

# Contrôle longitudinal hiérarchisé d'un véhicule automobile : application au cas d'une motorisation essence

Bilel BEN SLIMEN<sup>1,2</sup>, Philippe CHEVREL<sup>1</sup>, Mohamed YAGOUBI<sup>1</sup>, Jean-Emmanuel GUY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Recherche en Communications et en Cybernétique de Nantes, UMR CNRS 6597  
& Ecole des Mines de Nantes  
1, rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes, France.  
[bilel.ben-slimen@irccyn.ec-nantes.fr](mailto:bilel.ben-slimen@irccyn.ec-nantes.fr)

<sup>2</sup>PSA Peugeot Citroën  
Direction Technique et Industrielle  
18, rue des Fauvelles. 92250 La Garenne-Colombes, France.

**Résumé**— Ce papier propose une architecture de commande hiérarchisée du contrôle longitudinal. On retrouve au sein de cette structure un niveau haut dit *strate Groupe motopropulseur (GMP)* et un niveau bas dit *strate moteur*. A l'interface, la *strate moteur* interroge le niveau GMP sur le couple requis sur un horizon temporel donné, et décompose la demande en couples « lent » et « rapide ». Cette architecture permet également d'anticiper la demande en coordonnant les actions air/essence et de moduler en conséquence le couple fourni par un moteur à essence. Le concept est illustré au moyen d'un modèle simplifié, et en tenant compte des contraintes systémiques (recherche de généralité) et de consommation de carburant.

**Mots-clés**— contrôle moteur, moteur essence, commande hiérarchisée, contrôle avec anticipation.

## I. INTRODUCTION

À partir des années 90, on retrouve systématiquement au sein des véhicules un *contrôle moteur* conçu pour répondre à des contraintes systémiques préalablement définies. D'abord mis en œuvre autour des moteurs à essence (à partir de 1992), l'implantation de ce type de *contrôle moteur* a été généralisée aux moteurs diesels, avec pour motivation principale l'annonce de nouvelles restrictions d'émission de polluants [1].

Ainsi, en complément des systèmes de dépollution post-combustion (filtre à particules, pots catalytiques) le développement de nouvelles stratégies de contrôle moteur s'est avéré essentiel dans la recherche d'une efficacité accrue en termes de dépollution [1]. Ceci a représenté une opportunité pour l'amélioration d'autres prestations fondamentales telles qu'une consommation réduite ou l'agrément de conduite.

Dans le but de réduire d'une part la complexité du contrôle et de favoriser d'autre part la structuration des contrôles moteur, on retrouve au sein de ces derniers une décomposition stratifiée s'articulant autour de deux niveaux [2]. Le niveau haut, connu sous le nom de *strate groupe motopropulseur (GMP)*, a pour objet de traduire la demande formulée par le conducteur (enfoncement sur la pédale d'accélération), les accessoires véhicule (climatisation, vitres électriques, direction assistée, ...) et les diverses fonctions de

contrôle (régulation de ralenti, régulation de la vitesse véhicule, correcteur de trajectoire (ESP), ...) sous forme d'une consigne de couple. Le niveau bas, dénommé *strate moteur*, prend en charge le contrôle rapproché des actionneurs et s'assure de la gestion optimale des différents contributeurs, conformément à la demande en couple émise par le niveau supérieur.

La structuration actuelle est construite sur la base d'une conception descendante du contrôle moteur et s'apparente macroscopiquement à une configuration top-down : la *strate GMP* transmet les demandes de couple vers la *strate moteur* sans se préoccuper de leurs modes de réalisations.

Plusieurs stratégies cohabitent au sein de cette architecture de contrôle et permettent, pour certaines d'entre elles, d'anticiper les sollicitations de couple en liant les fonctions GMP aux fonctions moteur. Si elles garantissent une meilleure disponibilité du couple moteur, elles peuvent dans certaines situations de vie induire une surconsommation de carburant conséquente.

Historiquement, les contrôles moteurs étaient développés selon une approche organique [3]. Ils ont par la suite été développés de manière découplée pour les moteurs essences et diesels. Les stratégies d'anticipation de la demande de couple n'échappent pas à cette règle et sont naturellement spécifiques à chaque type de motorisation.

L'enjeu consiste alors à proposer une nouvelle architecture de commande générique essence/diesel du producteur de couple, construite autour d'une approche fonctionnelle plutôt qu'organique, qui garantirait malgré tout des performances globales irréprochables. C'est la cible de ce papier et sa principale contribution que de proposer une telle architecture et d'analyser sa pertinence sur la base de modèles aussi simples que possibles.

## II. FONCTIONNEMENT DU CONTROLE MOTEUR

### A. Fonctionnement et actionneurs du moteur

On retrouve au sein d'un moteur à allumage commandé trois actionneurs prépondérants pour la production du couple moteur appliqué sur le vilebrequin : l'actionneur air et essence modulent respectivement la quantité de comburant et de

carburant injectée dans les cylindres ; l'actionneur dénommé avance contrôle quant à lui l'instant (versus l'angle) d'allumage dans la chambre de combustion [4].

- Actionneur air

L'air est le comburant caractérisant le phénomène de combustion retrouvé au sein de tout moteur thermique. De ce fait, le couple moteur produit en sortie du moteur (résultant de la combustion) est directement fonction de la quantité d'air frais présente dans les cylindres. Cette dernière quantité est modulée grâce à un dispositif d'admission de l'air, localisé au niveau de la tubulure d'admission de ce fluide et correspond concrètement à un boîtier papillon motorisé (levée variable des soupapes) commandé en position. Le débit d'air résultant varie avec une dynamique basse fréquence conséquence du contrôle en position du papillon motorisé et du phénomène de remplissage du moteur (dynamique du collecteur d'admission) liée à la capacité du collecteur d'admission. On retrouve aussi d'autres dynamiques hautes fréquences à l'admission, causées par le pompage moteur ainsi que l'ouverture et la fermeture des soupapes générant une onde de pression acoustique.

À partir de là une synchronisation entre les actions du moteur et le pilotage du papillon motorisé s'impose afin de réaliser le couple désiré [5]. C'est ainsi que la dynamique de l'actionneur air est corrélée avec celle du dispositif d'admission et correspond à une dynamique de premier ordre dont la constante de temps avoisine les 150ms. Cette dernière dynamique provoque cependant un filtrage important des actions moteur pénalisant le temps de réponse du producteur de couple.

- Actionneur essence

En complément de la quantité de comburant admise, le moteur thermique est alimenté en essence au moyen d'un dispositif d'injection dont la précision conditionne les performances en terme de consommation et pollution. On retrouve ainsi un système d'injection électronique placé soit dans le collecteur d'admission, soit directement dans les cylindres (injection indirecte et directe). Dans le cas d'un moteur fonctionnant en mode de combustion homogène, la valeur de la richesse doit avoisiner 1, obtenue pour un rapport air carburant dit stochiométrique [4].

$$\lambda = AFR / AFR_{stoch} \quad (1)$$

avec  $AFR$  : rapport air-carburant instantané

et  $AFR_{stoch} = 14.7$  : rapport air-carburant stochiométrique.

La régulation de richesse vise justement cet objectif en s'appuyant sur les mesures fournies par la sonde lambda et la quantité d'air voire la quantité de carburant. Si  $\lambda > 1$ , la quantité de carburant est en deça de la quantité garantissant la stochiométrie du mélange et on dira alors que le mélange en question est pauvre. Si  $\lambda < 1$ , le mélange est dit riche.

Le temps de réponse du dispositif d'injection est quasi instantané [5].

- Actionneur avance

Une fois que le mélange air carburant est présent à l'intérieur de la chambre de combustion, l'inflammation du combustible résulte de l'étincelle, émanant de la bougie. L'action de ce contributeur est corrélée avec la position angulaire du vilebrequin, qui reflète le degré d'avance du piston dans le cylindre relativement au point mort haut (PMH). Au sein du cycle thermodynamique d'un moteur essence, l'instant d'allumage est réalisé pour une position du

piston inférieure au PMH, marquant successivement l'achèvement de la phase de compression et le début de la phase de détente. La modulation de cet instant impacte directement la température et la pression dans les cylindres, et par conséquent le couple moteur obtenu en sortie. L'action de ce contributeur dépend de la vitesse de rotation du vilebrequin (régime moteur) [6]. Ainsi, pour un régime moteur et un mélange air carburant donnés, il existe un instant optimal pour l'application de l'étincelle, qui permet d'avoir un couple maximal en sortie tout en évitant l'auto inflammation par compression (cliquetis). On dira alors que ce dernier couple a été obtenu pour une avance optimale. Si l'instant d'allumage diffère de cette valeur, le couple moteur produit sera réduit au prix d'un surplus de consommation de carburant (dégradation de l'avance).

La dynamique de cet actionneur est assimilable à un retard pur dont la valeur  $T_k$  correspond au temps séparant deux points morts hauts successifs. Il est donc variable en fonction du régime moteur  $N_e$  [5]. Dans le jargon automobile, on a coutume de désigner abusivement cet intervalle par : 1PMH. Par rapport à la position angulaire du vilebrequin deux points morts hauts successifs sont séparés d'un angle  $\Theta = 4\pi/n$  si  $n$  est le nombre de cylindres du moteur.

Par la suite, le temps  $T_k = t_k - t_{k-1}$  séparant deux PMH se

$$\text{dédit de l'égalité : } 2\pi/60 \int_{t_{k-1}}^{t_k} N_e(\tau) d\tau = \Theta \quad (2)$$

avec  $t_k$  est l'instant du  $k^{\text{ième}}$  PMH.

Pour un moteur à quatre cylindres et sous hypothèse d'un régime moteur constant, une approximation est obtenue selon :

$$T_k = 30 / N_e(t_k) \quad (3)$$

La quantité d'air admise étant liée à la quantité de carburant injectée (contrainte algébrique en mode de combustion homogène), la dynamique de couple dominante résultante est celle de l'actionneur air.

Finalement, deux moyens d'actions macroscopiques se dégagent pour moduler le couple : le premier appelé ici *actionneur air-essence* module le mélange air/essence et possède une dynamique lente. Le second dit *actionneur avance* détermine l'instant d'allumage et possède une dynamique rapide mais limitée en amplitude et un coût élevé (pollution, consommation).

## B. Contrôle moteur essence traditionnel

En fonction de la situation de vie et des demandes de couple formulées par les accessoires du véhicule et les diverses fonctions de contrôles, le premier niveau de contrôle véhicule transmet simultanément les consignes de l'actionneur air-essence et avance, en décomposant explicitement ou non les sollicitations en terme de couple lent (à réaliser par l'air) ou rapide (à réaliser par modification de l'avance). La réalisation du couple lent et rapide fait en réalité elle-même appel à de nombreux actionneurs (papillon motorisé, turbo etc.) pilotés par le contrôle rapproché des actionneurs (strate moteur) au moyen de cartographies préalablement calibrées dans la pratique ([2],[7],[8]).

De manière pratique, une mesure de la charge (mélange air/carburant) est effectuée au sein des cylindres et conduit à une estimation du couple moteur maximal susceptible d'être produit en cas d'application d'un angle d'avance à l'allumage optimal. Le pilotage de l'angle d'avance permet alors de fixer un rendement dégradé ou non permettant de moduler le couple. Dans certaines situations, une marge est même prise en dégradant préventivement l'avance à l'allumage, et ce de manière à permettre un incrément de couple rapide le moment venu (obtenu quasi-instantanément en rétablissant une avance optimale) [9]. Sur le schéma de la figure 2, ceci correspond explicitement à augmenter la consigne de couple air sans introduire de modification, en parallèle, sur la valeur de la consigne de couple avance (phase dite *réserve de couple*). Il faut dire qu'une imprécision sur la correction du couple instantané pourrait impactée négativement le couple moteur alors qu'une imprécision sur la même grandeur, obtenue lors de la phase de réserve de couple, n'aura, sans doute, pas de conséquences néfastes sur le couple moteur. La figure 2 explicite l'architecture classique du contrôle moteur dans le cas d'une configuration essence.

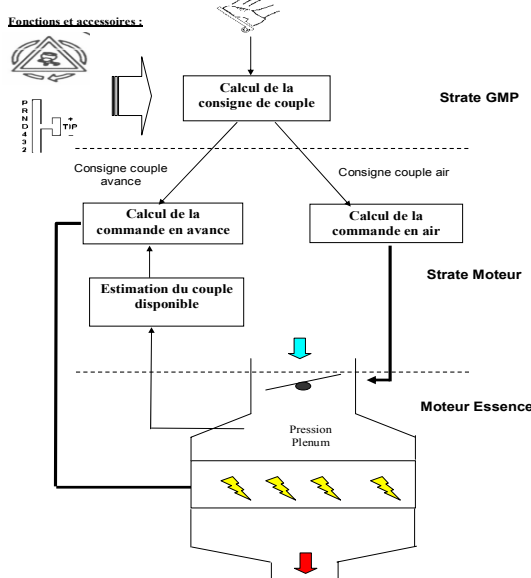


fig2. Pilotage en couple du moteur essence [9]

Dégrader l'avance à l'allumage conduit naturellement à des performances sous optimales : le couple instantané produit est inférieur au couple maximal disponible (d'où une surconsommation de carburant). Cette action ne doit être utilisée qu'à bon escient. La gestion de cette contrainte représente l'un des points dur du contrôle moteur.

Actuellement, la pratique consiste par exemple, au ralenti, à dégrader systématiquement le rendement d'avance de 20% afin de permettre une réactivité accrue à une demande soudaine de couple et éviter ainsi le calage du moteur.

La réserve de couple est aussi privilégiée pour la préparation de l'enclenchement du groupe moto-ventilateur ou de la climatisation, ou encore lors de la détection d'une phase de manœuvre (couple sollicité par la direction assistée) ou d'un décollage imminent. L'anticipation des demandes de couple est également privilégiée lors d'un changement de rapport (couple sollicité par le contrôle de la boîte de vitesses automatique).

C'est bien l'objectif de ce papier que de proposer une stratégie dégradant aussi peu que possible l'avance à l'allumage tout en répondant positivement aux demandes de transitoires rapides de couple. Il importe alors de connaître de manière (légèrement) anticipée ces demandes afin de constituer la « réserve de couple » juste nécessaire, en anticipant la demande par une admission d'air accrue compensée par une avance à l'allumage dégradée.

### III. VERS UNE ARCHITECTURE DE CONTROLE HIERARCHISEE

Comme évoqué dans la section II.B, les contrôles moteurs actuels font déjà appel à une structure macroscopique hiérarchisée constituée d'une strate GMP et d'une strate moteur. La réalité est sensiblement différente vu qu'on retrouve des connexions entre strates ne permettant pas une démarche de conception générique essence/diesel.

Partant de l'architecture classique des contrôles moteurs et s'inspirant des concepts de la commande hiérarchisée [10] incluant un étage de prédiction [11]-[12], la solution visée adopte une décomposition fonctionnelle compatible avec de futures plateformes génériques essence/diesel. C'est que bien souvent, par le passé, les demandes étaient d'abord de nature organique, c'est-à-dire que la fonction à réaliser, e.g. régulation de ralenti, pilotait directement les actionneurs moteurs (dont la vanne d'admission d'air et l'avance).

On considère donc dans ce qui suit que la *strate moteur* a pour fonction de fournir le couple demandé par la *strate GMP* ou alors à renseigner celle-ci sur le caractère coûteux (voire impossible) de telle ou telle sollicitation. Cette démarche n'est pas spécifique d'une motorisation essence mais permet de traiter les motorisations diesel ou électrique. Afin de ne pas induire un fonctionnement dégradé par rapport aux architectures organiques, une première innovation consiste à proposer que la *strate GMP* fournisse à la *strate moteur*, dans la mesure du possible, une consigne de couple anticipée afin que celle-ci puisse optimiser son fonctionnement [13]. Par souci de généricité, une deuxième innovation est proposée caractérisant l'interface entre strates. Indépendamment de la nature du producteur de couple, l'interface en question est désormais assimilée à un module dont la principale fonction consiste à générer des demandes en termes de couples lent et rapide, à partir des consignes de couple instantanée et anticipée. Au sein de cette configuration de commande, seul le contrôle rapproché des actionneurs sera spécifique au type de motorisation retenu. *In fine*, l'architecture que nous proposons est celle de la figure 3.

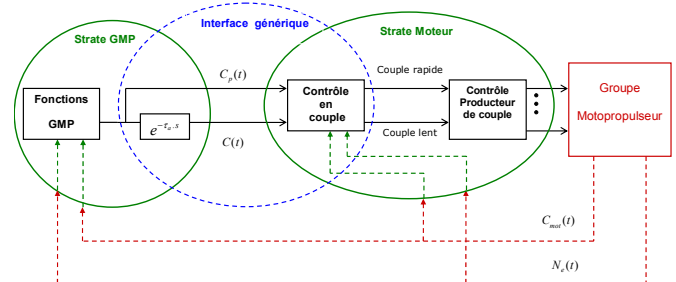


fig3. Structure générique du contrôle moteur

$C(t)$  : demande instantanée.

$C_p(t) = \hat{C}(t + \tau_a)$  : demande anticipée sur l'horizon  $\tau_a$ .

$C_{mot}(t)$  : couple produit en sortie du moteur.

L'exploitation d'informations anticipées ( $\hat{C}(t + \tau_a)$ ) en entrée de la strate moteur conduit naturellement à envisager une commande prédictive. On trouve d'ailleurs dans la littérature différentes problématiques de commande, du domaine automobile, abordées à l'aide de l'approche MPC (Model Predictive Control). C'est le cas par exemple pour la gestion de l'admission d'air pour une motorisation diesel [14] ou encore pour une motorisation essence [15]. D'autres travaux cherchent à appliquer cette méthode au niveau GMP, pour la régulation de ralenti [16] ou de richesse [17].

En vue de proposer un outil générique diesel/essence favorisant l'amélioration des performances globales quelque soit l'objectif de contrôle retenu au sein de la strate GMP, on considère, au-delà de la nature et de l'objectif de contrôle des fonctions GMP, que la strate GMP (dans laquelle cohabite l'ensemble de ces fonctions) est un générateur de consigne de couple et que le producteur de couple ainsi que son contrôle rapproché est vu comme un actionneur fournissant du couple.

La solution proposée ici ne fait appel ni à la commande prédictive hiérarchisée [18], jugée trop complexe et coûteuse en terme d'implémentation, ni à la commande dite « with preview » au sens de [13] réservée au cas linéaire.

Par souci de concision, nous n'étudierons dans ce papier que le traitement de la demande anticipée de couple :  $\hat{C}(t + \tau_a)$ .

#### IV. MODELE SIMPLIFIE DU MOTEUR ESSENCE

Comme évoqué dans la section II, le modèle macroscopique du producteur de couple essence peut se résumer à deux macro contributeurs en parallèles, dénommés actionneurs air et avance.

La dynamique globale de l'action sur l'air est assimilable à un transfert du premier ordre ([5],[19]) dont la constante de temps est  $\tau_{air} = 150ms$ .

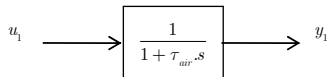


fig4. Modèle simplifié du contributeur air

avec  $u_1(t)$  : consigne de couple air et  $y_1(t)$  : couple air réalisé.

En réalité, au sein d'une configuration essence, le couple moteur produit sur le vilebrequin résulte du couple air fourni par le contributeur lent et du « rendement d'avance » (compris entre 0 et 1) imposé par le second moyen d'action.

La dynamique de l'actionneur avance est rapide et elle est modélisée par un retard pur, variable en fonction du régime moteur ([5],[19]). Pour des raisons de simplicité conceptuelle, on approxime ce retard par un transfert du premier ordre de constante de temps  $\tau_{av}(N_e) = \tau_{PMH(N_e)} / 3$ .

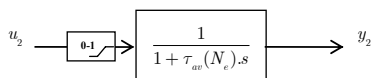


fig5. Modèle simplifié du contributeur avance

avec  $u_2(t)$  : consigne du rendement d'avance et  $y_2(t)$  : rendement d'avance imposé.

Le modèle global simplifié est représenté sur la figure 6.

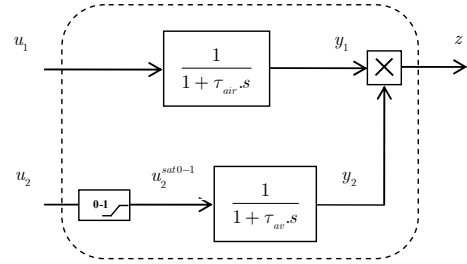


fig6. Modèle simplifié non linéaire du moteur essence

avec  $z(t)$  : couple moteur appliqué sur le vilebrequin.

Le modèle d'état correspondant est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ z = x_1 x_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{avec } A = \begin{bmatrix} -1/\tau_{air} & 0 \\ 0 & -1/\tau_{av} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1/\tau_{air} & 1/\tau_{av} \end{bmatrix}^T,$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 \end{bmatrix}^T \text{ et } u = \begin{bmatrix} u_1 & u_2^{sat0-1} \end{bmatrix}^T.$$

Le modèle simplifié proposé présente une non linéarité en sortie. On lui préfère le modèle de la figure 7.

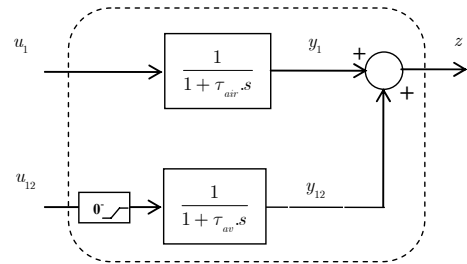


fig7. Modèle simplifié linéaire du moteur essence

Les schémas des figures 6 et 7 sont équivalents si  $z = y_1 y_2 = y_1 + y_{12}$  et  $y_{12} = y_1 y_2 - y_1$ .

Remarque : le résultat est évident. Notons que  $y_{12}$  est nécessairement négatif (puisque  $0 \leq y_2 \leq 1$ ).  $y_{12}$  sera désormais appelé couple de dégradation par l'avance et  $u_{12}$  consigne du couple de dégradation.

Finalement, c'est ce dernier modèle qui sera utilisé pour la conception.

#### V. CONCEPTION D'UNE STRATE MOTEUR COMPATIBLE AVEC UNE ARCHITECTURE FONCTIONNELLE HIERARCHISEE

La stratégie d'anticipation proposée est motivée par une connaissance *a priori* du comportement macro de la strate moteur et vise à garantir une dynamique et une disponibilité accrues du couple moteur, tout en limitant la consommation.

##### A. Anticipation de la demande en couple

L'anticipation de la demande en couple s'opère principalement sur les transitoires positifs de couple et comporte essentiellement trois phases successives :

- la première constitue la réserve de couple en agissant simultanément sur le couple air, dans le sens d'un accroissement, et sur le couple de dégradation (par

une avance sous optimale), et ce en réalisant le couple instantané demandé  $C(t)$ .

- La seconde phase marque l'application effective de la consigne instantanée sur les deux contributeurs en sus de l'action du dispositif d'anticipation / compensation (c.f.fig9). Cette étape vise à faire tendre le couple moteur en sortie vers la totalité du potentiel en couple disponible  $y_1$ , tout en garantissant une synchronisation entre les deux voies.
- L'action du compensateur arrive à terme une fois que le couple moteur en sortie aura rallié le couple air fourni ( $y_1 = z$ ), marquant ainsi le début de la troisième phase.

### B. Contraintes et spécifications du contrôle en couple

Les contraintes systémiques sont essentiellement associées au comportement du contributeur rapide et correspondent à :

- c1. Un taux de dégradation limite du rendement d'avance de 20%.
- c2. Une application limitée, en durée, du rendement d'avance critique (pour éviter l'échauffement du moteur en haut régime).

Nous avons par ailleurs considéré les spécifications suivantes :

- s1. Il est inutile (voire coûteux) de trop anticiper ( $\tau_a \leq \tau_{air}$ ).
- s2. Partant de  $0N.m$  à  $t = 0s$  et en réponse à un échelon de consigne sur  $C_p$ , le couple de dégradation est décroissant sur l'intervalle  $[0, \tau_a[$  et atteint la valeur maximale de 20% à  $t = \tau_a$ .
- s3. En réponse à un échelon de consigne sur  $C_p$ , le couple total produit  $z$  reste nul sur l'horizon  $\tau_a$ .

### C. Structure du contrôle en couple

En considérant que  $C_p(t) = C(t + \tau_a)$ , on propose ici le schéma de commande défini par les figures 8 et 9.

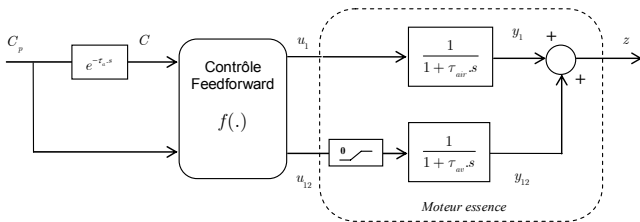


fig8. Structure générale du contrôle en couple

Dans le but de discriminer les variations positives et négatives des sollicitations de couple un filtrage passe haut, dont la constante de filtrage est  $\tau_f < \tau_a$ , et une saturation à  $0^+$  sont appliqués sur les consignes de couple. Enfin, en vue de conserver un iso couple en sortie sur l'horizon  $\tau_a$ , une action

de compensation est introduite sur le contributeur rapide avec synchronisation du contributeur air.

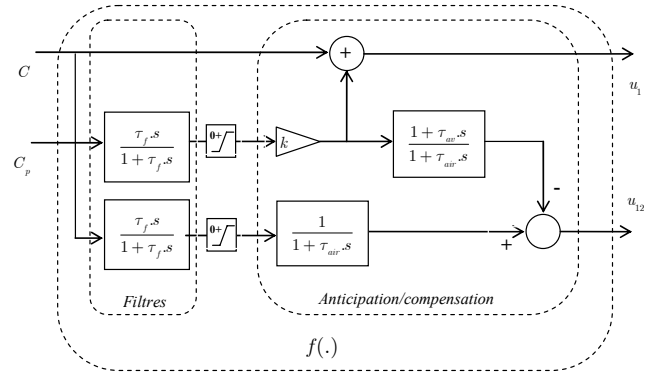


fig9. Structure interne du contrôle feedforward avec anticipation

### D. Analyse du schéma de commande

On montre dans ce qui suit le bien fondé du schéma proposé au § V.C, et ce vis-à-vis des spécifications définies dans la section V.B. Pour cela, on étudie la réponse sur l'horizon  $\tau_a$  du système de la figure 8 à un échelon sur  $C_p$ . Dans ce cadre, on peut énoncer les résultats suivants :

**Proposition 1 :** Pour un horizon  $\tau_a$  donné, la décroissance de  $y_{12}$  est garantie avec un choix judicieux de  $\tau_f$  :

$$\tau_a + \frac{\tau_f \cdot \tau_{air}}{\tau_{air} - \tau_f} (\ln(\tau_f) - \ln(\tau_{air})) = 0 \quad (5)$$

et le taux de dégradation maximal de 20% est obtenu à l'instant  $t = \tau_a$  au moyen d'un gain proportionnel donné

$$\text{par : } k = 0.2 \left( \frac{(1 - \tau_{air} / \tau_f)}{(e^{-\tau_a / \tau_{air}} - e^{-\tau_a / \tau_f})} \right) \quad (6)$$

**Preuve :** On déduit aisément de l'analyse des figures 8 et 9 que la réponse indicielle de  $y_{12}$  est :

$$y_{12}(t) = \frac{k}{1 - \tau_{air} / \tau_f} (e^{-t / \tau_{air}} - e^{-t / \tau_f})$$

$$\text{On veut que } \frac{dy_{12}(t)}{dt} < 0, 0 \leq t < \tau_a \text{ et } \frac{dy_{12}(\tau_a)}{dt} = 0 \quad (7)$$

On montre sans difficulté qu'en dérivant  $y_{12}$ , il existe bien une valeur de  $\tau_f < \tau_a$  permettant de satisfaire (7) tel que

$$\tau_a + \frac{\tau_f \cdot \tau_{air}}{\tau_{air} - \tau_f} (\ln(\tau_f) - \ln(\tau_{air})) = 0 .$$

Par ailleurs, le couple de dégradation atteint la valeur limite de 20% pour  $y_{12}(\tau_a) = -0.2$ . Ceci nous permet de déduire la valeur du gain proportionnel (6).

**Proposition 2 :** La structure de commande proposée permet de garantir la spécification (s3).

**Preuve :** À partir des figures 8 et 9, on détermine sur l'intervalle  $[0, \tau_a]$  les réponses indicielles :

$$y_1(t) = \frac{k}{1 - \tau_{air} / \tau_f} \left( e^{-t/\tau_f} - e^{-t/\tau_{air}} \right)$$

et

$$y_{12}(t) = \frac{k}{1 - \tau_{air} / \tau_f} \left( e^{-t/\tau_{air}} - e^{-t/\tau_f} \right).$$

Et on vérifie bien alors que :

$$z(t) = y_1(t) + y_{12}(t) = 0, \forall t, 0 \leq t \leq \tau_a.$$

Remarque : le développement analytique de l'expression de la loi de commande a permis de mettre en œuvre un contrôle en couple adaptatif, quelque soit la valeur du régime moteur.

### E. Evaluation du schéma proposé

On s'intéresse désormais à l'évaluation des performances du schéma proposé pour un transitoire positif de la consigne de couple, connu  $\tau_a$  secondes à l'avance.

En considérant une consigne de couple en échelon d'amplitude  $100N.m$ , un horizon d'anticipation  $\tau_a = 100ms$  et pour un régime moteur quasi constant  $N_e = 1500tr / mn$ , la loi de commande est calculée conformément à la démarche proposée dans le § V.D. Le résultat de simulation est explicité par la figure 10.

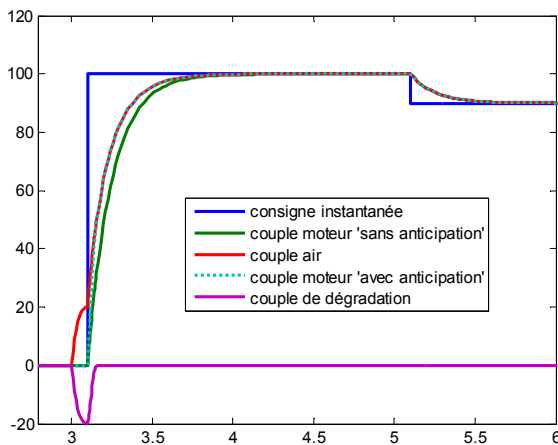


fig10. Performances du contrôle en couple

On constate que la connaissance anticipée,  $100ms$  à l'avance, de l'échelon de couple de consigne à  $t = 3.1s$ , permet l'anticipation pour le « couple air » dès l'instant  $t = 3s$ , tandis que dans le même temps le couple de dégradation est réduit de manière à maintenir le couple moteur constant sur l'intervalle de 3 à  $3.1s$ . À  $t = 3.1s$ , la réalisation de l'échelon de couple positif est accélérée par la mobilisation de la « réserve de couple », c'est-à-dire en ramenant l'avance à l'allumage à son optimum.

## VI. CONCLUSION

Les capacités de calcul embarqué sont désormais compatibles avec la mise en place d'architectures de calcul fonctionnelles davantage qu'organiques. Dans le cadre du contrôle longitudinal de véhicule, cet article s'est attaché à proposer une architecture de commande hiérarchisée, s'appuyant sur un niveau bas dit *strate moteur*, chargé de

réaliser la fourniture de couple requis. Une première contribution a consisté à enrichir l'interface entre les fonctions du niveau GMP, et le contrôle rapproché du moteur. C'est ainsi que la strate GMP fournit non seulement la valeur instantanée du couple requis, mais aussi sa valeur prédite [13]. La proposition d'un dispositif permettant de scinder la demande en couples lent et rapide, avec une gestion permettant l'anticipation de la demande de couple dans le cas d'une motorisation essence (cf. fig 9) constitue la deuxième contribution de ce travail. Les perspectives résident dans la recherche d'une genericité diesel/essence faisant appel aux outils de la commande prédictive.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le CNRS et le groupe PSA Peugeot Citroën pour leur support financier.

## REFERENCES

- [1] G. Grissinger, N. Le Fort-Piat, G. Corde, et al. "Contrôle commande de la voiture". Ed. Lavoisier, 2002.
- [2] U. Kiencke, L. Nielsen, "Automotive control systems". Ed. Springer, 2000.
- [3] L. Guzzella, A. Amstutz, "Control of diesel engines". *IEEE Control Systems Magazine*, 1998.
- [4] B. Derreumaux, "Moteurs à essence Tome 1 et 2", Edition ETAL, 1987.
- [5] S. Richard, "Amélioration de l'agrément de conduite par amortissement actif des oscillations longitudinales de transmission", Thèse de l'université de Nantes, 2000.
- [6] Y.K. Chin, F.E. Coats, "Engine dynamics, time based versus crank angle based". General Motors research labs, SAE, 1986.
- [7] G. Corde, "La commande hiérarchisée pour le contrôle moteur : Application au moteur à soupapes électromécaniques". Thèse de l'université de Caen, 1997.
- [8] N. Venuti, J. Beroff, Y. Hamam, "Sur la commande modulaire d'un moteur et les avantages qui en découlent". SIA, 1994.
- [9] M. Lagier, D. Narat, S. Ginoux et Y. Bastard, "Séminaire-structure couple". Rapport interne, Direction Technique et Industrielle, PSA Peugeot Citroën, La Garenne-colombes, France, 2003.
- [10] M. D. Mesarovis, D. Macko, Y. Takahara, "Theory of hierarchical multilevel systems". Ed. Academic Press, New-York, 1970.
- [11] R. Scattolini, P. Colaneri, "Hierarchical Model Predictive Control". In *Proc. 46th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, LA, 2007, pp. 12-14.
- [12] R. Scattolini, P. Colaneri, D. De Vito, "A switched MPC approach to hierarchical control", In *Proc. 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008, pp 6-11.
- [13] B. Ben Slimen, Ph. Chevrel, M. Yagoubi et J-E. Guy, "Towards a generic gasoline/diesel hierarchical control architecture". Rapport interne, Ecole des Mines de Nantes, 2009.
- [14] P. Ortner, L. Del Re, "Predictive control of a diesel engine airpath", *IEEE Trans. Contr. Systems Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 449-456, 2007.
- [15] H. J. Ferreau, G. Lorini, M. Diehl, "Fast nonlinear model predictive control of gasoline engines", In *Proc. IEEE International Conference on Control Applications*, Munich, Germany, 2006.
- [16] S. Di Cairano, D. Yanakiev, A. Bemporad, I.V. Kolmanovsky, D. Hrovat, "An MPC design flow for automotive control and applications to idle speed regulation", In *Proc. 47th IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, 2008.
- [17] S. Trimboli, S. Di Cairano, A. Bemporad, I.V. Kolmanovsky, "Model predictive control for systems with time delay: Application to air-fuel ratio control in automotive engines", In *8th IFAC Workshop on Time Delay Systems*, Romania, 2009.
- [18] F. Borrelli, A. Bemporad, M. Fodor and D. Hrovat, "An MPC/Hybrid system approach to traction control". *IEEE Trans. Control systems technology*, vol. 14, pp. 541-552, May. 2006.
- [19] S. Maurel, "Modèle simplifié du moteur essence", Rapport interne, Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile, PSA Peugeot Citroën, La Garenne-colombes, France, 2005.