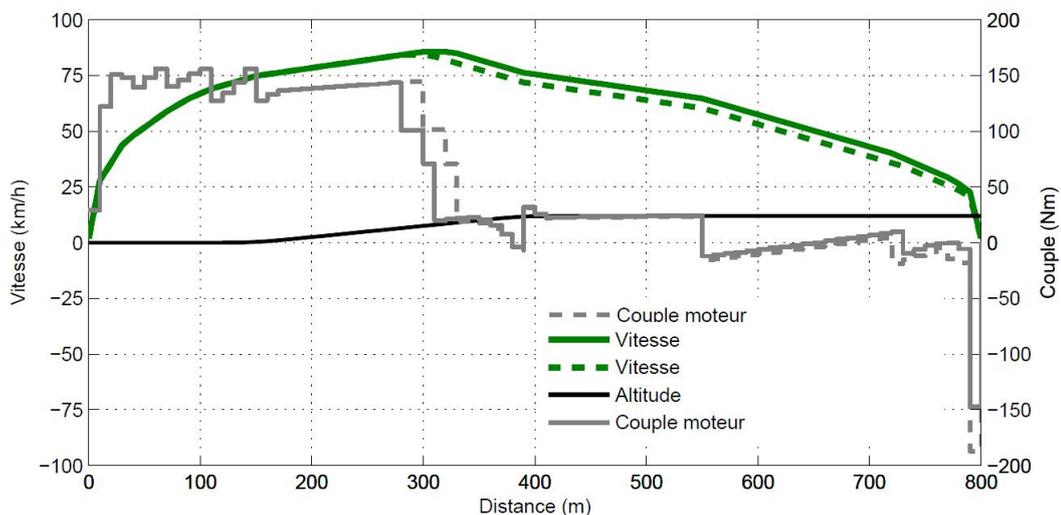


FIGURE 21 – Phase ascendante

La situation inverse est appliquée ; on aborde une pente de -5

Résultats

Le tableau ci-dessous permet de quantifier clairement l'influence des des-

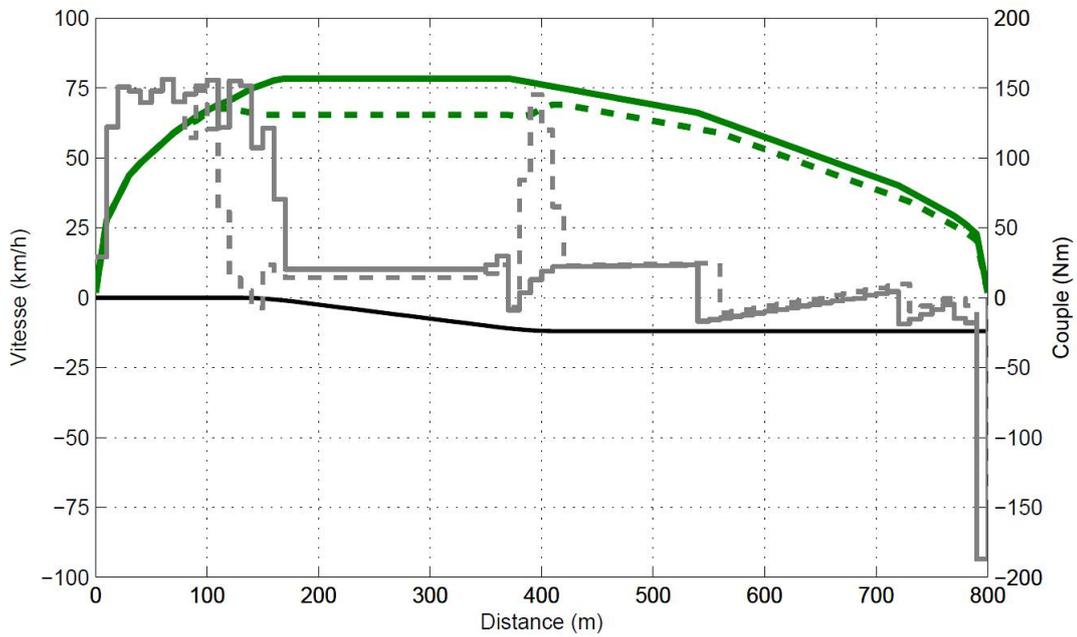


FIGURE 22 – Phase descendante

centes et des montées sur la consommation d'énergie des véhicules :

Route	Temps(s)	Consommation (ml)
plane	53.6	60.1
	57.5	57.8
Avec montée de 5%	53.2	72.0
	56.3	70.0
Avec descente de -5%	53.5	47.9
	58.0	44.2

On consomme beaucoup plus en montée qu'en descente. Le fait d'aborder une pente avec des variations de vitesse peut s'avérer économique en termes de consommation de carburant mais en contrepartie on aura un temps de trajet plus élevé.

2.5 Influence d'un point d'arrêt du type péage routier [15]

L'étude est basée sur l'évaluation de l'influence des systèmes de péage sur la consommation d'énergie et les émissions en dioxyde de carbone par l'étude de cas d'une autoroute espagnole reliant Toledo et Madrid. L'étude a été menée relativement aux paramètres du véhicule et des conditions de trafic. Le modèle mécanique choisi est celui largement utilisé dans les études de recherches liées au transport, notamment repris par R.C Burgess et J.M.J Choi [17], prenant en compte la résistance au roulement, la résistance à la traînée aérodynamique, l'inertie et les pertes gravitationnelles. L'infrastructure est une route longue de 52.3 km avec un trafic relativement faible. La route est plate et rapide, sans courbes significantes ni restrictions de vitesse. Le péage se situe au PK14.3. Le modèle prend en compte le type de véhicule (i), et la technologie du moteur (j). La consommation totale est exprimée en mégajoules par véhicule-kilomètre (MJ/veh-km).

$$U_{tot} = U_r + U_a + U_i + U_g + U_c$$

$$= L^{-1}[P \sin \theta d_g + C_i M_{fr} a d_i + C_r \cos \theta d_r + 0.5 \rho A_f C_d U_r^2 d_a + (m^2 U_v^4 / R^2 C_{av}) d_c] \eta_{motor} e_v$$

L : longueur de tronçon parcourue P : poids du véhicule θ : variation de pente (gradient de la route) η_{motor} : rendement du moteur e_v : exposition au vent M_{fr} : masse rotationnelle du véhicule

Trois scénarii sont étudiés selon le type de péage mais nous ne tiendrons compte que des résultats de l'hypothèse B avec un péage traditionnel à 3 minutes d'arrêt et trois étapes de procédure : décélération (2.0 m/s²) – arrêt – accélération (2.5 m/s²).

Résultats

La consommation d'énergie est très sensible à la pente. Une augmentation de pente de 10% entraîne une variation de consommation de 21.56MJ/veh-km à 29.18 MJ/veh-km, soit une augmentation de 35%. L'auteur tire la conclusion que la topographie, la construction et l'économie sont trois paramètres qui doivent être inséparables pour la conception d'une route, qui parfois impose le choix d'une pente abrupte inévitable.

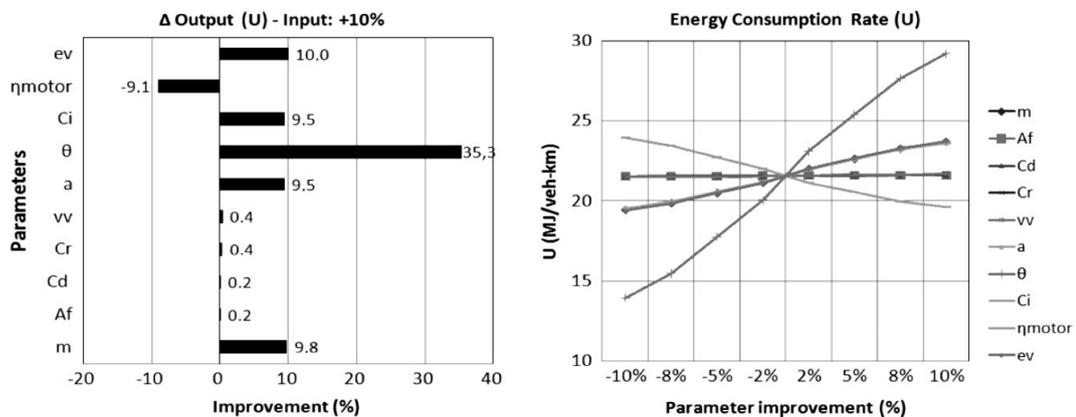


FIGURE 23 – Résultats des analyses de sensibilité des paramètres de calcul

2.6 Modèle numérique ; Estimation par paliers de vitesse : [10]

Le P.E.R.E (Physical Emissions Rate Estimator) est un exemple des méthodes utilisées dans la modélisation des consommations d'énergie et émissions. Elles se basent sur des modes estimations physique et empiriques. Le PERE utilise les paramètres du véhicule et les positions instantanées du véhicule en entrée pour une évaluation de la consommation instantanée. Un exemple d'expérimentation empirique : le MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) utilisé par l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) pour estimer la consommation d'énergie des véhicules. Les deux modèles cités sont complémentaire dans le sens où le PERE peut être utilisé pour fournir des informations manquantes au MOVES qui utilise plutôt des dynamomètres en laboratoire ou des informations issues du PEMS (Portable Emissions Measurement System). La relation entre la consommation d'énergie des véhicules et les paramètres de conduite permettent d'avoir un aperçu de l'effet de différents niveaux de vitesse de croisière et d'accélération sur la consommation. Une méthode d'estimation empirique basée sur le VSP (Vehicle Specific Power) a été mise au point et peut être utilisée une fois que les paramètres de conduite sont connus. Le PEMS utilise trois principaux systèmes qui renseignent sur les paramètres de conduite, la consommation et les émissions instantanées du tuyau d'échappement. 10 véhicules représentatifs des voitures à essence utilisés en Chine sont testés à trois périodes de la journée : 7h00-9h00, 11h00-13h00 et 17h00-19h00. Ces périodes sont censées re-

présenter des heures de pointe et des heures creuses du trafic urbain. Les conditions de conduites sont également variées ; allant de 0 à 80km/h et des accélérations allant de -5 à $5m/s^2$. Etant défini comme la puissance instantanée par unité de masse, la VSP se traduit de manière simplifiée pour les véhicule léger par l'équation :

$$VSP(kw/ton) = 2.73\sin(slope)\nu + 0.085\nu\alpha + 0.0593\nu + 0.0000653x\nu^3$$

Avec : ν : vitesse du véhicule (mile/h) ; α : accélération (mile/h/s) ; $slope$: pente ($^\circ$) ;

On considère trois sections selon des paliers de vitesse :

- Faible : $0km/h < \nu \leq 30km/h$;
- Moyenne : $30km/h < \nu \leq 60km/h$;
- Elevée : $\nu > 60km/h$.

La formule utilisée est : $FC = \Sigma FR_i \cdot T_i$

Avec : FC : consommation de carburant (litre) ; FR : le taux de consommation (litre/s) ; T : durée du parcours (s).

Sur la figure ci-dessous sont représentés simultanément la consommation par unité de temps et par unité de distance pour l'un des véhicules testés. La consommation par unité de temps est croissante avec la vitesse. Une augmentation de vitesse de 40km/h à 80km/h entraîne une augmentation de 94% du taux de consommation. Il est à noter qu'une vitesse aussi bien trop élevée que trop basse peut entraîner une surconsommation au 100km.

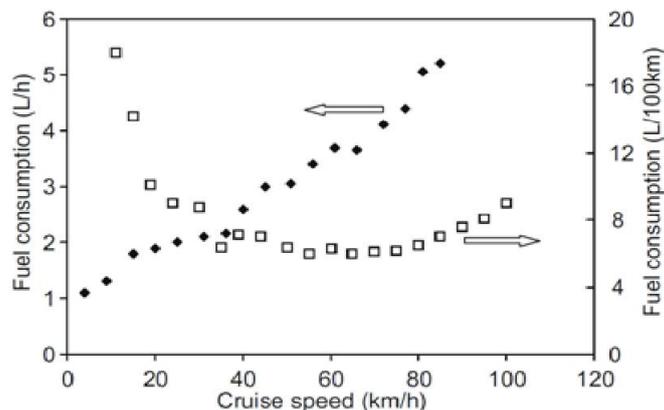


FIGURE 24 –

La vitesse optimale en termes de consommation se situe entre 50 et 70km/h. Pour ce véhicule, une vitesse de 65km/h correspond à une consommation de 6.0L/100km. L'accélération entraîne une sérieuse

hausse de consommation tandis que l'impact de la décélération est beaucoup moins remarquable.

2.7 Modèle numérique ; Pente et dissipation d'énergie [22]

Plusieurs recherches se sont focalisées sur la dissipation d'énergie des véhicules se déplaçant sur des routes régulières. Il n'y a pas de doute que la consommation des véhicules sur une route en pente est différente de celles-ci. Des variations devraient apparaître lorsque la route est en pente.

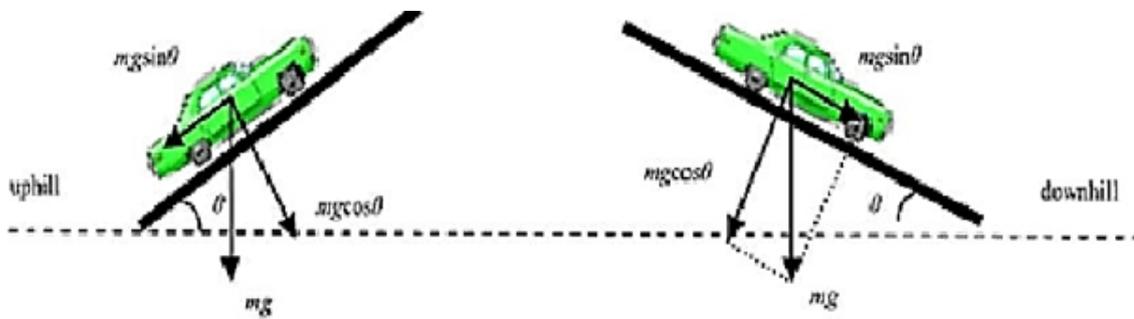


FIGURE 25 –

L'énergie cinétique du véhicule est liée à sa vitesse ($mv^2/2$). La perte d'énergie cinétique est définie comme la dissipation d'énergie causée par la décélération du véhicule. Conformément à la loi de conservation de l'énergie cinétique, dans un état stable, l'augmentation d'énergie en phase d'accélération est égale à l'énergie dissipée en décélération. En négligeant le roulement, les frottements aérodynamiques et d'autres pertes d'énergie, est pris en compte seul, la perte d'énergie due à la décélération.

En découle le modèle de la dissipation d'énergie :

$$\Delta E_n(t) = -[V(\Delta X_n, \theta) - \nu_n(t-1)] \cdot \Delta t [\nu(t-1) + \frac{1}{2}(V(\Delta X_n, \theta) - \nu_n(t-1))] \cdot \Delta t$$

Simulation numérique : Elle est effectuée sur une durée de 10000 s avec des valeurs de $\Delta t = 1s$ un temps de réaction du conducteur $T = 1s$. Toutes les simulations sont menées dans les situations de montée et descente (pente positive et négative). La valeur maximale de pente est de 6° ; ce qui traduit des conditions réelles (sur route). La distance de sécurité est

également prise en compte et toutes les données sont enregistrées de 5000 à 10000 s où l'on considère que le véhicule a atteint une stabilité dans son mouvement. Le nombre de véhicules dans le système est pris égal à 100 sur une longueur de 200m. On couple les notions de distance de sécurité, pente et densité de circulation pour dégager des éventuelles interactions. La distance de sécurité ne se révèle pas être un facteur influençant significativement la consommation. Pour une densité prise constante et égale à 0.25 véh/m. Trois valeurs de pentes sont abordées : 0°, 3° et 6°.

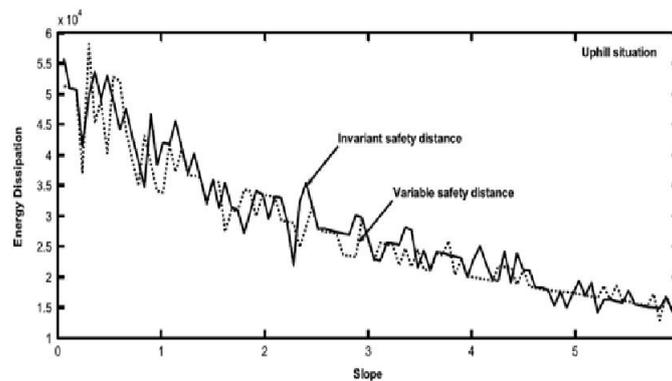


FIGURE 26 – Montée : distance de sécurité constante (3m) et variable. La consommation baisse

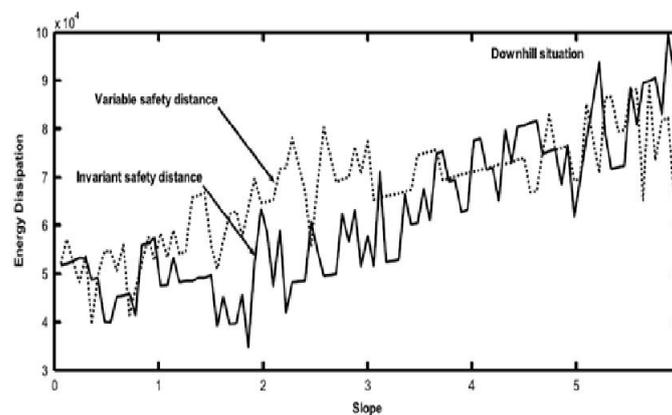


FIGURE 27 – Descente : distance de sécurité constante (5m) et variable. La consommation augmente

3 ETUDES EXPERIMENTALES - PROPOSITION D'UN PLAN D'ESSAI

3.1 Généralités

L'ensemble des essais se fera en deux parties ; l'une sur piste d'expérimentation au sein de l'IFSTTAR et l'autre sur route selon les besoins en terme de géométrie et de distance.

Les essais sont guidés et justifiés par les éléments issus de la recherche bibliographique établie en amont. Dans le cas présent nous mettons en avant les paramètres suivant dont on voudrait établir les liens avec la consommation d'énergie du véhicule :

- pentes ;
- dévers ;
- virages ;
- Carrefours, ronds-points et feux ;
- Vitesse ;

3.2 Instrumentation du véhicule

Le véhicule utilisé en temps qu'instrument référentiel est un Renault Clio 3 berline essence à injection 1.6i 16 soupapes (catégorie petite voiture). Il a été instrumenté début 2009 et les trois principaux objectifs sont l'estimation de l'adhérence, les mesures de trajectoire et toutes celles nécessitant un véhicule léger instrumenté. Le véhicule est actuellement équipé d'une quarantaine de capteurs analogiques et 6 capteurs numériques. La récupération de certaines données sur le bus CAN est possible grâce à une collaboration avec le centre de recherche de Renault.

Des robinets placés sur le circuit de freinage arrière permettent de supprimer le freinage des roues arrières (détermination de l'adhérence) afin d'avoir le report de charge sur roues avant uniquement. On peut également calculer des coefficients μ_{max} et $\mu_{bloqué}$ grâce à la possibilité de freinage avec ou sans ABS.

Les capteurs de commande :

- Commande volant (position crémaillère) et angle volant par le bus CAN

- Commande de freins (pression de freins des différents circuits de freinage)
- Commande d'accélérateur (ouverture papillon d'accélérateur) par le bus CAN

Les capteurs de comportement du véhicule :

- Accéléromètres de caisse longitudinaux transversaux et verticaux (X,Y et Z)
- Accéléromètres de roues verticaux
- Gyromètres longitudinaux transversaux et verticaux (roulis,tangage et lacet)
- Débattements de suspension

Les autres capteurs et données mesurées :

- Compte tours moteur par le bus CAN
- Vitesse des quatre roues par le bus CAN
- Codeurs incrémentaux sur chaque roue avec une résolution de 10000 points/tour
- Mesure de hauteur d'eau (aquasens)

Système d'acquisition :

- Carte d'acquisition National Instrument 80 voies de mesures (RSE)
- Carte 8 compteurs
- Carte CAN
- Logiciel d'acquisition sous Labview
- Micro ordinateur Pentium (coffre du véhicule)
- Ecran LCD et clavier déportés à la place passager avant

Les autres capteurs :

- Roue dynamométrique montée à la place d'une roue avant ou arrière et mesurant les forces et les moments dans les 3 axes X, Y, Z au moyeu de la roue
- Capteurs d'écrasement pneumatique laser Keyence +-40mm ; montée sur roue avant ou arrière, permet des mesures de l'écrasement du pneumatique afin de calculer le rayon instantané de la roue
- GPS : Enregistrement de la trajectoire du véhicule par système GPS Thalès Zmax.net avec une précision de+- 1cm en X et Y et +-3 cm en Z dans de bonne condition de réception GPS et radio

3.3 Personnel impliqué

- Freddy Toynan : élaboration du plan d'essais, suivi des expérimentations et traitement des données ;
- Alex Coiret : encadrement à l'élaboration du plan d'essais et à la valorisation des données ;
- Pierre-Olivier Vandanjon : encadrement à l'élaboration du plan d'essais et à la valorisation des données ;
- Jean-Marie Prual : collecte des données, instrumentations et réalisation des essais ;
- Patrik Daburon : collecte des données, instrumentations et réalisation des essais ;
- Samuel Louis : responsable de piste.

3.4 Précautions à envisager

Les essais devront être menés à une température ambiante optimale de manière à éviter que les personnes à bord aient à baisser les vitres du véhicule ou à mettre en marche la climatisation ; ce qui pourrait altérer les résultats.

La piste d'essai de l'IFSTTAR étant composée d'une succession de revêtement de chaussée différents qui pourraient ou non impacter les résultats, il serait préférable de prendre en compte la nécessité de mener certains essais sur route plutôt que sur piste si cet aspect est jugé important.

Il sera à prendre en compte les conditions thermiques vis-à-vis du moteur du véhicule (chaud/froid).

Pour des raisons de sécurité, lors de l'utilisation de la piste, dans le cas où celle-ci est fréquentée par d'autres personnes, on veillera à ce qu'une personne se charge de s'assurer que la piste est dégagée en sortie de virage.

3.5 Procédure de validation des instruments

Elles correspondent à l'ensemble des procédures entreprises par l'équipe d'exécution des essais pour s'assurer du fonctionnement de chacun des éléments qui composent l'ensemble de l'instrumentation.

3.6 Essais à réaliser

3.6.1 Identification de l'influence du dévers

L'essai implique d'être mené sur :

- Virage non déversé
- Virage déversé
- Succession de deux virages

Afin d'apprécier les variations de consommation, un long parcours ligne droite sera fait avant et après chaque situation de virage. On tentera d'adopter la même attitude (conducteur) abordant les différents virages en termes de vitesse, accélération et décélération. La piste de l'IFSTTAR ne comprenant qu'un seul dévers, on y pratiquera le cas du virage déversé.

3.7 Identification de l'influence des virages

Il sera là aussi nécessaire d'identifier des zones de virages avec différentes valeurs de rayon. On en identifiera 5 dont 2 inférieures à 200m, 2 supérieures à 200m et une égale à 200 m. On effectuera là aussi des distances conséquentes en ligne droite avant l'entrée en virage et idem à la sortie ainsi qu'une succession de virages.

Si la cartographie google map permet de repérer un virage contournant une zone agricole sur un site et une route traversant un champ sur un autre site avec des conditions similaires, les deux parcours seront éventuellement effectués afin d'en tirer une comparaison des données.

3.8 Identification de l'influence de la pente

Un recueil d'information sera à établir en amont afin d'identifier des zones de tronçon ayant les valeurs de pente caractéristiques ou similaires suivantes : -6%, -4%, -2%, +2%, +4%, +6% voire une pente maximale d'environ 8% si cela est possible.

L'expérimentation devra être menée dans une zone avec une aisance de manœuvre pour remonter et descendre la pente afin que chaque cas de figure soit répété au moins une fois.

La vitesse envisagée est celle limitée par la voie empruntée.

Le repérage des pentes pourra se faire à l'aide des profils topographiques fourni par calculitinaire.com.

3.8.1 Influence des points d'arrêt (carrefours, feux et ronds-points)

A l'aide du service de cartographie en ligne google map, nous repérons des carrefours et ronds-points de différents rayons dans des conditions de trafic les plus fluides possibles.

Les situations de feu de carrefour peuvent être simulées sur piste à l'aide du dispositif mobile dont dispose l'IFSTTAR.

On pourra également faire une étude comparative de l'efficacité du système des feux de carrefours à 3 états (vert, orange, rouge) et ceux à 4 états (rouge, rouge+orange, Vert, Orange). Cette simulation peut se faire sur piste à l'aide de plots pour le respect des distances d'arrêt et d'un chronomètre pour la durée de chaque état de feu.

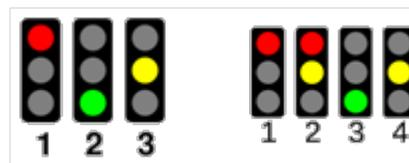


FIGURE 28 – Feux à trois et quatre états

En carrefours les situations simulées seront :

- Ralentissement - arrêt puis remise en vitesse en ligne droite
 - Ralentissement - arrêt puis remise en vitesse en avec virage à 90°
- On pourra effectuer la simulation sur deux carrefours successifs.

En giratoire on pourra effectuer la même expérience en répétant la simulation sur deux ronds-points successifs en variant les rayons.

3.8.2 Récapitulatif des essais

Un récapitulatif des essais à réaliser est répertorié dans le tableau ci dessous selon qu'ils seront réalisés sur la piste de l'IFSTTAR ou en extérieur :

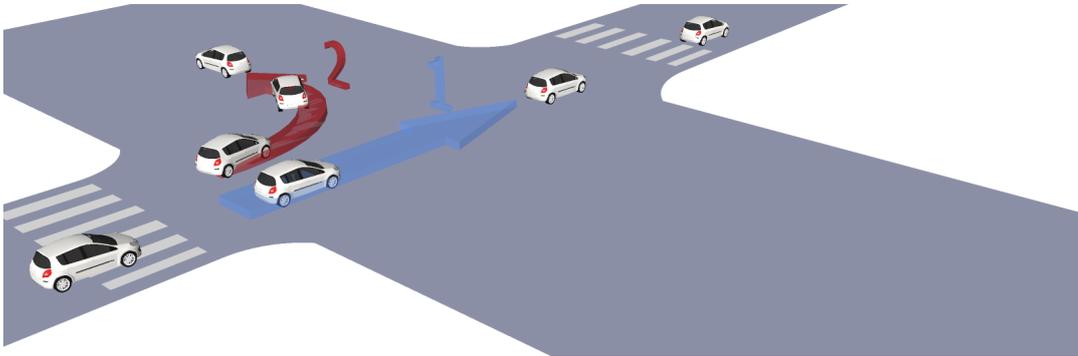


FIGURE 29 – Simulations en carrefour

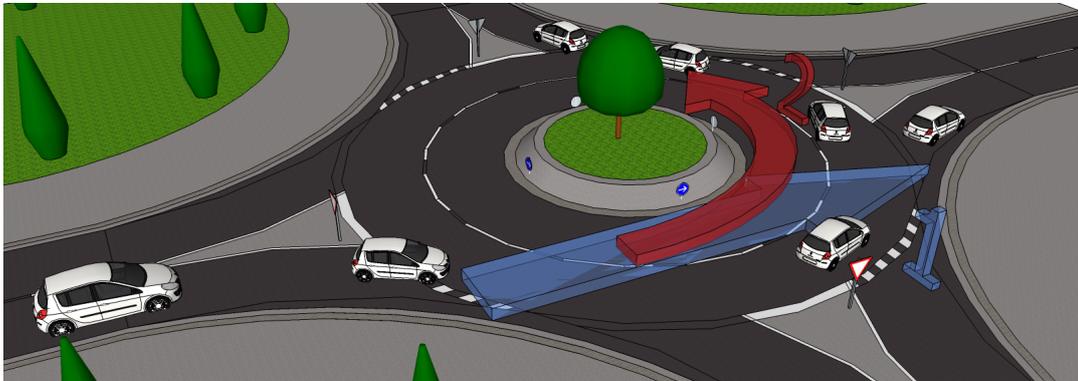


FIGURE 30 – Simulations en rond point

	Sur piste	Sur route
Essais	validation des instruments	influence de la pente
	influence du dévers	l'influence du dévers
	Influence des points d'arrêt	influence des virages

4 Essais réalisés sur la piste d'expérimentation de l'IFSTTAR

4.1 Essai 1 : Influence du dévers sur la consommation d'énergie

Equipement nécessaire :

- Piste d'essai
- Débitmètre essence ;
- CORREVIT ;
- Anémomètres ;
- Ordinateur ;
- GPS et centrale inertielle ;
- Capteurs de débattement des suspensions ;
- Capteurs de pressions des freins ;
- Roue dynamométrique ;
- Talkie Walkie

Indications spécifiques :

Les expérimentations seront effectuées une fréquence d'échantillonnage de 100Hz.

On effectuera les essais sur la bande de piste la plus homogène en terme de revêtement, à savoir la bande centrale constituée de Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG).

Dans le souci d'avoir les trajectoires les plus précises possibles, plusieurs passages seront effectués afin de s'ajuster vis-à-vis de l'alignement que se définira le conducteur.

Tenant compte des conditions météorologiques, une mesure de la température ambiante sera effectuée par la station météo.

Déroulement des essais :

La piste se compose dans le sens de la circulation d'un premier alignement droit de 168m, un virage de 1155m puis un second alignement droit de 990m. Nous partirons pour notre expérimentation du sens inverse afin d'avoir une distance suffisante pour atteindre la vitesse stabilisée désirée (rapport de vitesse : 5ème) en abordant le virage. Le tracé en plan du virage présente un rayon de 320m avec lequel coïncide une vitesse de

stabilité de 130km/h il en résulte un dévers de 22°30 à l'axe. Ce dévers n'est cependant pas constant pour des raisons de guidage. Le profil en travers est donc concave ; la vitesse de stabilité varie donc linéairement avec le rayon en plan.

On exploitera donc la bande circulaire de 3m de large à 4% de dévers et la largeur de la chaussée se trouvant entre cette bande et l'axe. On y effectuera une mesure de consommation dans chacune des configurations suivantes :

1. Trois passages à la vitesse de 80km/h sur trois hauteurs différentes correspondant à $315m < R < 312m$ (bas de piste), $R=320$ (axe) et $320m < R < 323m$ (haut de piste) ;
2. Trois passages à la vitesse de 90km/h sur les mêmes hauteurs ;
3. Un troisième passage à une vitesse de supérieure ou égale à 120km/h.

Notons que les vitesses indiquées dans ce plan d'essais restent indicatives et donc sous réserves d'être modifiées dans l'application sur le terrain dans le cas où les conditions réelles nous y contraindront. Nous restons donc flexibles dans une marge allant de 80 à 130km/h.

On pourra également prendre en compte la mesure de consommation en parcourant l'alignement droit si la vitesse escomptée est atteinte sur une distance considérable. Cela servira ainsi de base de référence pour la comparaison des valeurs ligne droite-virage à 4% de dévers ; données pouvant être exploitées ultérieurement.

Dans le cas où une validation de nos résultats s'avèrerait difficile de part les différences de dévers et de rayon on envisagera de reprendre les essais en extérieur en simulant des virages non déversés de mêmes rayons afin de pouvoir mettre en évidence l'influence du dévers sur la consommation d'énergie.

Le parcours de l'alignement droit nous permettra également d'effectuer des mesures vis-à-vis de la sensibilité au vent au même moment. Il sera dans ce cas pris en compte deux directions de vent (Est et Ouest).

Dans un souci de précision et au vu des nombreux paramètres entrant en compte, nous nous imposerons une certaine répétabilité. L'ensemble des essais sera donc réalisé deux jours de suite (selon les conditions météorologiques).

5 TRAITEMENT DES DONNEES ACQUISES EN ESSAIS D'INTEGRATION (SUR PISTE) - Mise en évidence de l'effet du dévers

5.1 Traitement

Les données acquises sous forme de fichier texte regroupent un grand nombre d'informations dont nous ne faisons pas intégralement usage. Des scripts écrits antérieurement ont donc permis de retirer les entêtes et sélectionné des données précises nécessaires au traitement. Il s'agit :

- La vitesse longitudinale
- La vitesse transversale
- L'accélération transversale
- L'angle volant
- Les efforts de la roue dynamométrique (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z)
- La consommation instantanée

Les courbes tracées sont celles des essais réalisés à 80 km/h en bas de piste, 110km/h optimal et 120 km/h optimal.

5.2 Objectif

L'objectif est de repérer la fiabilité des essais vis-à-vis des valeurs révélées par les courbes et mettre en évidence une variation de consommation due au dévers :

- Correspondance des valeurs de vitesse stabilisée escomptée pour chaque passage ;
- Correspondance des zones d'entrée en virage par observation des valeurs de l'angle volant et efforts sur la roue dynamométrique par exemple ;
- Repérage d'une variation du débit dans la zone de virage.

5.3 Résultats

Les graphiques retenus sont ceux des essais à 120km/h en position optimale car ils fournissent des résultats sur les différences que l'on cherche à mettre en évidence. Les signaux étant pour la plupart fortement bruités, ils sont présentés sous la forme d'un signal initial(bleu) et un

signal lissé(vert). La superposition des courbes permet de repérer aisément la zone d'entrée en virage qui correspond à l'instant $t \approx 12s$. La vitesse stabilisée y est approximativement atteinte également. Sont présentées ci-dessous les courbes de vitesse longitudinale et d'accélération transversale à 120 km/h.

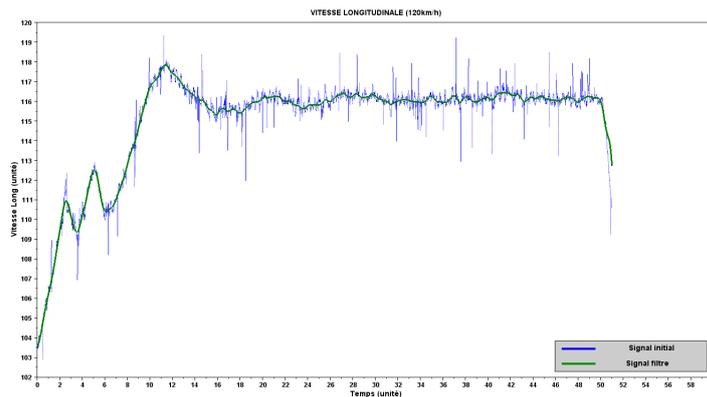


FIGURE 31 – Courbe vitesse longitudinale en fonction du temps

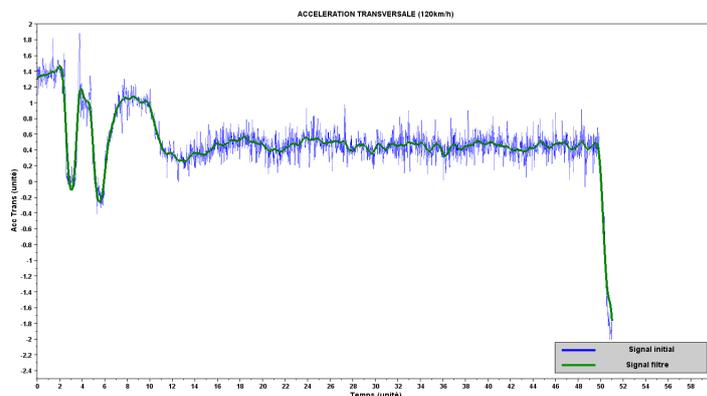


FIGURE 32 – Courbe accélération transversale en fonction du temps

Rappelons que le dévers de la piste a été conçu sur la base d'une vitesse de 130km/h permettant au conducteur de prendre un virage sans avoir à agir sur la direction du véhicule. Cette constance a été très étroitement côtoyée à la vitesse de 120km/h en position optimale. Ci-dessous

les courbes de l'angle volant et des efforts Fx sur la roue dynamométrique (roue avant droite).

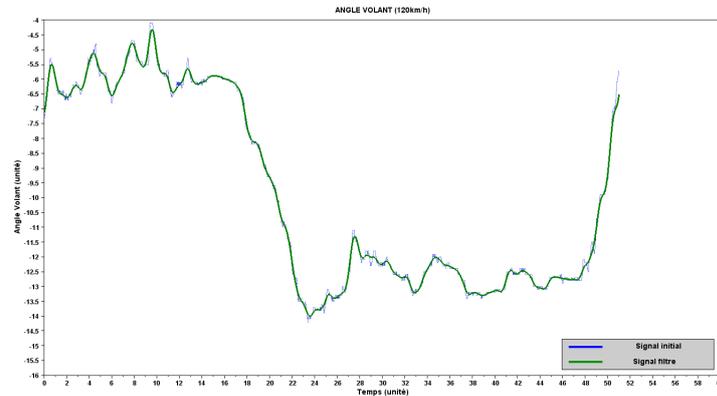


FIGURE 33 – Courbe angle volant en fonction du temps

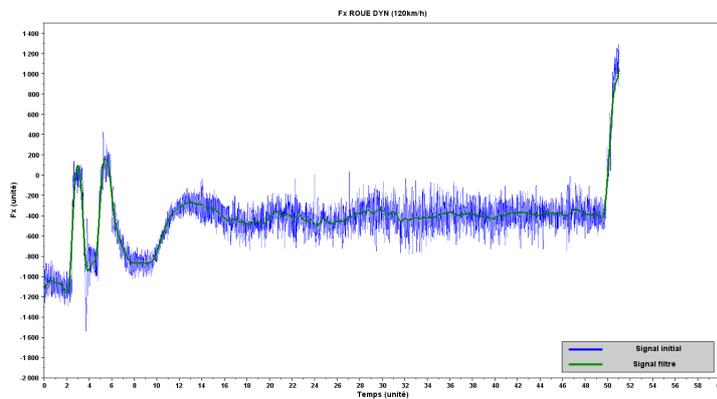


FIGURE 34 – Courbe Fx en fonction du temps

Enfin, la courbe du débit présente à partir de la zone du virage un desserrement lorsque le véhicule l'aborde à la vitesse 120km/h, à la différence des deux autres valeurs de vitesse qui affichent une différence quasiment impossible à distinguer.

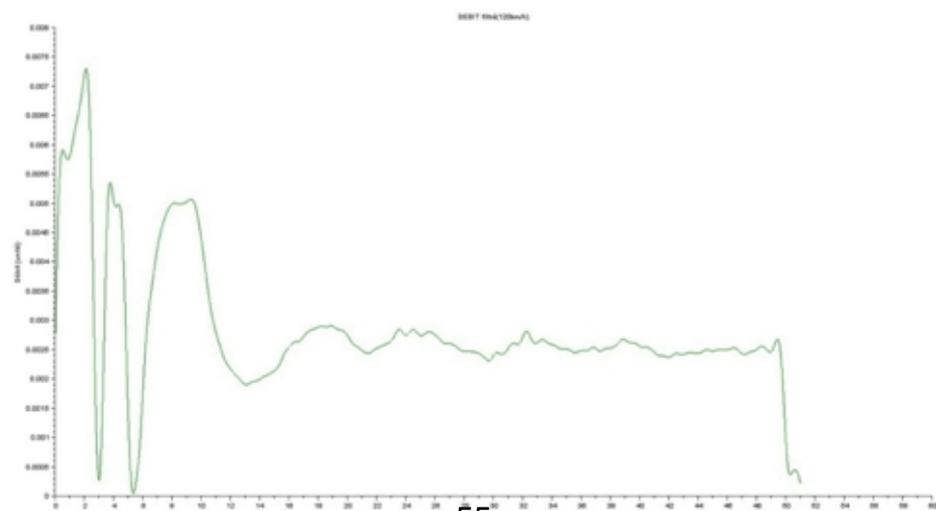
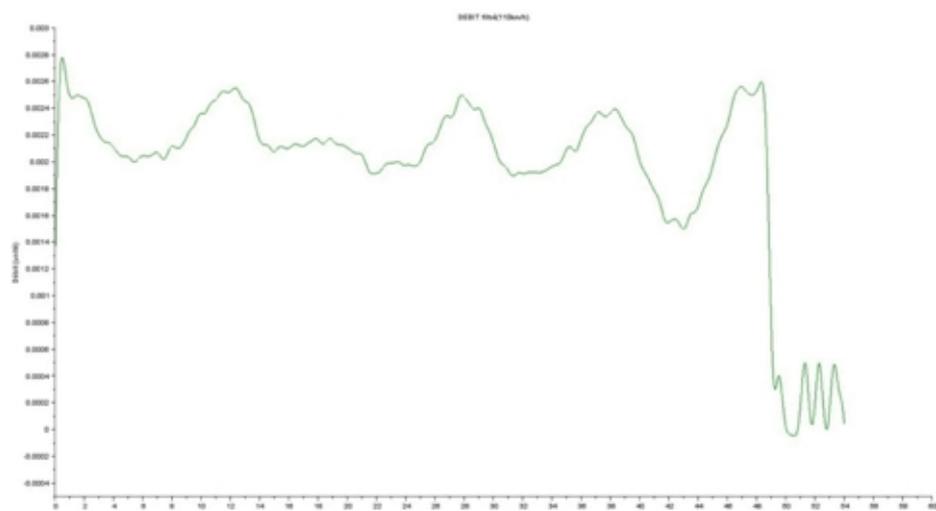
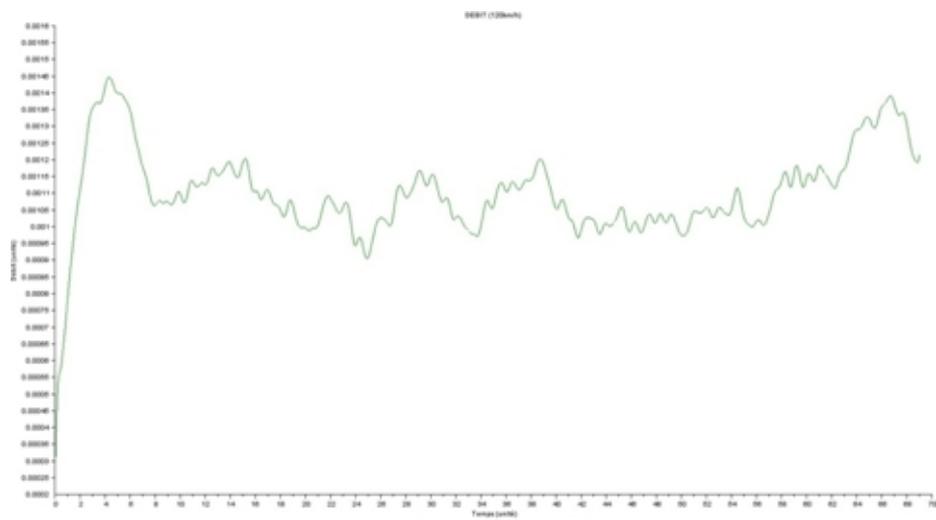


FIGURE 35 – Courbes débit=f(t) à 80 km/h, 110km/h et 120km/h

6 Essais sur route

6.1 Les itinéraires

Les essais ont été réalisés sur trois itinéraires différents choisis selon des critères répondant aux objectifs des expérimentations. Nous avons eu à utiliser le programme web de calcul d'itinéraire (www.calculitineraire.com).

6.1.1 Itinéraire 1

Il s'agit d'un parcours en boucle d'une longueur de 38.13km avec une topographie variant très peu. Ce parcours permet de faibles variations de vitesse dans une zone peu fréquentée.

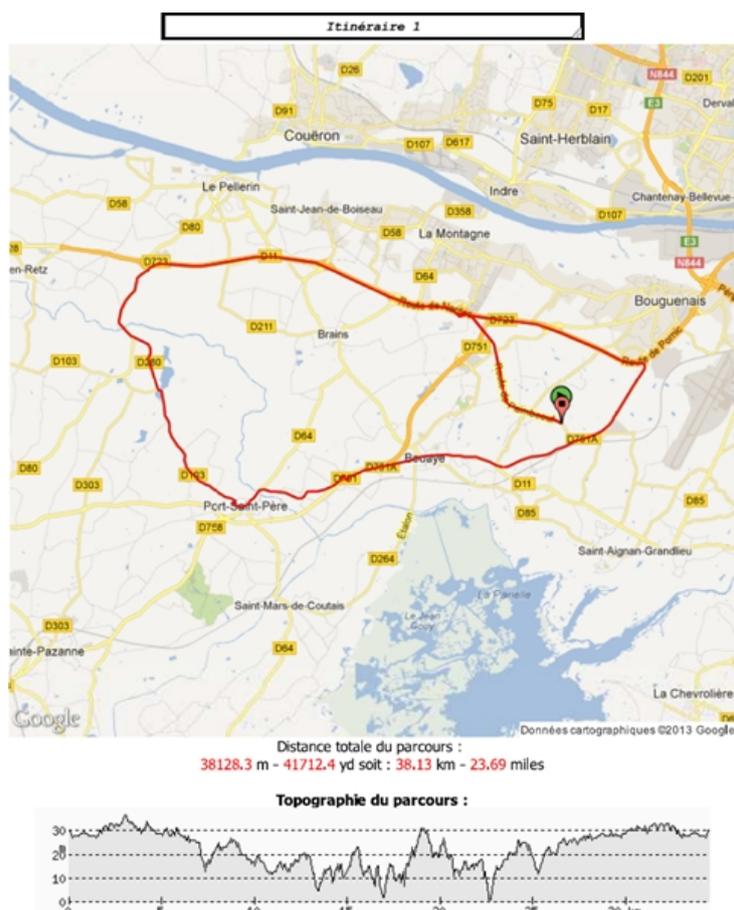


FIGURE 36 – Itinéraire 1

6.1.2 Itinéraire 2

Ce parcours est également en boucle. Le trajet fait 28,48km et présente l'avantage de comporter des parties urbaines et des variations importantes d'altitude. Il est découpé en deux parties aller et retour du fait d'un passage par le bac du pellerin, enjambant la Loire.

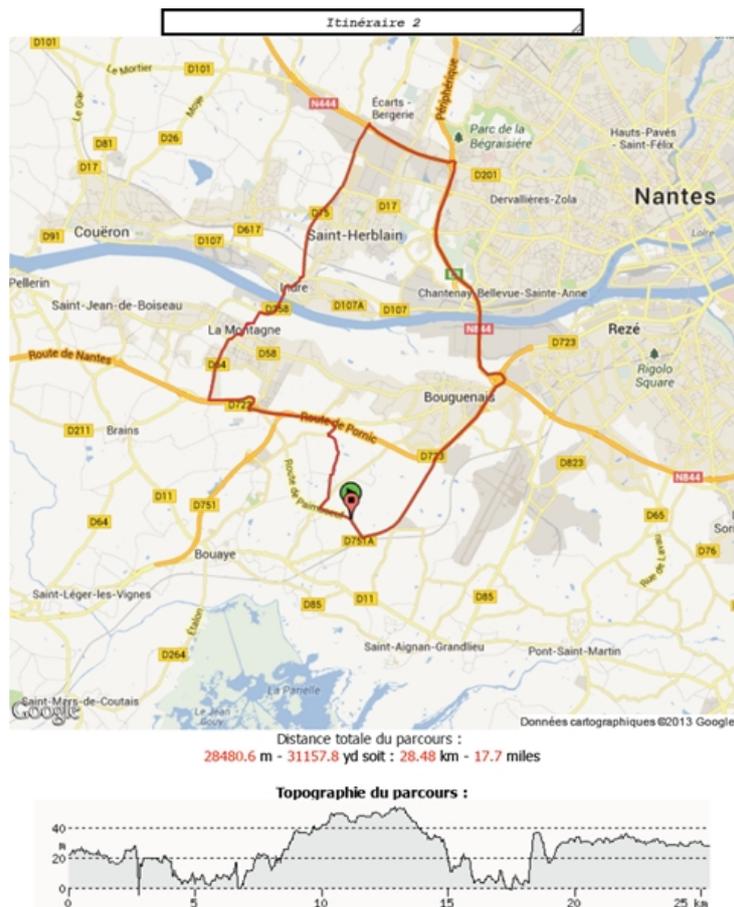


FIGURE 37 – Itinéraire 2

6.1.3 Itinéraire 3

Le troisième itinéraire se fait en aller retour, soit 2x20,73km. Il passe par le pont de chevigné et comporte plusieurs virages et rond points.

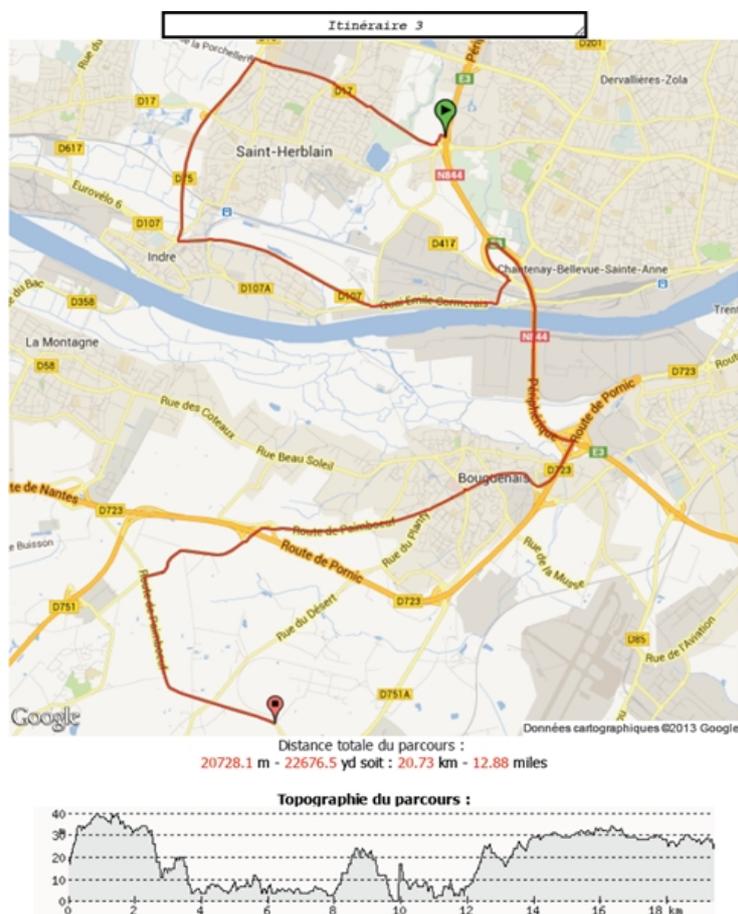


FIGURE 38 – Itinéraire 3

6.2 Déroulement des essais

L'équipe est constituée de deux groupes dont l'un, dans le but d'un autre stage est embarqué à bord du véhicule VERT (Véhicule d'Essais et de Référence en Trajectographie) et de la clio (utilisée en essais sur piste). L'instrumentation reste la même ainsi que la fréquence d'échantillonnage (100 Hz).

Le lancement de l'acquisition des données est fait à la sortie de l'IFSTTAR qui correspond au point de départ et d'arrivée de tous les essais.

Les précautions liées à la climatisation et la montée des vitres durant tous les parcours sont respectées.

6.3 traitement des données

Le traitement des données est effectué grâce à des scripts élaborés sous le logiciel scilab. L'objectif étant de mettre en évidence des variations significatives de consommation en fonction des paramètres.

6.3.1 Anémomètre

Sachant que les précautions ont été prises vis-à-vis du vent, nous pouvons quantifier l'impact des frottements aérodynamique (vent relatif) par le biais des informations fournies par l'anémomètre ainsi que la vitesse longitudinale du véhicule partant d'une équation simple :

$$Vent_{rel} = V_{anemo} - V_{veh}$$

On en déduit le graphique ci-dessous :

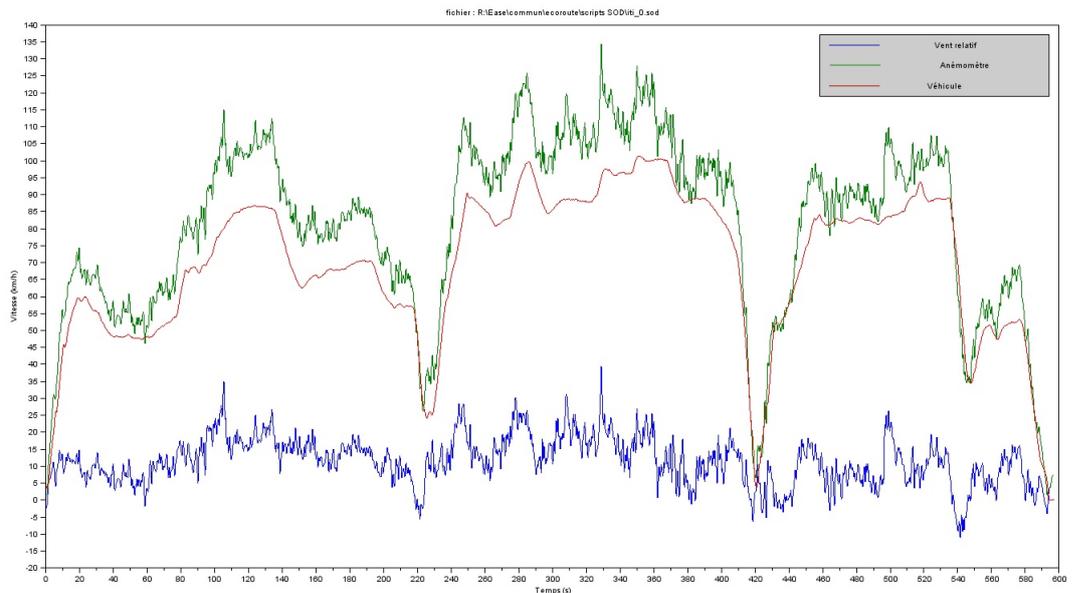


FIGURE 39 – Influence du vent

On peut en déduire une influence de vent relativement faible sur l'ensemble du parcours, ce qui indique que les valeurs enregistrées par l'anémomètre sont principalement influencées par la vitesse du véhicule. Cette courbe traduit bien les conditions de vent réelles des essais. Cependant

l'exposition varie selon les parcours (rase campagne, zone urbaine) donc un calcul de ce genre est effectué sur chacun des itinéraires.

6.3.2 GPS

L'exploitation des données du GPS fait ressortir le développé et le profil altimétrique de l'itinéraire.

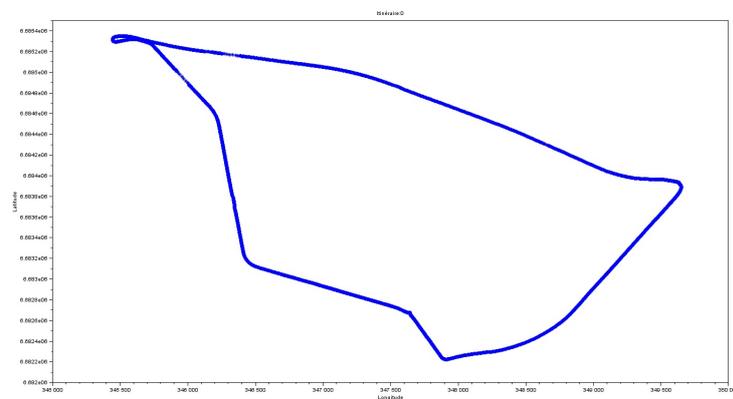


FIGURE 40 – Tracé de l'itinéraire par les données GPS

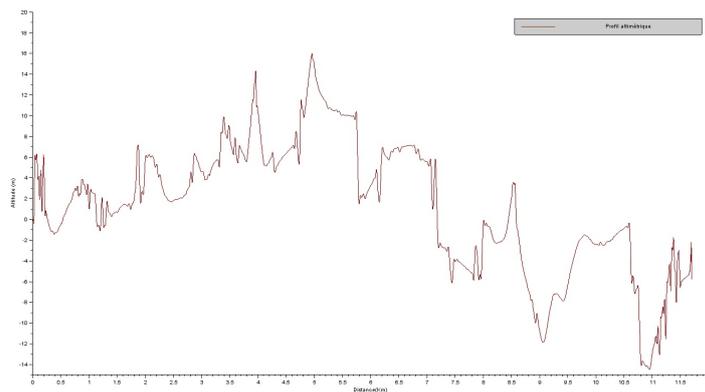


FIGURE 41 – Profil altimétrique issu des données GPS

Ces courbes doivent permettre d'isoler des tronçons homogènes caractérisés par des valeurs de rayon de courbure et des valeurs de pente

énoncées dans le plan d'essai. Sachant que la base comparative sera les lignes droite pour les virage et les profils relativement plats pour les pentes.

6.3.3 Débitmètre

Une première approche permet d'obtenir une courbe de la consommation sur l'ensemble du parcours. Le principe de fonctionnement du débitmètre est d'émettre un signal à chaque impulsion. Sachant que cela correspond à 0.245cm^3 par impulsion (données constructeur), le but est de quantifier le nombre d'impulsion dans un intervalle de temps ou de distance donné, ce qui permettra par la suite d'obtenir une consommation instantannée. Pour obtenir la consommation totale sur l'ensemble du parcours, il suffira de faire la somme des consommations instantannées. Soit pour l'exemple du premier itinéraire, un total de 0.73 litres sur 12km. Pour confronter ce résultat à titre indicatif à la réalité, une extrapolation induit une consommation d'environ 5.8l/100km, ce qui est très proche de la réalité pour la clio III 1.6 (environ 6-7 l/100km).

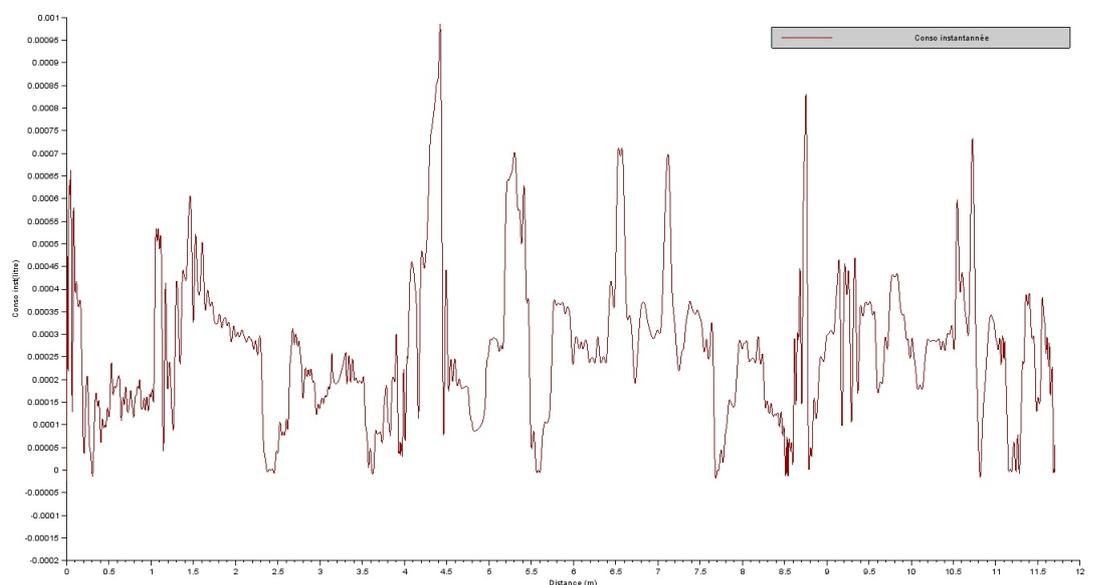


FIGURE 42 – Consommation en fonction de la distance

Conclusion

Références

- [1] P-O Vandanjon Alex Coiret. *Adhérence des chaussées*. IFSTTAR, 2013.
- [2] Brunel. *Cours de route*. Université d'Orléans, 2007.
- [3] Belgian Road Research Centre. *Safety and road management : APL*. Belgian Road Research Centre, 2010.
- [4] Véronique Cerezo. L'adhérence des revêtements routiers. *Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement*, 2011.
- [5] Yves Cochet. L'europe face au pic pétrolier. *Les verts au parlement Européen*, 2012.
- [6] Alex Coiret. Caractéristiques d'un projet routier interaction sol/route/véhicules. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 2013.
- [7] Conférence Européenne des ministres de transport. *La congestion routière en Europe ; Table ronde 110*. Centre de Recherches Economiques, 1999.
- [8] Service d'Etudes Techniques des Routes et Autiroutes. *Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes*. Setra, 2006.
- [9] Ressources Naturelles du Canada. *Guide de consommation de carburant*. RNCAN, 2012.
- [10] KebinHe XinYu Hong Huo, ZhiliangYao. Fuel consumption rates of passenger cars in china :labels versus real-world. *Energy Policy*, 2011.
- [11] LCPC. Mesure de l'adhérence des chaussées routières et aéronautiques ;. *Technique et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées*, 2006.
- [12] Hong Tu LUU. *Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d'un véhicule dans un contexte de sécurité et de confort*. PhD thesis, Université d'Evry-Val-d'Essonne, 2011.
- [13] Michel Martin. Le mouvement de lacet du véhicule lors d'une prise de virage michel. *Info Tech n 4*, 2003.
- [14] Mohamed Ouahi. *Observation de systèmes à entrées inconnues, applications à la dynamique automobile*. PhD thesis, UMR CNRS Université de Limoges, 2011.

- [15] G. Dell'Asin A. Monzon P.J Pérez-Martinez, D. Ming. Evaluation of the influence of toll systems on energy consumption and co2 emissions : A case of study of a spanish highway. *Journal of King Saud University-Science*, 2010.
- [16] Bitume Québec. *Rôle des couches de roulement*. Laboratoire Universitaire sur les Chaussées, Routes et Enrobés Bitumineux, 2006.
- [17] J.P. Roumégoux. Calcul des émissions unitaires de polluants des véhicules utilitaires. *ELSEVIER*, 1994.
- [18] J.P. Roumégoux. Perspectives et prospective des sources d'énergie et des technologies classiques des véhicules. *INRETS*, 2002.
- [19] J.P. Roumégoux. *Méthodes et outils d'évaluation des consommations unitaires de carburant*. Institut National de Recherche sur les Transport et leur sécurité - Université de Lyon 1, 2009.
- [20] J.M.J Choi S.C Burgess. A parametric study of the energy demands of car transportation : a case study of two competing commuter routes in the uk. *ELSEVIER*, 2003.
- [21] P Leduc D. Soleri R. Tilagone T. Colliou, B. Gatellier. Les technologies bas co2 des véhicules routiers. *IFP – Panorama*, 2008.
- [22] Cheng-Hui Zhang Wen-Xing Zhu. Analysis of energy dissipation in traffic flow with a variable slope. *Physic A*, 2013.
- [23] Roy J. Crookes Xiaoyu Yan. Energy demand and emissions from road transportation vehicles in china. *ELSEVIER*, 2010.
- [24] S. Mammar M. Netto Y. Sebsadji, S. Glaser. Vehicle roll and road bank angles estimation. In *17th world congress-The international Federation of Automatic Control*, 2008.