

Chapitre 2.

Optimisation de la consigne de couple du conducteur.

1.Introduction.

L'objectif poursuivi dans cette étude est l'augmentation de l'autonomie du véhicule en modifiant la consigne de couple qu'il impose, sans limiter les performances du véhicule.

Les batteries n'ont pas été prises en compte dans l'optimisation. En effet, les résultats sont très variables selon la technologie utilisée. Néanmoins, en diminuant la consommation électrique en aval de celles-ci, l'autonomie du véhicule est augmentée.

Dans ce chapitre, la détermination de la commande découle de l'étude de l'interaction conducteur / véhicule sur un cycle de vitesse : c'est l'analyse conduite au paragraphe 2.

Les stratégies d'optimisation sont alors présentées au paragraphe 3. On présente au paragraphe 4 les moyens d'évaluer leur efficacité. Les stratégies d'optimisation sont ensuite développées plus précisément aux paragraphes 5 et 6.

Nous concluons sur l'intérêt de ces commandes et sur les perspectives qui sont ouvertes.

2. Analyse et modélisation d'un cycle de conduite.

2.1. Présentation du système formé par le cycle de vitesse et par le véhicule.

Un véhicule circulant sur un circuit est modélisable par un système composé de deux éléments.

Le premier élément est un générateur de consignes de vitesse, déterminé à la fois par la topologie du circuit et par la position du véhicule dans celui-ci.

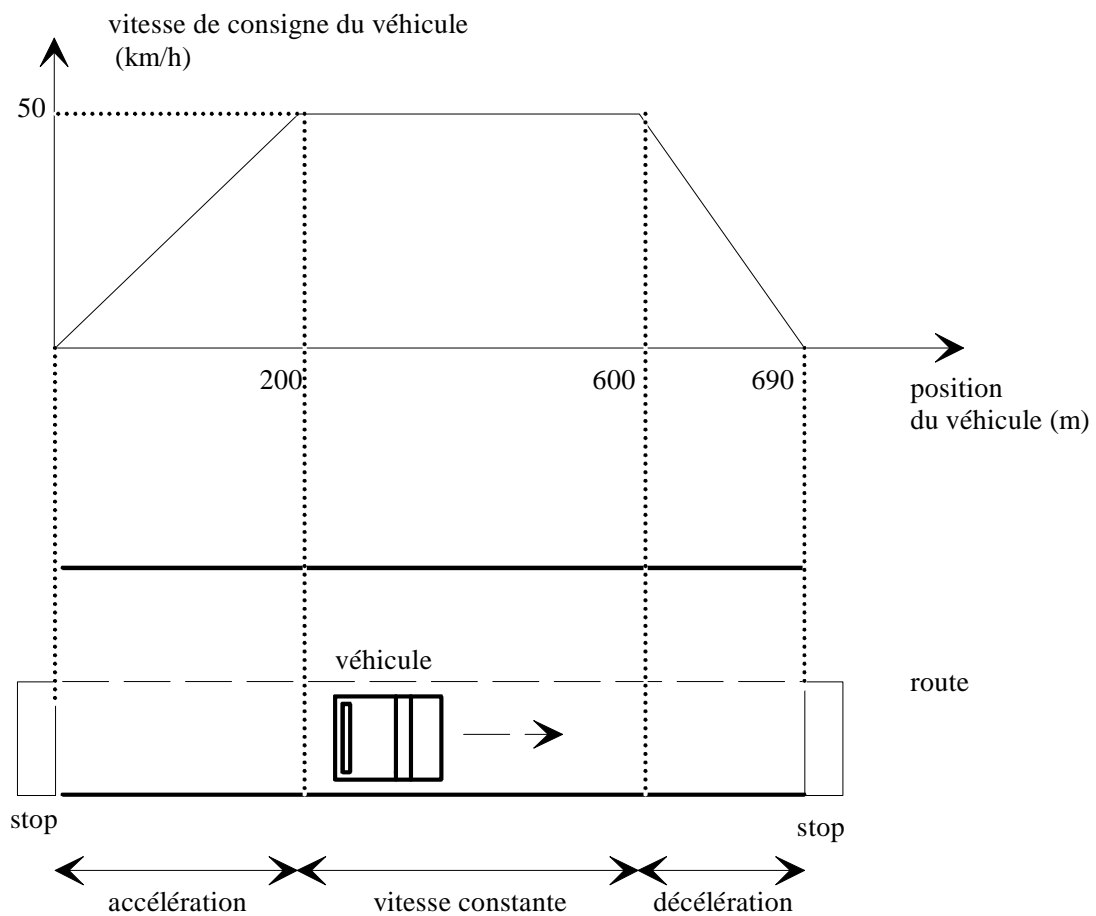


Figure 2.1. Génération de consigne de vitesse en fonction de la position du véhicule.

Dans l'exemple représenté sur la Figure 2.1, on établit une relation entre le circuit et les consignes de vitesse. Les deux « stop » imposent une vitesse nulle. La limitation de vitesse à 50 km/h détermine la vitesse du véhicule quand elle est constante. Nous présenterons dans la suite du chapitre un modèle de générateur de consigne.

Le second élément de ce système est l'ensemble conducteur / véhicule. Son entrée est une consigne de vitesse et sa sortie la vitesse réelle du véhicule. On peut alors déduire la

position du véhicule en intégrant cette valeur. Elle devient l'entrée du générateur de consigne de vitesse (Figure 2.2).

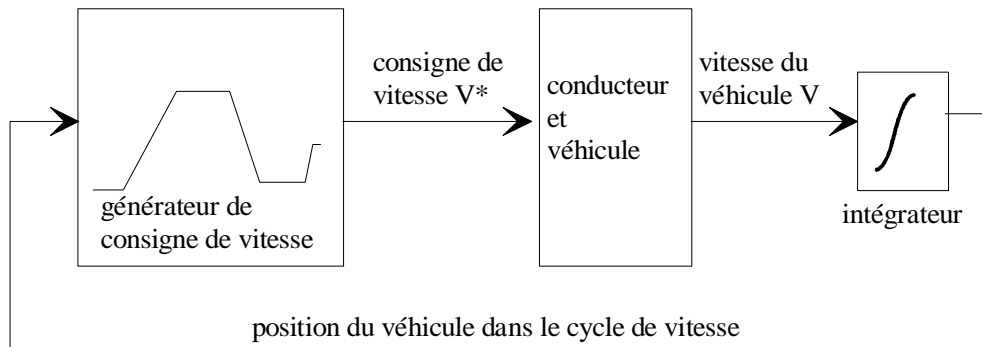


Figure 2.2. Modélisation du système formé par le cycle de vitesse et par le véhicule.

La modélisation qui est effectuée sépare donc le conducteur du générateur de consigne de vitesse. En réalité, ces deux composantes sont liées. En effet, c'est le conducteur qui détermine un cycle de consigne de vitesse sur une courte durée en fonction des informations visuelles du circuit qu'il parcourt.

Pour déterminer la commande optimisant l'autonomie du véhicule, nous allons nous intéresser au sous-système formé par le conducteur et par le véhicule.

2.2. Modélisation de l'ensemble conducteur-véhicule.

Ce système est composé de deux éléments que l'on caractérise dans un premier temps par leurs entrées et leurs sorties.

- conducteur.

Entrées : V^* consigne de vitesse et V vitesse réelle.

Sortie : consigne de couple.

- véhicule (modélisé au chapitre 1).

Entrée : consigne de couple.

Sortie : vitesse du véhicule.

L'association de ces deux éléments est donc aussi un système bouclé.

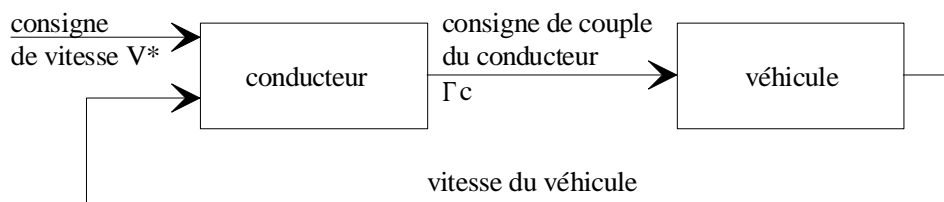


Figure 2.3. Modélisation du système conducteur et véhicule.

3.Stratégies d'optimisation.

3.1.Introduction : présentation des stratégies envisagées..

La gestion de consigne optimisée (GCO) modifie la consigne de couple qui est imposée par le conducteur au véhicule (Figure 2.4), pour optimiser un critère.

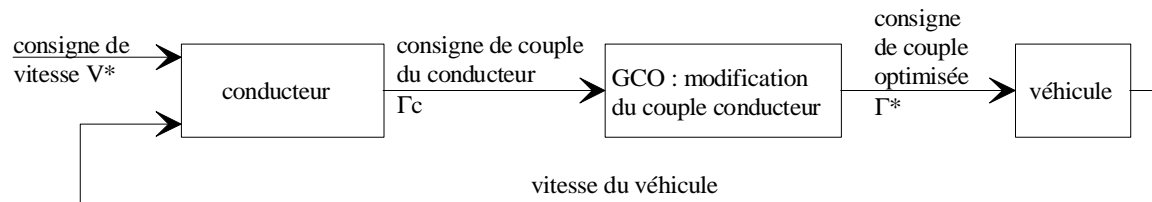


Figure 2.4. Modélisation du système conducteur et véhicule avec GCO.

Deux types de commande peuvent être envisagés.

La première stratégie de commande consiste à optimiser un critère de consommation énergétique sur une durée infiniment courte (en pratique une période d'échantillonnage de la commande). L'optimisation ne peut être effectuée qu'en fonction du motovariateur, sa consommation à vitesse donnée ne dépendant que du couple. Néanmoins, le gain apporté par cette commande peut être globalement nul, voire négatif sur la consommation lorsque la réaction du conducteur est trop importante. Cette commande est donc efficace dans la mesure où la modification de la réponse du véhicule n'est pas ressentie de manière trop importante par le conducteur.

La seconde stratégie consiste à remonter à la consigne de vitesse du générateur, en faisant l'hypothèse qu'un modèle inverse du conducteur existe. On supprime virtuellement le conducteur de la boucle (Figure 2.5). En faisant une autre hypothèse sur le type de trajectoire de vitesse, on peut alors utiliser un critère d'optimisation sur une durée plus longue. Dans ce cas, l'optimisation énergétique porte à la fois sur le motovariateur et sur la mécanique.

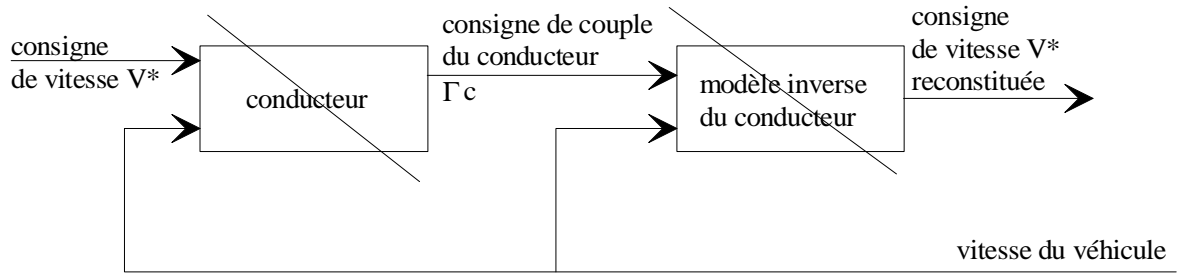


Figure 2.5. Suppression de la réaction du conducteur.

3.2. Définition du critère d'optimisation.

3.2.1. Objectifs.

La commande a pour objet de maximiser l'autonomie du véhicule. Cette grandeur est par définition la distance \$D_a\$ parcourue par le véhicule lors d'une décharge complète de l'énergie embarquée \$E_a\$.

La consigne de couple en entrée du véhicule \$\Gamma^*[0;T]\$ (\$T\$ étant la durée d'optimisation), qui optimise l'autonomie est telle que :

$$D_a = \max_{\Gamma[0;T]} \left[\frac{\int_0^T V \cdot dt}{\int_0^T P(V, \Gamma) \cdot dt} \right] \cdot E_a \quad (2.1).$$

\$V\$ étant la vitesse du véhicule et \$P\$ la puissance électrique en amont de l'onduleur. Cette optimisation est effectuée sous la contrainte que représente l'équation de la mécanique :

$$\dot{V} = f_m(V, \Gamma) \quad (2.2).$$

La commande est dans ce cas déterminée pour un critère optimisé qui ne tient pas compte de la consigne. Par conséquent, le critère doit en réalité faire apparaître un compromis entre la maximisation de l'autonomie et le respect de la consigne.

3.2.2. Critère instantané.

3.2.2.1. Critère maximisant l'autonomie.

Dans le cas d'un critère optimisé sur une durée infiniment courte, l'optimisation ne prend pas en compte l'évolution de la vitesse du véhicule : la consigne est donc directement la consigne de couple Γ_c . La partie du critère relative à l'écart de consigne est donc dans ce cas :

$$\int_0^T \varepsilon_{\Gamma_c}(\Gamma) \cdot dt \quad (2.3).$$

où $\varepsilon_{\Gamma_c}(\Gamma)$ est une fonction positive, décroissante sur $]-\infty, \Gamma_c]$ et croissante sur $[\Gamma_c, +\infty[$.

Pour que l'optimisation globale corresponde à la minimisation d'un critère, on définit celui-ci comme la somme pondérée de l'inverse de l'autonomie prévisible et de l'écart de consigne. Pour le critère minimisé sur une durée infiniment courte, on obtient :

$$J_{\Gamma \min} = \min_{\Gamma[0;T]}(J_{\Gamma}) = \min_{\Gamma[0;T]} \left[(1 - \alpha) \frac{\int_0^T P(V, \Gamma) dt}{\int_0^T V dt} + \alpha \int_0^T \varepsilon_{\Gamma_c}(\Gamma) dt \right] \quad (2.4).$$

$$\xrightarrow{T \rightarrow T_e = \text{période de échantillonnage}} \min_{\Gamma} \left[(1 - \alpha) \frac{P(V, \Gamma)}{V} + \alpha \varepsilon_{\Gamma_c}(\Gamma) T_e \right]$$

P est proportionnel à la puissance électrique absorbée par le motovariateur.

Le paramètre α de valeur comprise entre 0 et 1 permet de favoriser l'une ou l'autre des composantes du critère.

P peut alors s'exprimer en fonction du couple, de la vitesse et du rendement $\eta(\Gamma, V)$:

$$\text{En traction } P(V, \Gamma) = \frac{\Gamma \cdot V}{\eta(\Gamma, V)} \quad (2.5).$$

$$\text{En freinage } P(V, \Gamma) = \eta(\Gamma, V) \cdot \Gamma \cdot V \quad (2.6).$$

Dans la suite du chapitre, nous ne nous intéresserons qu'à la traction.

On obtient :

$$J_{\Gamma_1} = (1 - \alpha) \frac{\Gamma}{\eta(\Gamma, V)} + \alpha \cdot \varepsilon_{\Gamma_c}(\Gamma) \cdot Te \quad (2.7).$$

Enfin, on choisit la fonction $\varepsilon_{\Gamma_c}(\Gamma)$ telle qu'elle mesure l'écart quadratique du couple normalisé (Γ_{\max} étant le couple maximum que peut fournir le moteur) :

$$\varepsilon_{\Gamma_c}(\Gamma) = \left(\frac{\Gamma - \Gamma_c}{\Gamma_{\max}} \right)^2 \quad (2.8).$$

On obtient finalement le critère J_{Γ_1} dans sa forme définitive :

$$J_{\Gamma_1} = (1 - \alpha) \frac{\Gamma}{\eta(\Gamma, V)} + \alpha \cdot \left(\frac{\Gamma - \Gamma_c}{\Gamma_{\max}} \right)^2 \cdot Te \quad (2.9).$$

3.2.2.2. Critère optimisant la puissance et le rendement.

La minimisation à chaque instant du critère J_{Γ_1} , ne garantit pas une amélioration globale de l'autonomie. On peut envisager que d'autres critères instantanés puissent donner de meilleurs résultats.

On définit ainsi J_{Γ_2} qui optimise un compromis entre la minimisation de la puissance et de l'écart entre le couple et la consigne de couple du conducteur :

$$J_{\Gamma_2} = (1 - \alpha) \cdot P(\Gamma, V) + \alpha \cdot \left(\frac{\Gamma - \Gamma_c}{\Gamma_{\max}} \right)^2 \quad (2.10).$$

De même, on définit J_{Γ_3} qui optimise un compromis entre une élévation du rendement du motovariateur (minimisation de son inverse), et une diminution de l'écart entre le couple et le couple de consigne du conducteur. On obtient de la même manière que précédemment :

$$J_{\Gamma_3} = \frac{(1 - \alpha)}{\eta(\Gamma, V)} + \alpha \cdot \left(\frac{\Gamma - \Gamma_c}{\Gamma_{\max}} \right)^2 \quad (2.11).$$

3.2.3. Critère optimisé sur une durée longue.

Dans ce cas, la consigne est représentée par la consigne de vitesse V^* en sortie du modèle inverse du conducteur. Le critère initial devient :

$$J_{v \min} = \min_{\Gamma[0;T]}(J_v) = \min_{\Gamma[0;T]} \left[\alpha_1 \frac{\int_0^T P(V, \Gamma).dt}{\int_0^T V.dt} + \alpha_2 \int_0^T \varepsilon_{v^*}(V).dt \right] \quad (2.12).$$

avec $\varepsilon_{v^*}(V)$ une fonction positive, décroissante sur $]-\infty, V^*]$ et croissante sur $[V^*, +\infty[$ et (α_1, α_2) deux paramètres de pondération. De la même manière que précédemment, on peut choisir un écart quadratique de vitesse.

Pour réaliser une commande, qui peut être raisonnablement implantée sur véhicule, nous avons cherché à nous ramener à un critère quadratique qui soit représentatif de l'autonomie :

$$J_{v \min} = \min_{\Gamma[0;T]}(J_v) = \min_{\Gamma[0;T]} \left[\int_0^T (\alpha'_1 \cdot P(V, \Gamma) + \alpha'_2 \cdot (V - V^*)^2).dt \right] \quad (2.13).$$

avec (α'_1, α'_2) deux paramètres de pondération.

Si on fait l'hypothèse que le véhicule est linéarisable, on est alors ramené à la minimisation d'un critère linéaire quadratique.

Supposons à présent que T est la durée correspondant à une distance parcourue donnée. On doit donc résoudre un problème classique à durée inconnue avec des états initiaux et finaux connus. Cependant, les consigne de vitesse sont inconnues a priori, car elles sont déterminées par le circuit parcouru. Ce problème n'a donc pas de solution.

Les seuls critères conduisant à une solution sont les critères pour lesquels l'état final est libre et la durée T fixée.

On définit les variables suivantes :

- u l'entrée du système constitué du motovariateur et du véhicule : la consigne de couple Γ^* .
- y la sortie du système : la vitesse du véhicule.
- y_réf la référence à suivre : la consigne de vitesse V^* en sortie du modèle inverse du conducteur.

On définit un paramètre S' . La valeur $y^T S' u$ est représentative du terme de puissance $\alpha'_1 \cdot P(V, \Gamma)$ du critère exposé en (2.13).

On définit aussi Q' comme étant une matrice carrée symétrique définie non négative assurant la pondération du suivi de référence. On vérifie que la valeur $(y - y_{réf})^T Q' (y - y_{réf})$ est représentative de l'erreur quadratique de suivi de vitesse $\alpha'_2 \cdot (V - V^*)^2$ du critère exposé en (2.13).

On peut donc définir le critère quadratique suivant pour assurer le compromis entre l'erreur de suivi de vitesse et la minimisation de la puissance :

$$J = \int_0^T (2y^T S' u + (y - y_{réf})^T Q' (y - y_{réf}) + u^T R u) dt \quad (2.14).$$

Le terme $u^T R u$ est rajouté car il garantit dans la mesure du possible que le couple n'atteint pas sa valeur maximum. En effet, dans ce cas le système n'est plus linéaire : la commande n'est plus optimale. R une matrice carrée symétrique définie non négative assurant donc la pondération de la limitation de l'entrée du système

Sous ces hypothèses, la commande obtenue est un retour d'état à gains variables.

4.Moyens d'évaluation de l'efficacité des commandes.

4.1.Introduction.

A véhicule donné, on ne peut pas évaluer le gain d'autonomie en comparant les résultats de consommation pour des points de fonctionnement statiques recréés.

Pour y parvenir, des conditions de conduite réelle doivent être recréées. En simulation, des modèles paramétrables de circuits, de cycles de vitesse et de conducteurs réalistes sont utilisés. Des évaluations d'autonomie sont effectuées sur ce circuit, avec différentes lois de commande et différents types de conducteurs. Les durées à simuler peuvent être importantes. Par conséquent, on voit l'utilité de disposer de modèles de véhicules simplifiés, tout en restant réalistes pour éviter des temps de calculs trop importants (cf. chapitre 1).

On peut recréer expérimentalement ces conditions avec un véhicule réel sur un banc à rouleaux. Ces essais permettent de valider les modèles de simulation. Néanmoins, le gain d'autonomie en conduite réelle n'est pas plus démontré qu'en simulation.

Il faut donc dans tous les cas réaliser des campagnes d'essais sur véhicules en conditions de conduite réelles. C'est ce qui a été fait sur un circuit urbain ouvert à la circulation, avec différents conducteurs.

4.2. Structure de simulation.

4.2.1. Présentation générale du simulateur.

4.2.1.1. Limitation d'une structure de simulation classique.

Un simulateur est, comme nous l'avons vu précédemment (Figure 2.2), composé de deux parties principales : le générateur de consigne de vitesse et l'ensemble conducteur / véhicule.

Les simulateurs classiquement utilisés ont pour objet d'évaluer la consommation d'un véhicule sur un cycle de vitesse normalisé [Maz Qua 94]. La structure de commande est telle que la vitesse est parfaitement asservie à sa référence. Par conséquent, une comparaison objective entre différents modèles de véhicules peut être effectuée. Avec ce simulateur, la consigne de vitesse n'est fonction que du temps (Figure 2.6).

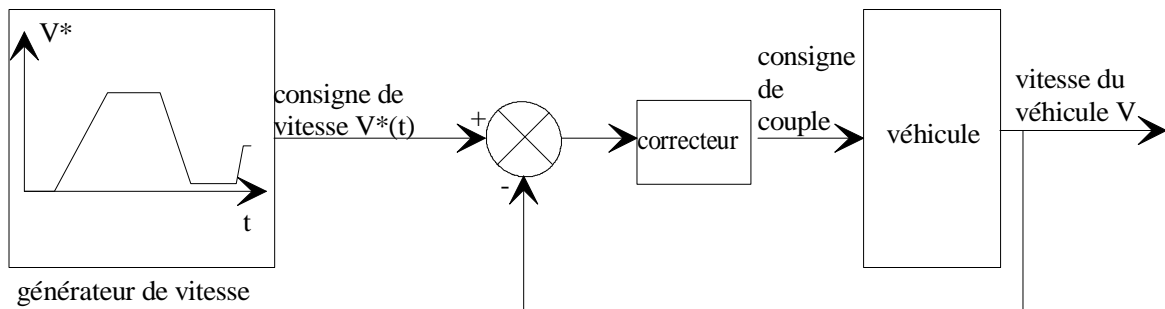


Figure 2.6. Structure de simulation classique.

Avec cette solution, le conducteur est remplacé par un asservissement de vitesse le plus rapide possible.

Néanmoins, cette structure est insuffisante pour évaluer l'autonomie du véhicule avec différentes commandes. En effet, le gain espéré provient en partie du fait que le profil de vitesse n'est qu'imparfaitement suivi. Si la consigne de vitesse reste une fonction du temps, alors la distance parcourue sur le cycle n'est plus la même et les comparaisons ne sont plus possibles.

4.2.1.2. Présentation d'un simulateur de circuit réaliste.

Un simulateur doit comporter un modèle de conducteur incluant des paramètres dynamiques et de sensibilité [Pap-Rog 95]. La consigne de vitesse n'étant pas parfaitement respectée, le générateur de consigne doit prendre en compte la distance parcourue par le véhicule : la structure est rebouclée en distance (Figure 2.7).

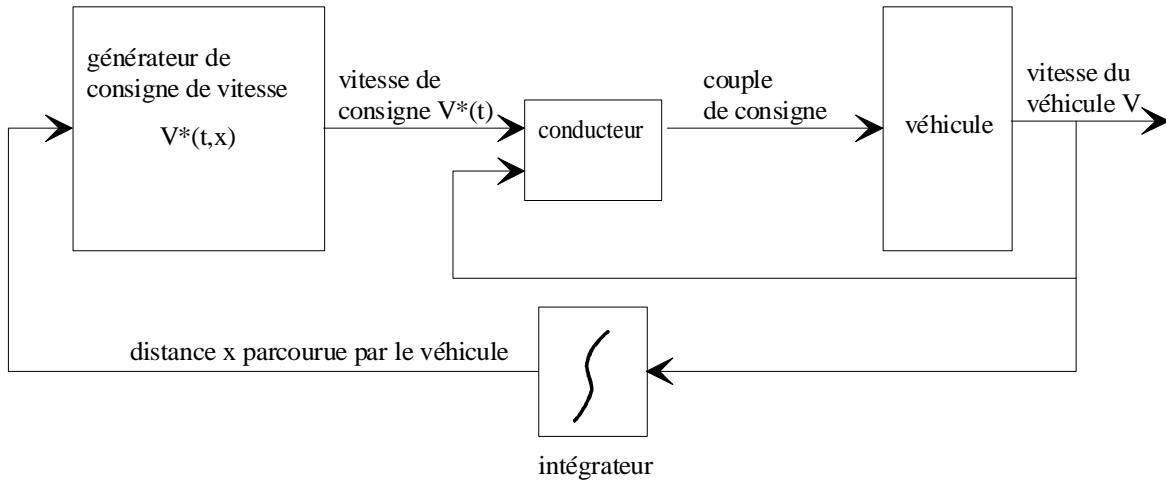


Figure 2.7. Simulateur de circuit réaliste.

Les paragraphes suivants détaillent les modèles du générateur de consigne de vitesse et du conducteur qui sont utilisés dans le simulateur.

4.2.2. Génération de consignes.

Les cycles de vitesse normalisés sont construits à partir de deux séquences élémentaires fonction du temps : un demi-trapèze constitué d'une phase à accélération constante suivie d'une phase à vitesse constante et un demi-trapèze constitué d'une phase à décélération constante suivie d'une phase à vitesse constante (Figure 2.8).

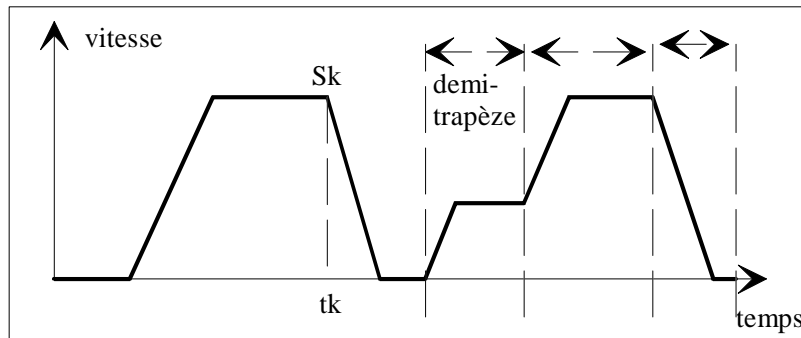


Figure 2.8. Générateur de consigne de vitesse de la structure classique.

La nouvelle structure reprend cet ensemble de demi-trapèzes fonction du temps. Néanmoins, la vitesse initiale et la durée pendant laquelle la vitesse est constante ne sont pas fixés. La fin de chaque séquence élémentaire est atteinte lorsque la longueur de la portion de circuit associée est atteinte. Les paramètres imposés par la séquence i sont donc la pente et la vitesse à atteindre.

Par exemple, supposons que la consigne de vitesse est déterminée par le trapèze i . Lorsque la distance x_i associée à la fin de ce circuit élémentaire est dépassée, la consigne de vitesse est alors déterminée par le demi-trapèze $i+1$. La continuité de la vitesse est assurée en imposant pour la vitesse en début de séquence $i+1$, la vitesse atteinte en fin de séquence i .

La Figure 2.9 illustre le mécanisme du générateur de vitesse avec deux types de réponse en vitesse du véhicule.

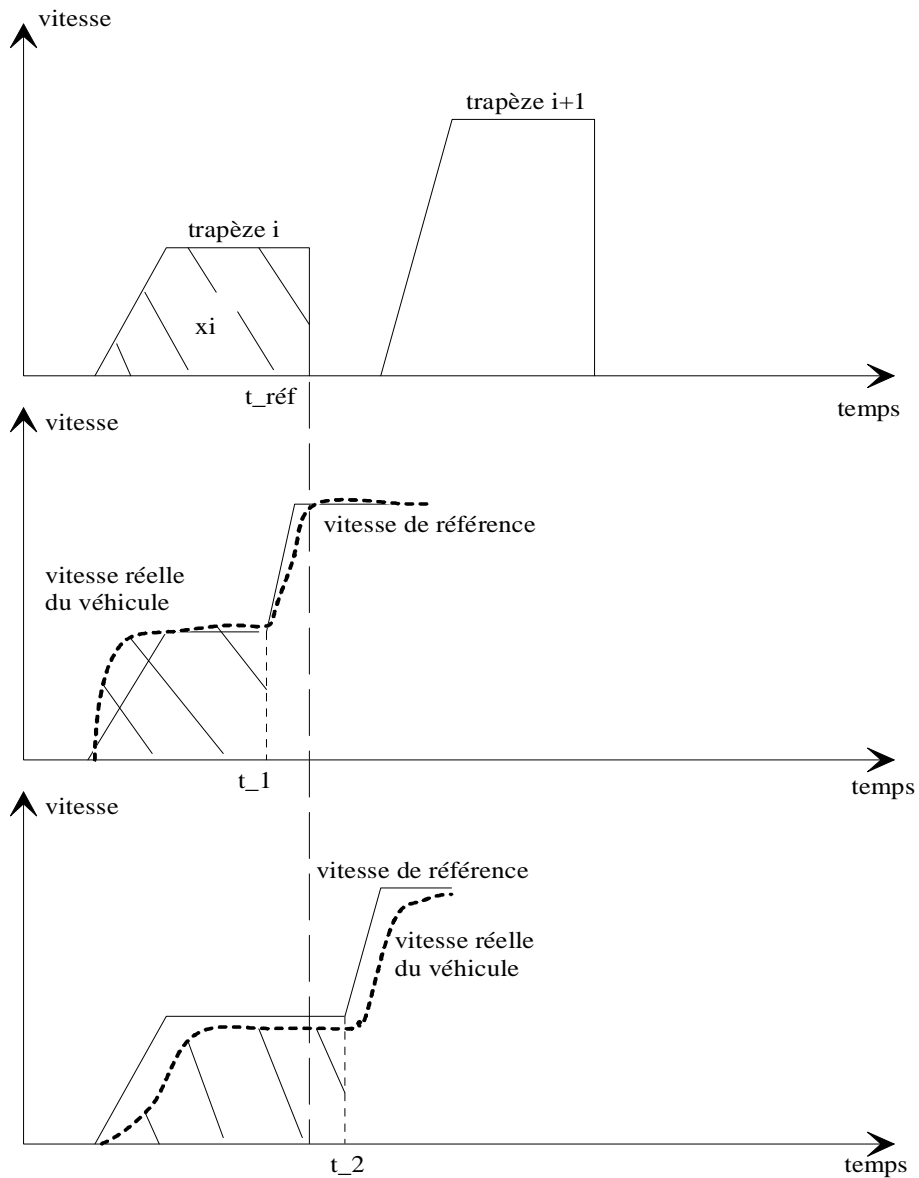


Figure 2.9. Consigne de vitesse en fonction de la distance parcourue.

La durée $t_{\text{réf}}$ correspond au temps que mettrait le véhicule à parcourir x_i , si la consigne de vitesse correspondant à l'ensemble du demi-trapèze i était parfaitement suivie. Dans le premier cas (second schéma), la vitesse réelle est supérieure à la consigne. La distance x_i est atteinte à t_1 , qui est inférieure à $t_{\text{réf}}$. Dans le second cas (troisième schéma), la vitesse réelle du véhicule est donc inférieure à la consigne. La distance x_i est atteinte à t_2 , qui est supérieure à $t_{\text{réf}}$.

En conclusion, on constate que le circuit de référence est respecté en terme de distance, avec une consigne de vitesse de référence la plus proche possible d'un cycle normalisé de vitesse fonction du temps.

4.2.3. Modèle conducteur.

4.2.3.1. Introduction.

L'analyse du comportement du conducteur lors de la mise au point des boîtes de vitesse automatiques [Taf 95] a servi de support à la modélisation qui est présentée. Le schéma de principe est représenté sur la Figure 2.10.

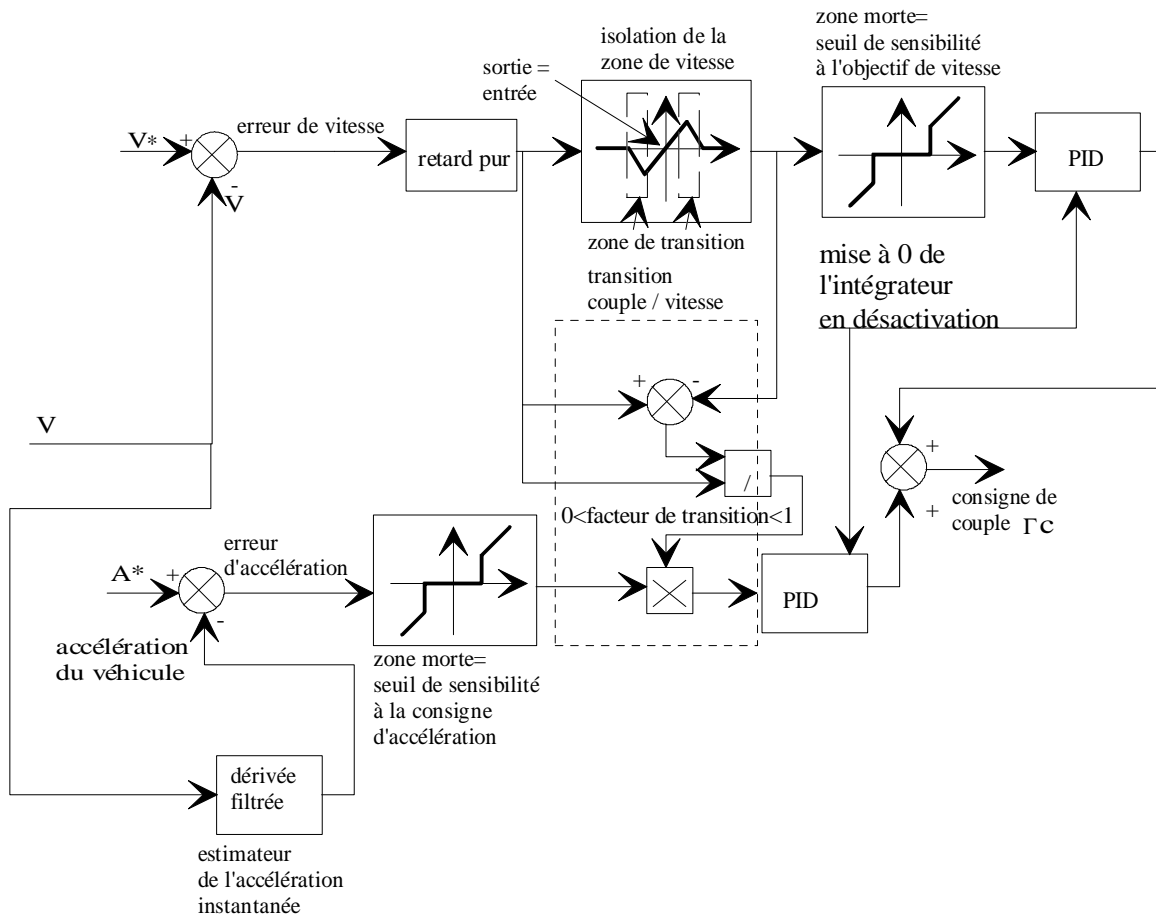


Figure 2.10. Schéma de principe du modèle conducteur.

Une accélération se déroule en deux phases. Dans la première, on peut considérer que le conducteur accélère uniquement en fonction du potentiel de son véhicule, sans se soucier à ce moment de l'objectif de vitesse. La seconde phase d'accélération commence lorsque le conducteur considère qu'il est "assez proche" de son objectif de vitesse. Il passe alors en régulation de vitesse. Le modèle conducteur comporte donc des boucles d'asservissement d'accélération et de vitesse associées à un dispositif de transition.

4.2.3.2. Boucles d'asservissement du modèle.

La consigne d'accélération est modélisée comme étant proportionnelle à l'accélération maximum du véhicule (qui elle-même est fonction de la vitesse). Le coefficient de proportionnalité caractérise le type de conducteur :

$$A^* = K_{\text{activité}} \cdot A_{\text{max}} \quad (2.15).$$

A^* étant la consigne d'accélération du conducteur.

A_{max} étant l'accélération maximale disponible du véhicule.

$K_{\text{activité}}$ étant le coefficient d'activité du conducteur (compris entre 0 et 1).

Ainsi, on prendra

$K_{\text{activité}} = 0,4$ pour un conducteur "passif".

$K_{\text{activité}} = 0,6$ pour un conducteur moyen.

$K_{\text{activité}} > 0,8$ pour un conducteur "sportif".

Les asservissements sont modélisés par des correcteurs PID, dont les coefficients peuvent être eux aussi multipliés par le coefficient d'activité $K_{\text{activité}}$ du conducteur.

L'information de vitesse n'est pas traitée instantanément par le conducteur. Par conséquent, un retard pur a été ajouté en sortie du comparateur de vitesse et d'accélération.

On doit également modéliser le seuil de perception de vitesse du conducteur ($\pm 0.27 \text{ m/s}$ soit $\pm 1 \text{ km/h}$) et d'accélération ($\pm 0.5 \text{ m/s}^2$). On ajoute donc une "bande morte" dans les boucles d'asservissement.

4.2.3.3. Dispositif de transition.

La transition entre les deux modes d'asservissement doit se faire de manière continue. On définit trois zones :

- la zone 1 d'asservissement de vitesse : elle entoure de plus ou moins 1.4 m/s (soit 5 km/h) l'objectif de vitesse.
- la zone 2 de transition correspond aux bandes de vitesse $[-2.8; -1.4]$ et $[1.4; 2.8]$ (en m/s) autour de l'objectif de vitesse.

- la zone 3 d'asservissement d'accélération.

Quand la vitesse est dans la zone 1, le facteur de transition vaut 0 : l'asservissement d'accélération est désactivé.

Dans la zone 3, sa valeur est 1 : l'asservissement de vitesse est désactivé.

La zone 2 correspond au passage entre ces deux zones. Dans ce cas, le facteur de transition est compris entre 0 et 1. La consigne de couple est une combinaison de la sortie des deux asservissements.

4.2.3.4. Algorithme de commande.

L'algorithme de commande se déroule en deux étapes :

A partir du moment où le coefficient $K_{\text{activité}}$ du conducteur est fixé, il faut calculer le potentiel d'accélération du véhicule en fonction de la vitesse.

On dispose d'une part de l'enveloppe de couple moteur maximum du véhicule en fonction de la vitesse $\Gamma_{\text{max}}(V)$, déterminée lors de la modélisation du véhicule. De même, on connaît le couple résistant du véhicule en fonction de la vitesse $\Gamma_{\text{rés}}(V)$. On peut en déduire l'accélération maximale (Figure 2.11) :

$$A_{\text{max}} = \max\left(\frac{dV}{dt}\right) = \frac{\Gamma_{\text{max}}(V) - \Gamma_{\text{rés}}(V)}{J} \quad (2.16).$$

J étant l'inertie du véhicule.

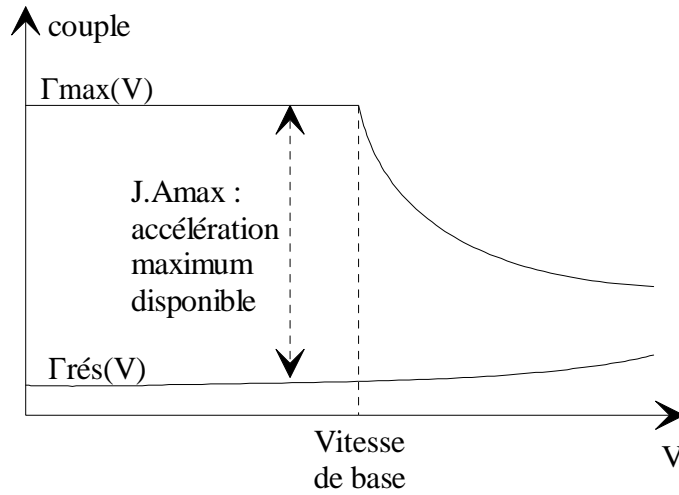


Figure 2.11. Mise en évidence de l'accélération disponible.

La Figure 2.12 illustre les différents comportements du conducteur.

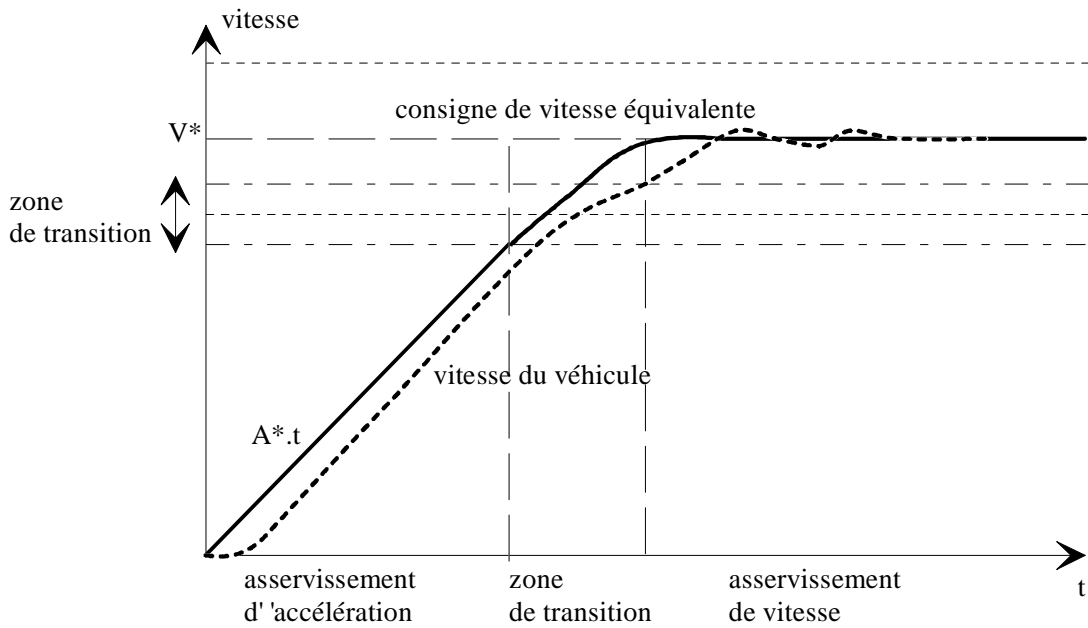


Figure 2.12. Modes d'asservissement du conducteur durant une montée de vitesse.

4.3.Moyens d'essais expérimentaux.

4.3.1.Introduction.

Les essais sur banc à rouleaux sont difficiles à mettre en oeuvre, et ils ne garantissent pas pour autant l'efficacité des lois de commande en conduite réelle.

Nous avons donc uniquement procédé à des essais sur un circuit urbain réel, et ce avec différents conducteurs. Un véhicule a été équipé de la Gestion de Consigne Optimisée, avec un interrupteur pouvant désactiver le programme.

4.3.2.Types de relevés effectués.

Les relevés effectués concernent l'énergie électrique (en Wh) consommée en amont de l'onduleur.

Les relevés de consommation en consuite sont corrigés en tenant compte de l'utilisation des auxiliaires (feux, ventilateur de batterie, essuie-glace ...). La durée du cycle est aussi enregistrée, car elle permet non seulement de connaître la consommation des auxiliaires, mais d'écarter les parcours dont la durée est trop différente de la moyenne. Ce relevé permet aussi de vérifier quelle est l'incidence de la loi de commande sur la durée du cycle.

4.3.3.Conditions d'essais.

Le conducteur a pour consigne de reproduire son comportement dans la mesure du possible d'un essai à l'autre. Par exemple, il est interdit de doubler un autre véhicule, car cette action n'est pas effectuée systématiquement à chaque roulage. Il lui est par ailleurs demandé d'atteindre si possible une vitesse définie, sur certaines portions du circuit.

La commande optimisée est activée une fois sur deux (sans que le conducteur en soit informé), pour s'affranchir dans la mesure du possible de l'évolution des conditions de conduite : conditions météorologiques, conditions de circulation, degré d'apprentissage du conducteur ...

5.Optimisation sur une durée infiniment courte.

5.1.Introduction.

La stratégie de commande qui est exposée optimise un critère sur une durée correspondant à une période d'échantillonnage de l'UCVE¹. Cette commande satisfait à la nécessité d'éliminer l'influence de la réaction du conducteur sur le critère. Il faut néanmoins garder à l'esprit que l'augmentation de l'autonomie du véhicule sur une durée plus importante n'est pas garantie, et ne peut être mise en évidence que lors de simulations et d'essais en roulage.

La commande qui est obtenue ne fait pas intervenir de phénomènes dynamiques, et ne nécessite donc pas de modèle inverse du conducteur. Le choix de la commande optimale se résume donc à un problème de minimisation d'une fonction à une variable : le couple Γ^* . Celui-ci étant directement disponible dans l'UCVE, la réalisation de la commande est donc relativement simple.

5.2.Algorithme.

L'algorithme d'optimisation qui a été retenu consiste à calculer la valeur du critère pour l'ensemble des valeurs possibles de couple, à vitesse donnée. Le couple de commande est celui qui correspond à la valeur minimum du critère : il est déterminé par un algorithme de tri.

Le couple optimal n'est fonction que du couple de consigne conducteur Γ_c et de la vitesse du véhicule. Cet algorithme de tri peut être mis en oeuvre par un calcul préalable sur ordinateur. On obtient ainsi une cartographie associant à tout point (Γ_c, V) un couple optimisé Γ^* . L'algorithme implanté sur le calculateur du véhicule et exécuté en temps réel se résume alors à un programme d'interpolation.

La Figure 2.12 représente la cartographie associant au courant de couple de consigne du conducteur et à la vitesse, le courant de couple de consigne optimisé.

¹ Unité de Contrôle du Véhicule Electrique

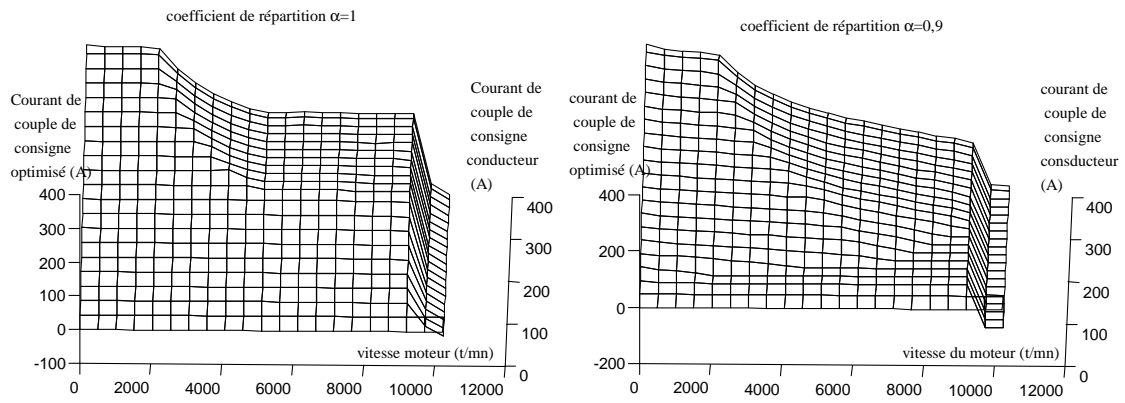


Figure 2.12. Cartographie de commande, avec le critère puissance / écart de consigne (J_{Γ_2}).

La cartographie obtenue est modifiée de sorte que le courant de couple maximum fourni par la commande soit égal au courant de couple maximum accepté par le moteur. Cette modification permet de garantir que toute la plage de fonctionnement du motovariateur est conservée : l'enfoncement maximum de la pédale d'accélérateur associe le même couple quelle que soit la commande et son type de réglage.

La Figure 2.13 illustre l'influence de cette commande au cours d'un cycle de vitesse.

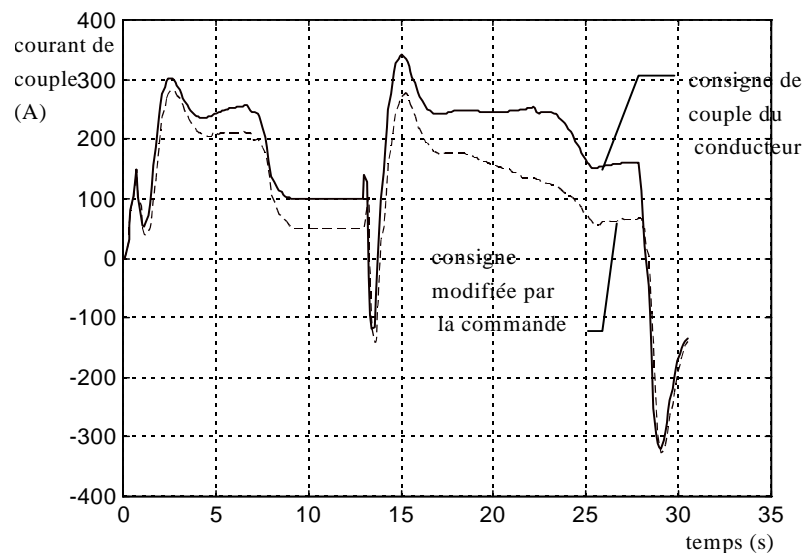


Figure 2.13. Modification de la consigne du conducteur sur un cycle de vitesse

5.3.Evaluation en simulation.

5.3.1. Introduction

Les simulations sont effectuées avec le simulateur sur un cycle de vitesse représentatif d'un circuit urbain. Trois types de conducteurs sont simulés : lent ($K_{\text{activité}}=0,4$), moyen ($K_{\text{activité}}=0,6$) et rapide ($K_{\text{activité}}=0,8$). Le compromis est paramétré par le coefficient α . On rappelle que les résultats trouvés pour $\alpha = 1$ correspondent à la commande sans GCO.

Pour mesurer la dégradation de l'agrément de conduite (non respect de la consigne), le temps mis pour effectuer le cycle et l'écart-type moyen² de vitesse par rapport à la consigne de vitesse sont évalués.

5.3.2. Commande avec un critère optimisant l'autonomie.

La Figure 2.14 représente l'influence de la commande sur les performances de la conduite. On constate que l'écart-type de vitesse, et que le temps mis pour effectuer le cycle augmentent lorsque α diminue (diminution du poids de l'écart de consigne dans le critère).

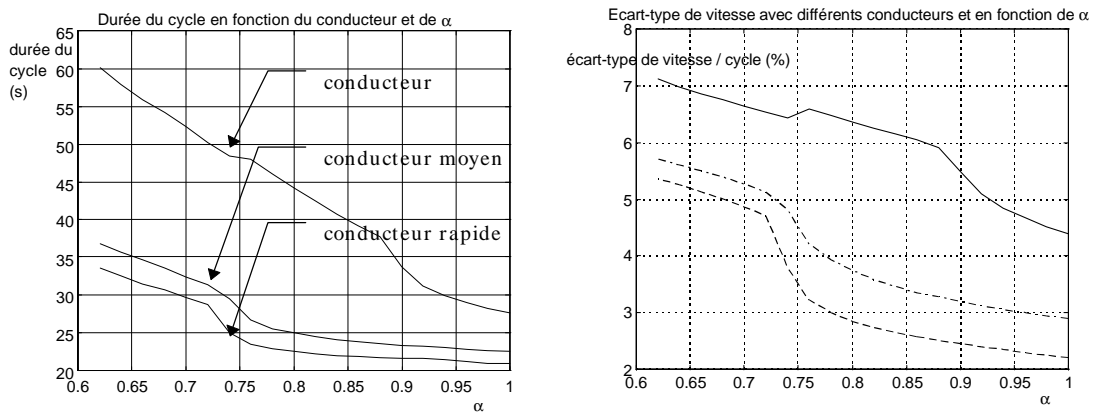


Figure 2.14. Influence de la commande sur la conduite.

En revanche, l'autonomie estimée du véhicule (Figure 2.15) n'augmente significativement que pour le conducteur lent. Ses réactions ont peu d'influence sur la commande. Les conducteurs moyen et rapide arrivent globalement à contrecarrer la commande.

² Moyenne sur le temps de la racine carrée de l'écart quadratique de la vitesse par rapport à la consigne.

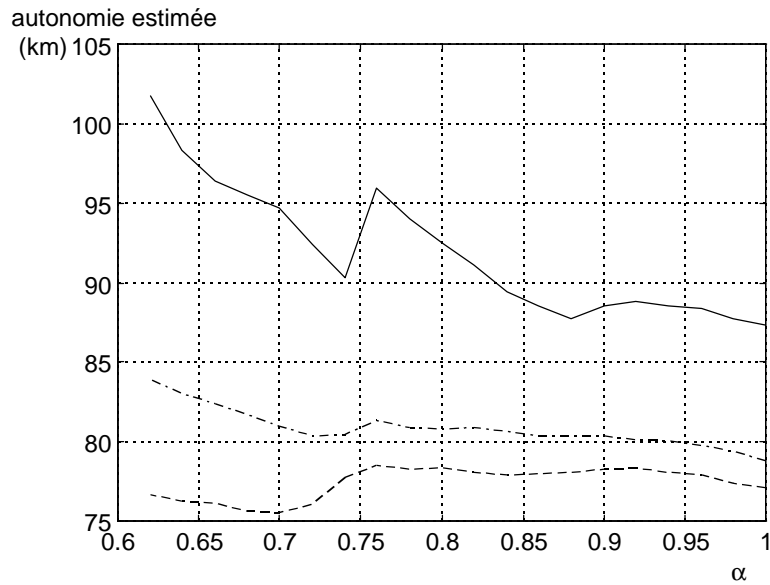


Figure 2.15. Influence de la commande sur l'autonomie prévisible.

Cette commande optimisée n'amène de résultats probants que pour $0,95 \leq \alpha \leq 1$.

5.3.3. Commande avec un critère optimisant le rendement (J_{Γ_3}).

La Figure 2.16 représente l'influence de la commande optimisant le rendement sur les performances de la conduite. On constate que l'écart-type de vitesse et que le temps mis pour effectuer le cycle tendent à converger, quel que soit le conducteur, lorsque α diminue.

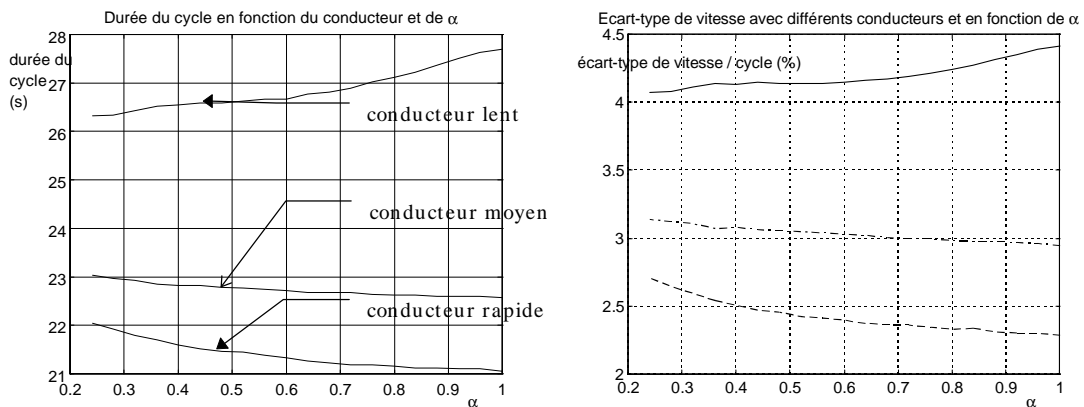


Figure 2.16. Influence de la commande sur la conduite.

On constate sur la Figure 2.17 que le même phénomène se produit au niveau de l'autonomie prévisible.

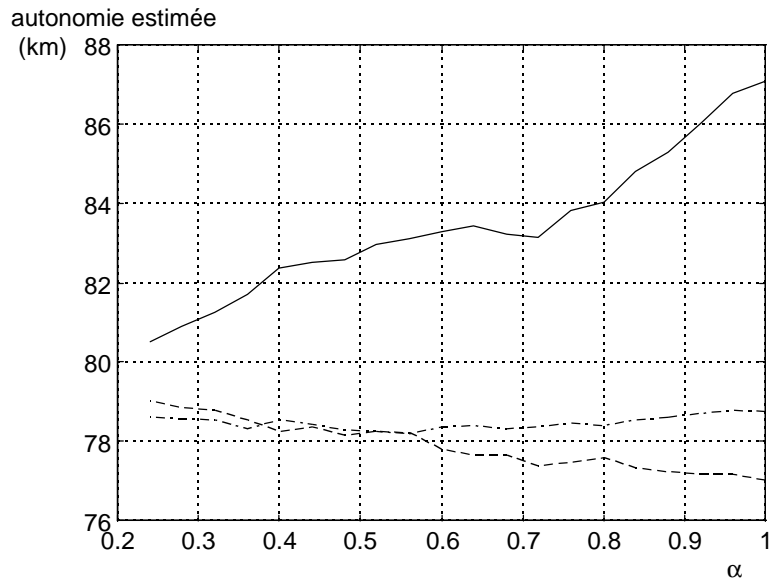


Figure 2.17. Influence de la commande sur l'autonomie prévisible.

Ces résultats s'expliquent par le fait que la commande tend à amener le couple moteur vers le couple de meilleur rendement lorsque $\alpha \rightarrow 0$. Il correspond à un couple de valeur intermédiaire (Figure 2.18). Par conséquent, quand le couple de consigne est supérieur à cette valeur, le couple est diminué, et inversement.

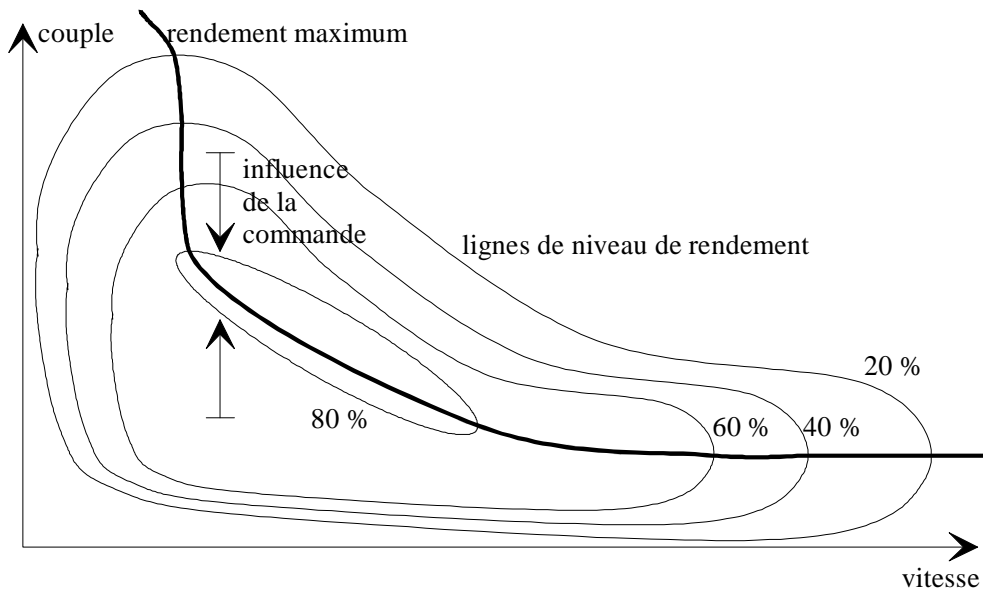


Figure 2.18. Rendement du motovariateur en fonction du couple et de la vitesse.

Cette commande présente l'intérêt de diminuer les variations de l'autonomie du véhicule entre différents types de conducteurs, mais n'apporte pas de gain d'autonomie significatif. En particulier, l'autonomie diminue pour un conducteur lent.

5.3.4. Commande avec un critère minimisant la puissance (J_{Γ_2}).

La Figure 2.19 représente l'influence de la commande minimisant la puissance sur les performances de la conduite. On constate que l'écart-type de vitesse et que le temps mis pour effectuer le cycle tendent à augmenter, quel que soit le conducteur, lorsque α diminue.

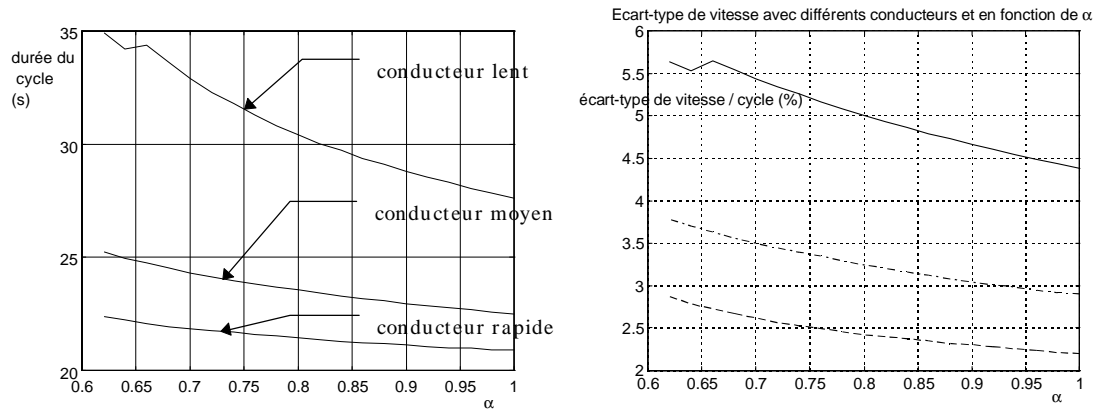


Figure 2.19. Influence de la commande sur la conduite.

Le même phénomène se produit au niveau de l'autonomie prévisible (Figure 2.20)

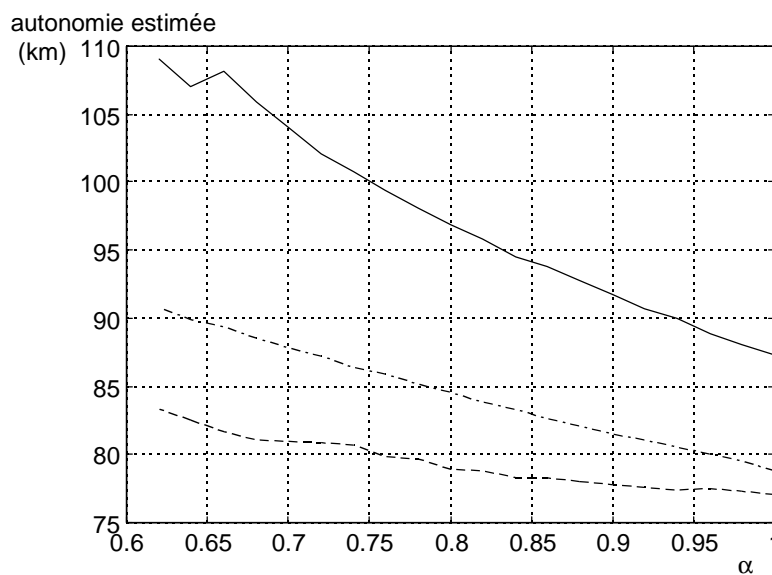


Figure 2.20. Influence de la commande sur l'autonomie prévisible.

Cette commande améliore uniformément l'autonomie de 5% à 15% en fonction du conducteur. Les gains sont très appréciables, surtout pour le conducteur lent.

C'est pour cette raison que cette loi de commande a été retenue et implantée sur le véhicule, pour faire l'objet d'essais en conduite.

5.4.Evaluation en essais.

Pour des raisons pratiques, les essais se sont déroulés sur deux circuits. La valeur de α a été fixée à 0,85 pour le premier circuit, et à 0,96 pour le second circuit.

La longueur du premier circuit urbain (circuit 1) est de 12,7 km. Quatre conducteurs différents ont pu effectuer 30 essais, soit 381 km. La Figure 2.21 montre l'ensemble des résultats en Wh/km avec et sans la commande qui optimise le critère (GCO).

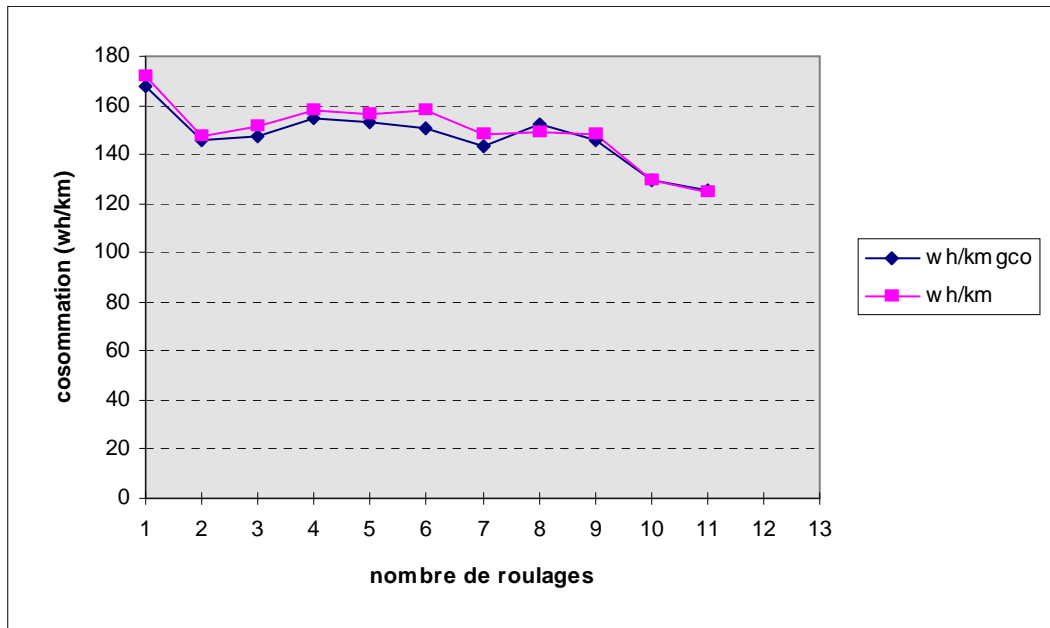


Figure 2.21. Consommation (en Wh/km) avec et sans gestion de consigne optimisée (GCO) pour le circuit 1.

Le Tableau 2.1 détaille les consommations, pour les différents conducteurs. Les conducteurs 1 et 2 sont des conducteurs expérimentés de véhicule électrique : le gain de consommation est faible voir négatif. En revanche, pour les conducteurs 3 et 4 qui sont occasionnels, le gain de consommation est supérieur à 4%. Dans tous les cas, l'écart-type de consommation est fortement diminué. La moyenne de la durée du cycle est inchangée avec et sans GCO, et égale à 0,41 h.

	conducteur 1	conducteur 2	conducteur 3	conducteur 4	total
nombre de roulages	14	4	6	6	30
moyenne du gain	1,28%	-0,32%	4,60%	4,31%	2,34%
ecart-type conso GCO	11,84827421	4,871175099	1,437441612	4,418203158	3,98
ecart-type sans (Wh/km)	13,12359126	8,512296194	7,183704263	5,550078854	10,27

Tableau 2.1. Résultats du roulage sur le circuit 1.

La longueur du second circuit urbain (circuit 2) est de 18,5 km. Le conducteur 1 a effectué 22 essais, soit 407 km. La Figure 2.22 compare la consommation en Wh/km avec et sans la commande qui optimise le critère (GCO).

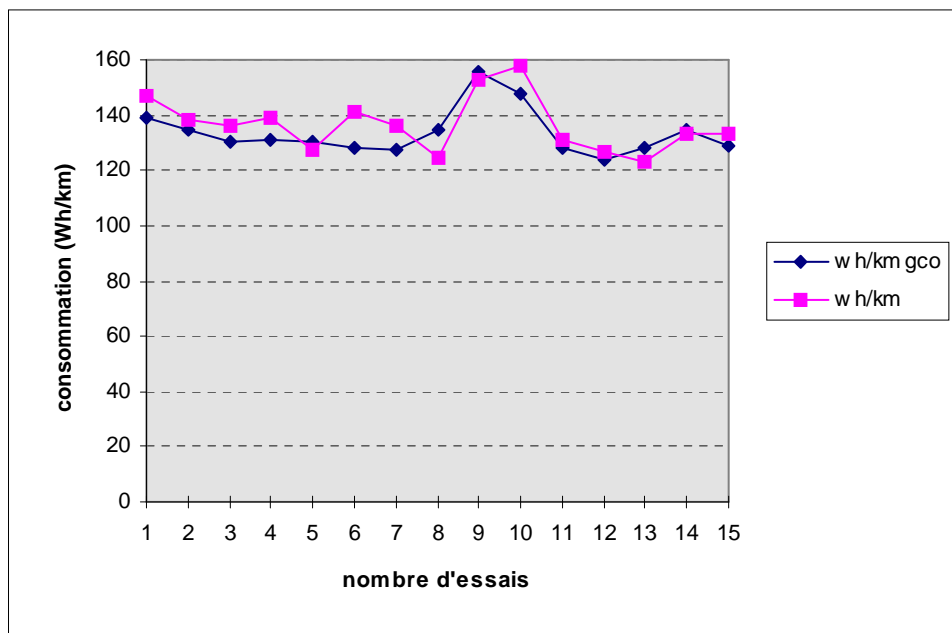


Figure 2.22. Consommation (en Wh/km) avec et sans gestion de consigne optimisée (GCO) pour le circuit 2.

La moyenne du gain de consommation est de 1,47%, alors que l'écart-type diminue de 13,1 à 11,6 Wh/km avec la GCO. La durée mise pour parcourir le cycle est diminuée de 0,7% avec la GCO avec 0,62 h.

5.5.Bilan.

En conclusion, la tendance d'augmentation de l'autonomie avec la GCO semble être confirmée par les essais. Pour $\alpha = 0,96$, le gain moyen était de 1,2% en simulation (en moyenne pour les trois types de conducteurs), pour 1,5% en essais. Pour $\alpha = 0,85$, ce gain passe à 4,7% en simulation pour 2,3 % en essais. La commande implantée apporte de manière régulière un gain de l'ordre de 2 %, sans dégradation notable des performances.

D'autre part, la disparité de consommation est réduite systématiquement, ce qui présente l'intérêt de garantir de manière plus sûre la valeur de l'autonomie du véhicule.

6.Optimisation sur une trajectoire de vitesse.

6.1.Introduction.

Pour effectuer une optimisation sur une trajectoire de vitesse, donc sur une durée plus longue que dans le chapitre précédent, plusieurs hypothèses doivent être faites.

Hypothèse 1 :

On peut trouver un modèle inverse du conducteur.

A partir de la consigne de couple Γ_c imposée par le conducteur et de la vitesse du véhicule, la commande est capable de reconstituer la consigne de vitesse V^* .

Hypothèse 2 :

La classe de trajectoire de consigne de vitesse est connue.

Par exemple, sur le simulateur on sait que la consigne comporte des rampes.

Dans le cadre de l'hypothèse 1, le conducteur est virtuellement supprimé de la boucle, et le problème est posé directement en termes de « suivi optimal » d'une classe de trajectoires de vitesse.

Hypothèse 3 :

Le système est linéaire ou peut être linéarisé.

Dans ce cas, si on adopte un critère quadratique, la commande obtenue est un retour d'état portant sur le vecteur d'état du système et le vecteur d'état correspondant à la consigne de vitesse.

6.2.Choix du critère.

6.2.1.Choix de la durée d'optimisation.

6.2.1.1.Durée finie.

Une commande de type linéaire quadratique fournit dans le cas général des gains de retour d'état variables en fonction du temps.

Une optimisation du critère sur une durée finie T peut se faire de deux manières.

La première solution consiste à déterminer une suite de gains aux temps $n.T$. Ces gains sont alors appliqués pendant cette durée. Il existera donc une discontinuité de la valeurs des gains aux raccordements, qui produiront une variation de la consigne de couple. Ce type de commande n'est donc pas acceptable au niveau du confort de conduite.

Une seconde solution consiste à effectuer une optimisation glissante. Une séquence de gains est déterminée à tout instant, par optimisation du critère sur une durée T . Le gain du retour d'état est choisi parmi la séquence qui a été déterminée. Par exemple, le gain choisi peut être le premier de la séquence. La minimisation n'est alors plus garantie sur la durée T d'optimisation du critère.

En conclusion, aucune de ces solutions n'est satisfaisante pour l'application considérée.

6.2.1.2.Durée infinie.

En optimisant le critère sur une durée infinie, on obtient une commande par retour d'état avec des gains constants. La notion de durée infinie correspond à un temps important devant le temps mis par le système (incluant le retour d'état) pour retourner à l'équilibre. D'autre part, le fait de choisir des gains fixes permet de limiter la quantité de calcul nécessaire. En effet, le processus d'optimisation permettant d'obtenir les gains du retour d'état est effectué hors ligne. La commande implantée sur véhicule utilise les gains qui sont préalablement calculés.

6.3.Elaboration de la commande optimale.

6.3.1.Introduction.

Le critère J qui est optimisé sur une durée infinie est quadratique et comporte un terme croisé. Il assure un compromis entre l'erreur de suivi de la consigne de vitesse, la puissance consommée et l'amplitude du couple appliqué.

On rappelle que ce critère s'exprime sous la forme :

$$J = \int_0^T (u^T R u + (y - y_{réf})^T Q' (y - y_{réf}) + 2y^T S' u) dt$$

La linéarisation du système permet de déterminer analytiquement le couple optimisant ce critère. La solution se déduit de la résolution du problème standard du régulateur optimal. Nous allons exposer la solution de ce problème dans sa forme générale. Nous nous ramènerons ensuite à un problème de suivi de trajectoire de classe connue, avec un critère ayant une composante croisée.

6.3.2. Commande du régulateur d'un système linéaire minimisant un critère quadratique (LQ).

Soit un système linéaire défini par ses équations d'état

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.17).$$

L'objectif poursuivi consiste à déterminer une commande ramenant le système à l'équilibre (régulateur) en minimisant le critère suivant :

$$J = \int_0^T (u^T R u + x^T Q x) dt \quad (2.18).$$

Avec R et Q des matrices symétriques définies non négatives.

Cette commande assure un compromis entre la vitesse de retour à 0 de x (pondération assurée par Q), et l'amplitude de la commande (pondération assurée par R).

L'entrée du système u^* minimisant J vérifie [Fau -Rob 84] [Tak -Rab 72]:

$$u^* = -R^{-1} B^T P \cdot x. \quad (2.19).$$

La commande obtenue est donc un retour d'état avec un gain variable fonction de $P(t)$ qui est la solution de l'équation de Riccati :

$$-\dot{P} = PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q \quad (2.20).$$

Cette équation est intégrée de T à 0 en temps inverse. Dans notre cas, l'état final de x étant libre, on a la contrainte suivante sur P :

$$P(T) = 0 \quad (2.21).$$

Lorsque $T \rightarrow \infty$, P converge vers une valeur constante lorsque le temps t est proche de 0 . La durée considérée infinie est en fait une durée grande devant la durée de convergence de l'équation de Riccati (Cf. Figure 2.23).

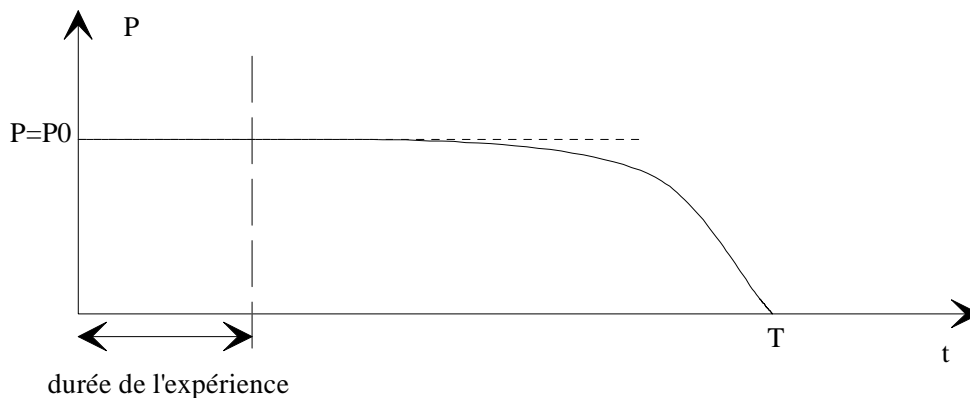


Figure 2.23. Convergence de P lorsque T tend vers l'infini.

Dans ce cas le gain K du retour d'état est fixe :

$$K = -R^{-1}B^T P_0 \quad (2.22).$$

6.3.3. Passage du problème de suivi de trajectoire à la forme standard LQ.

On suppose que la trajectoire de consigne appartient à une classe de référence connue (échelon, rampe ...) qui peut se mettre sous forme d'état. On peut alors écrire [And-Moo 90]:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Fz \\ y_{\text{réf}} &= Gz \end{aligned} \quad (2.23).$$

L'écart de vitesse s'écrit en fonction de x et z :

$$y - y_{réf} = Cx - Gz = \begin{bmatrix} C & -G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (2.24).$$

En posant $\hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$, le critère quadratique

$$J = \int_0^T \left(u^T R u + (y - y_{réf})^T Q' ((y - y_{réf})) \right) dt \quad (2.25).$$

s'écrit alors :

$$J = \int_0^T \left(u^T R u + \hat{x}^T \begin{bmatrix} C^T \\ -G^T \end{bmatrix} Q' [C \quad -G] \hat{x} \right) dt \quad (2.26).$$

On peut se ramener au problème standard en posant Q :

$$Q = \begin{bmatrix} C^T \\ -G^T \end{bmatrix} Q' [C \quad -G] = \begin{bmatrix} C^T Q' C & -C^T Q' G \\ -G^T Q' C & G^T Q' G \end{bmatrix} \quad (2.27).$$

et en considérant le système décrivant l'évolution de \hat{x} :

$$\dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & F \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2.28).$$

$$\text{Soit } \begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}u \\ y = \hat{C}\hat{x} \end{cases} \quad (2.29).$$

avec $\hat{C} = [C \quad 0]$.

L'équation de Ricatti de ce système devient alors :

$$\begin{bmatrix} \dot{P} & \dot{P}12 \\ \dot{P}21 & \dot{P}22 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P & P12F + A^T P12 - PBR^{-1}B^T P12 \\ P21A + F^T P21 - P21BR^{-1}B^T P & P22F + F^T P22 - P21BR^{-1}B^T P12 \end{bmatrix} + Q \quad (2.30).$$

Par ailleurs, le gain K du retour d'état est :

$$K^T = [K \quad K1] = -R^{-1}\hat{B}^T\hat{P} = -R^{-1}\begin{bmatrix} B^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & P12 \\ P21 & P22 \end{bmatrix} = -R^{-1}\begin{bmatrix} B^T P & B^T P12 \end{bmatrix} \quad (2.31).$$

La résolution de P et P12 est donc suffisante pour déterminer le gain du retour d'état du système :

$$\begin{cases} \dot{P} = PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + C^T Q' C \\ \dot{P}12 = P12F + A^T P12 - PBR^{-1}B^T P12 - C^T Q' G \end{cases} \quad (2.32).$$

La commande est décrite sur la Figure 2.24 :

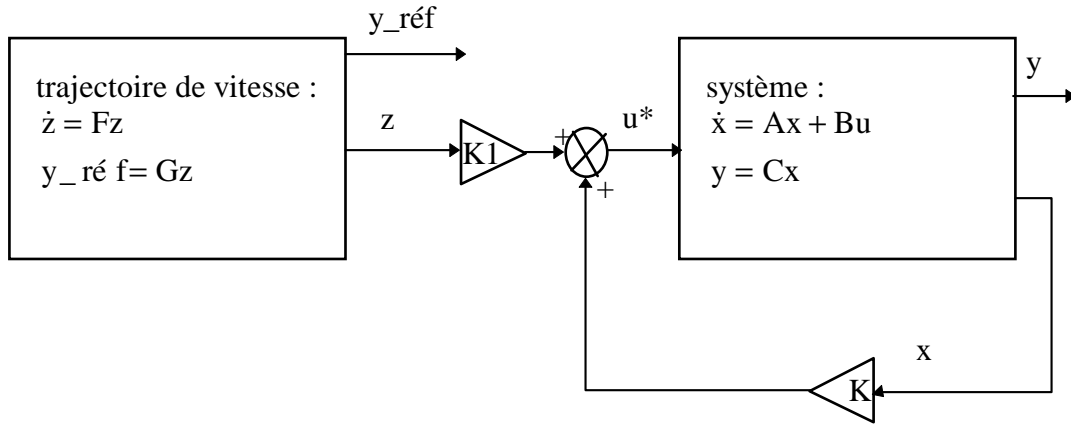


Figure 2.24. Réalisation du suivi de vitesse.

6.3.4. Transformation en problème standard LQ d'une commande optimisant un critère quadratique incluant un terme croisé.

En restant dans le cadre du problème de suivi, on peut optimiser un critère J incluant un terme croisé entre l'entrée et l'état :

$$J = \int_0^T (u^T R u + \hat{x}^T Q \hat{x} + 2\hat{x}^T S u) dt \quad (2.33).$$

On définit $\tilde{u} = u + M\hat{x}$

Dans ce cas [Ast -Wit 84], le critère J devient:

$$J = \int_0^T (\tilde{u}^T R \tilde{u} + \hat{x}^T (Q - 2SM + M^T R M) \hat{x} + 2\hat{x}^T (S - M^T R) \tilde{u}) dt \quad (2.34).$$

Le terme croisé se supprime pour

$$M^T = SR^{-1} \quad (2.35).$$

On en déduit une nouvelle expression du critère en fonction de \tilde{u} :

$$J = \int_0^T (\tilde{u}^T R \tilde{u} + \hat{x}^T (Q - SR^{-1}S^T) \hat{x}) dt \quad (2.36).$$

On est donc ramené au problème standard en modifiant A et Q :

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B(\tilde{u} - M\hat{x}) = (A - BM)\hat{x} + B\tilde{u} = \tilde{A}\hat{x} + B\tilde{u} \\ y &= \hat{C}\hat{x} \end{aligned} \quad (2.37).$$

$$\tilde{Q} = Q - SR^{-1}S^T \quad (2.38).$$

Il est à remarquer qu'une contrainte apparaît sur S : \tilde{Q} ne doit pas devenir négatif.

La résolution de l'équation de Ricatti fournit le gain du retour d'état optimal, calculé pour

\tilde{u}^* :

$$\tilde{u}^* = \tilde{K}\hat{x} \quad (2.39).$$

Donc :

$$u^* = (\tilde{K} - M)\hat{x}. \quad (2.40).$$

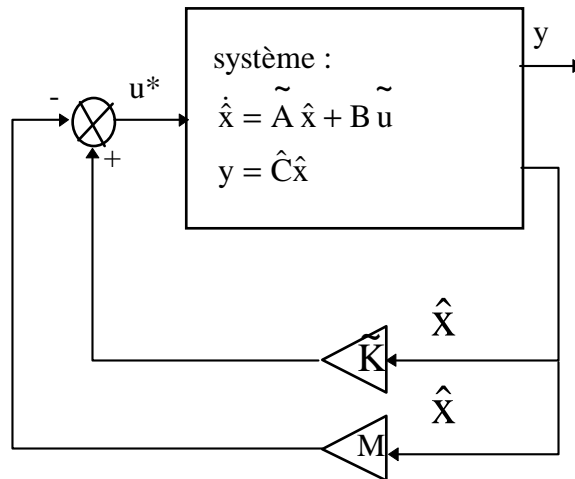


Figure 2.25. Réalisation du retour d'état optimisant un critère avec un terme croisé.

Dans le cas où le critère est de la forme :

$$J = \int_0^T (u^T R u + \hat{x}^T Q \hat{x} + 2y^T S' u) dt \quad (2.41).$$

On se ramène au problème précédent en posant

$$\mathbf{S} = \hat{\mathbf{C}}^T \mathbf{S}' \quad (2.42).$$

6.4. Réalisation de la commande.

6.4.1. Introduction.

Pour la synthèse de la commande, le modèle du véhicule est linéaire. Une classe d'appartenance de la consigne de vitesse est alors fixée. En supposant que l'on dispose d'un modèle inverse du conducteur, et que celui-ci est éliminé, on connaît la consigne de vitesse à partir de V^* . On reconstruit alors z à l'aide d'un observateur à partir de V^* . La structure de principe de la commande est représentée sur la Figure 2.26.

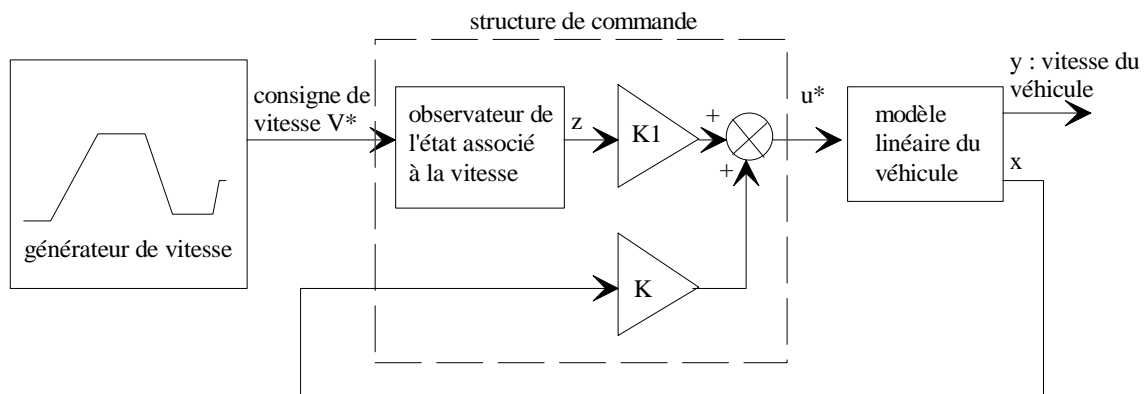


Figure 2.26. Structure de commande avec un modèle linéaire du véhicule.

Nous allons dans la suite détailler le modèle de la trajectoire et du véhicule linéarisé qui sont utilisés, et la manière dont les gains K et $K1$ sont déterminés.

6.4.2. Modèle de la trajectoire de référence.

Pour la synthèse de la commande, on suppose que l'ensemble conducteur / modèle du conducteur inverse est remplacé par un filtre du premier ordre (de constante de temps τ). Le conducteur a un temps de réaction non nul, et on peut aussi supposer que l'inversion du conducteur n'est pas instantanée.

D'autre part, la consigne de vitesse est une rampe : c'est l'hypothèse généralement adoptée pour les cycles de vitesse normalisés.

La classe d'appartenance de la consigne de vitesse est une rampe filtrée.

Les évaluations sur des cycles de vitesse sont effectuées avec le simulateur. Par conséquent, le modèle de conducteur est remplacé par le filtre du premier ordre en sortie du générateur de consigne.

Les équations décrivant z (variable d'état associée à la consigne de vitesse) sont :

$$\dot{z} = Fz = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \cdot z \quad (2.43).$$

$$y_{réf} = Gz = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} z$$

6.4.3. Modèle linéarisé du véhicule.

On rappelle que le modèle simplifié du véhicule est le suivant :

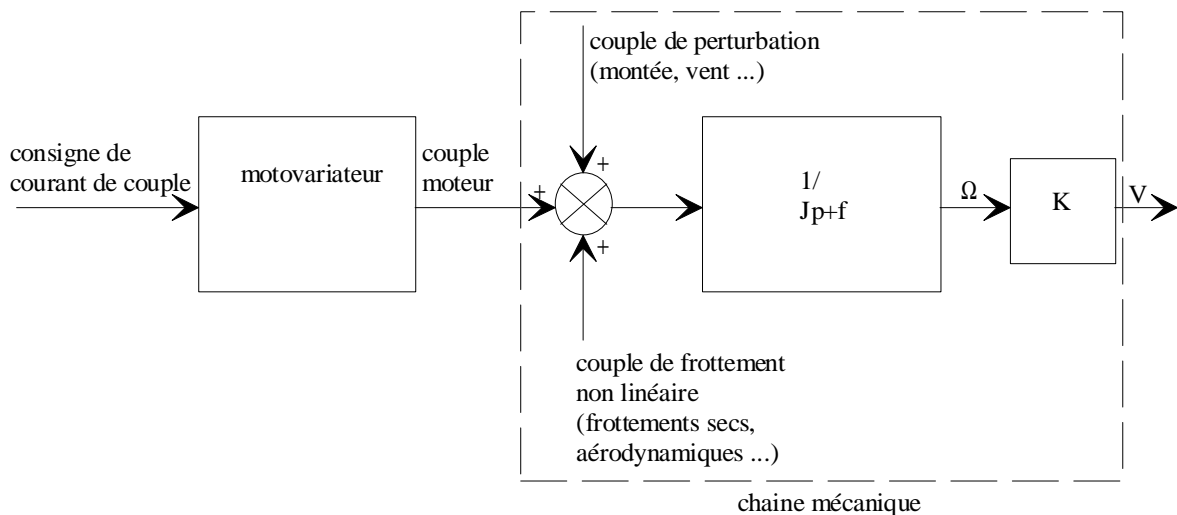


Figure 2.27. Modèle simplifié du véhicule.

J est l'inertie, f le coefficient de frottement visqueux du véhicule ramenés à l'arbre primaire et K le rapport de la vitesse aux roues sur la vitesse de rotation de l'arbre primaire.

Le modèle linéarisé du véhicule qui a été retenu est du second ordre. Cette modélisation correspond d'une part à la dynamique du motovariateur et d'autre part à celle de la mécanique.

La première constante de temps τ correspond à la réponse en couple de la commande et du moteur. L'entrée du motovariateur étant un courant de couple (voir la modélisation du chapitre 1), un module de linéarisation du couple doit être ajouté. En effet, la relation entre

le courant de couple et le couple n'est pas linéaire (défluxage ...). Cette linéarisation est réalisée à partir de l'interpolation d'une cartographie qui associe un courant de couple à chaque point de fonctionnement couple/vitesse.

La seconde constante de temps correspond à la constante de temps mécanique équivalente. Le modèle mécanique n'est pas linéaire : le couple résistant n'étant pas proportionnel à la vitesse. La Figure 2.28 représente le couple résistant du véhicule fonction de la vitesse et sa linéarisation. Celle-ci est effectuée à 800 rd/s (75 km/h).

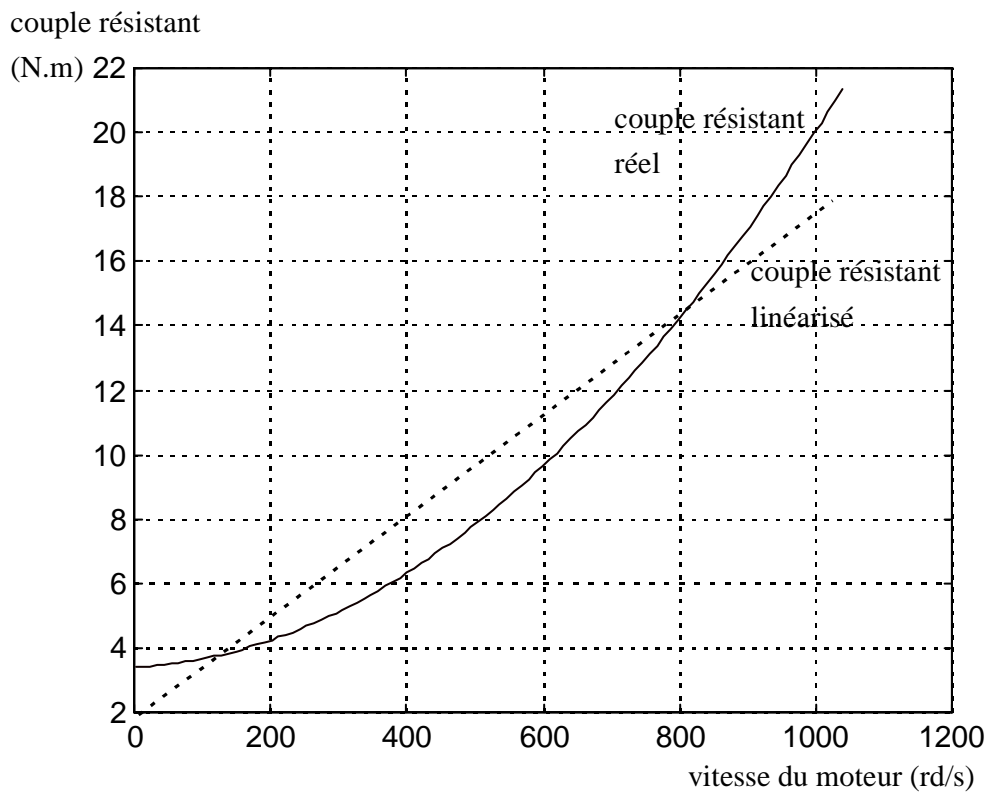


Figure 2.28. Linéarisation du couple résistant.

On obtient donc le modèle linéaire du véhicule :

$$\dot{x} = Ax + Bu = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau} & 0 \\ \frac{1}{J} & -\frac{f}{J} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2.44).$$

$$y = Cx = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} x$$

6.4.4. Détermination des gains de la commande.

Les matrices de pondération R , Q' et S' de la commande optimale ont été choisies de manière à ce que le comportement dynamique du véhicule avec un conducteur moyen soit reproduit dans l'ensemble (Figure 2.31). En effet, il faut garder à l'esprit que l'on a enlevé le conducteur de la boucle de vitesse avec un modèle inverse. Néanmoins, dans le cas d'une implantation réelle, celui-ci doit avoir l'impression qu'il contrôle le véhicule. Par conséquent, le choix de matrices de pondération conduisant à un fort gain d'autonomie en simulation, mais à un comportement inhabituel du véhicule serait probablement mis en défaut en situation réelle.

Le système d'équations de Riccati (2.32) est intégré numériquement (en temps inverse), sur une durée assez grande pour que les éléments de P et $P12$ convergent. La Figure 2.29 montre la convergence pour les matrices de pondération choisies. Sur un parcours supérieur à plusieurs minutes, la partie où les gains ne sont pas constants est négligeable (quelques secondes). L'optimisation sur une durée infinie est donc justifiée.

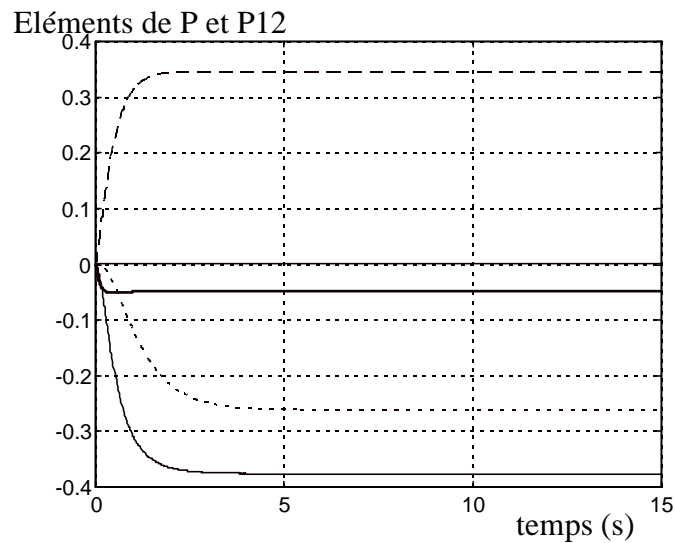


Figure 2.29. Intégration de l'équation de Riccati du système.

6.5. Evaluation du gain de consommation.

6.5.1. Introduction.

L'évaluation énergétique consiste à insérer la commande dans le simulateur. La consommation du véhicule est alors comparée à celle obtenue avec la commande optimisant le critère instantané puissance / écart à la consigne de couple.

6.5.2. Evaluation de la commande optimale intégrée dans le simulateur.

L'ensemble conducteur / modèle inverse du conducteur est remplacé par un filtre du premier ordre, avec une constante de temps égale à τ . Un observateur des variables d'état du système est ajouté. Il utilise la mesure de vitesse réelle pour reconstituer x .

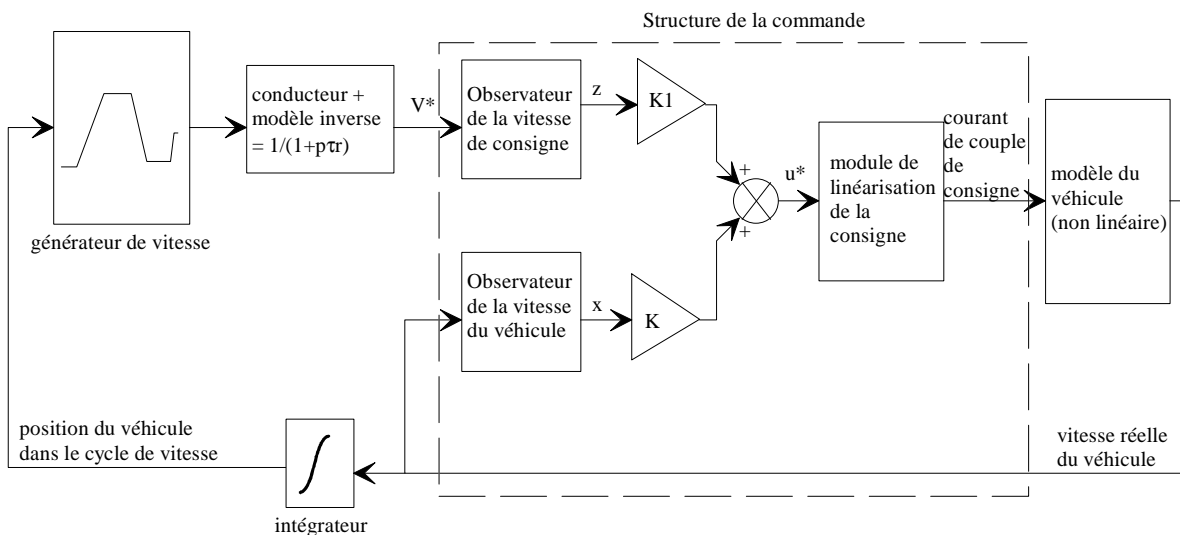


Figure 2.30. Intégration de la commande optimale dans le simulateur.

L'autonomie prévisible du véhicule avec la commande optimale est de 94 km, pour un écart-type moyen de vitesse de 2,05 m/s et une durée de cycle de 23,2 s. Ces résultats apportent un gain d'autonomie très important. En effet, en l'absence de commande optimale et en moyennant les résultats pour les trois conducteurs (lent, moyen, rapide), on obtient respectivement 81 km, 3,16 m/s et 23,6 s. Le gain d'autonomie est de l'ordre de 15 %, avec des performances dynamiques améliorées. Par rapport à la commande implantée sur véhicule, l'amélioration d'autonomie est donc supérieure à 10 %, pour une durée de cycle et un écart-type de vitesse équivalent.

La Figure 2.31 représente une portion de cycle de vitesse, avec et sans commande optimale.

La durée du cycle et l'allure de la réponse sont similaires.

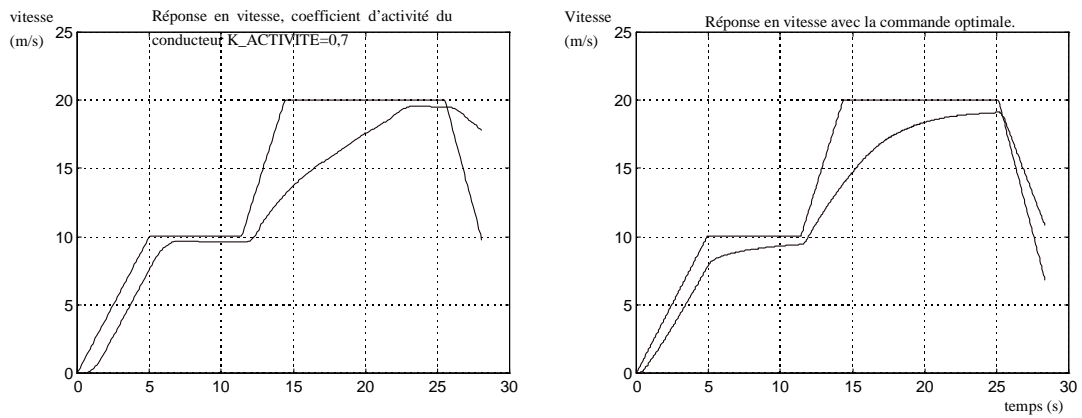


Figure 2.31. Réponse en vitesse avec et sans commande optimale sur une portion de circuit.

La Figure 2.32 montre une diminution globale de la consommation.

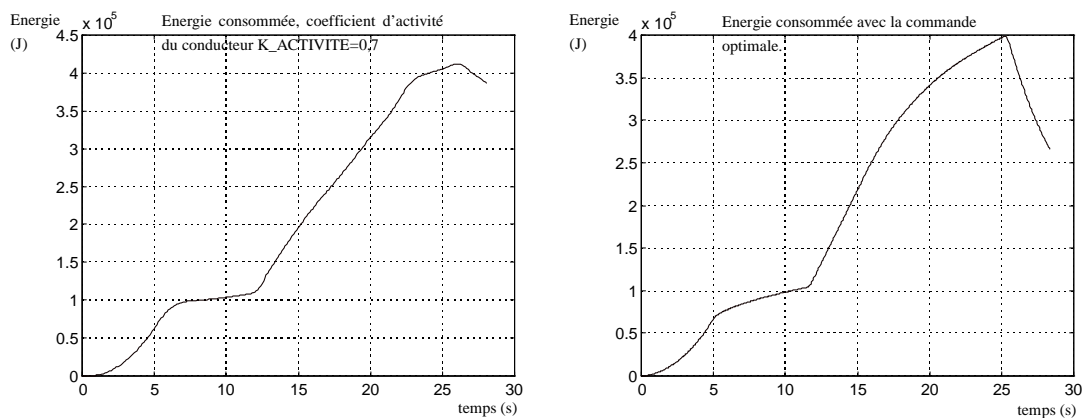


Figure 2.32. Consommation du véhicule avec et sans commande optimale.

6.6.Conclusion : limites de la structure de commande et perspectives d'amélioration.

L'intérêt de cette commande au niveau de l'amélioration de l'autonomie semble très important.

Néanmoins, nous avons fait l'hypothèse forte que le modèle du conducteur est inversible. Cette hypothèse est discutable. En effet, le conducteur n'est pas inversible structurellement : on ne peut pas savoir si celui-ci est en mode d'asservissement de vitesse ou d'accélération. En admettant qu'on le sache, il faudrait connaître son coefficient d'activité, qui est variable dans le temps pour un même conducteur.

Cette remarque est tempérée par le fait qu'en acceptant une erreur importante sur la consigne de vitesse, il est possible d'élaborer un modèle inverse de conducteur approché, donc de mettre en oeuvre cette structure de commande.

Enfin, cette commande peut être potentiellement améliorée en pondérant la matrice S (pondération de la puissance dans le critère) en tenant compte du rendement du véhicule, qui est variable en fonction de la vitesse. Ainsi, une table de gains K et $K1$ optimisée permettrait probablement d'améliorer encore l'autonomie du véhicule.

7.Conclusion.

Les lois de commande optimisant un critère sur une durée infiniment courte apportent un gain d'autonomie faible, mais constant au vu des essais et cohérents avec les prévisions effectuées en simulation. Ce type de commande a l'avantage de pouvoir être implanté facilement sur le véhicule : il se résume à interpoler une valeur dans une cartographie à deux dimensions.

Un deuxième type de commande plus évolué, permet d'assurer un asservissement de vitesse de manière optimale. Néanmoins, pour l'appliquer il faut disposer d'un modèle inverse du conducteur, ce qui n'est pas possible de manière rigoureuse. Si tel était le cas, il faut néanmoins garder à l'esprit que cette commande est d'un niveau de complexité supérieur à celles qui ont été implantées sur véhicule. L'algorithme nécessite un modèle inverse du conducteur, deux observateurs d'état, et un module de linéarisation.

Les perspectives de recherche vont dans deux directions.

La première direction consiste à valider et à améliorer la seconde loi. Des simulations doivent reproduire des conditions plus réalistes : recherche et mise en oeuvre d'un modèle inverse de conducteur. Des essais devront être ensuite effectués sur bancs à rouleaux, puis sur circuits. Enfin, cette loi peut être améliorée en tenant compte du rendement du motovariateur (utilisation de gains variables).

La seconde direction consiste à étudier les possibilités d'applications pour des véhicules sans intervention du conducteur, en connaissant éventuellement la trajectoire de vitesse.