



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE
Faculté des Sciences et Techniques
Béni-Mellal



CED : Sciences et Techniques
FD : Mathématiques et Physique Appliquées

THESE

Présentée par

Zohra ZIDANE

Pour l'obtention du grade de

Doctorat National

Spécialité : Automatique

**COMMANDE ADAPTATIVE MULTIVARIABLE : APPLICATION À
UNE MICRO-CENTRALE HYDRAULIQUE**

Soutenue le 07 décembre 2013 devant la commission d'examen :

Président	Pr. A. BADRI	FST	Mohammedia
Rapporteurs	Pr. A. FARCHI	FST	Settat
	Pr. B. MINAOUI	FST	Béni-Mellal
	Pr. M. NAIMI	FP	Béni-Mellal
Examineurs	Pr. M. AIT LAFKIH	FST	Béni-Mellal
	Pr. M. RAMZI	FST	Béni-Mellal
	Pr. B. EL HADDADI	FP	Béni-Mellal

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier mes chers parents, mes frères et mes sœurs pour leur amour, leurs encouragements, leur patience, leurs conseils et leur confiance indéfectible en moi. Je voudrai les remercier pour les valeurs qu'ils m'ont inculquées, telles que le sérieux et la persévérance, deux qualités essentielles pour mener à bien mes projets.

C'est à la famille Mohamed BOUMEZZOUGH, que je dédie tout spécialement cette thèse, en la remerciant pour toute sa patience, son soutien quotidien, ses conseils et ses encouragements. Qu'elle trouve ici toute ma gratitude et mon amour.

Je voudrai ajouter que ce travail n'aurait pas pu être achevé sans l'amour, le soutien, les conseils et les encouragements de mon mari, Ahmed BOUMEZZOUGH. Je le remercie de m'avoir aidé à affronter les moments difficiles. Cette thèse représente pour moi l'aboutissement d'une première épreuve que nous avons traversée avec succès tous les deux. Je le remercie également pour l'intérêt particulier qu'il porte à ma carrière professionnelle. Je voudrai qu'il trouve ici tout l'amour que j'éprouve pour lui.

Avant-propos

- Prénom et Nom de l’auteur de la thèse : Zohra ZIDANE
- Intitulé de la thèse : COMMANDE ADAPTATIVE MULTIVARIABLE : APPLICATION À UNE MICRO-CENTRALE HYDRAULIQUE
- Prénom et Nom du directeur de la thèse : Mustapha Ait Lafkih (Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal)
- Lieu de réalisation du travail : Laboratoire d’Automatique et de Conversion de l’Energie (LACE), à la Faculté des Sciences et Techniques, Université Sultan Moulay Slimane, Béni-Mellal.

Publications Internationales

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, (2011), “Adaptive Minimum Variance Control of Separately Excited DC Motor,” Phys. Chem. News, Vol. 60, pp. 53-60.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, (2011), “Adaptive Generalized Predictive Control of a Separately Excited DC Motor,” International Journal of Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering IJ-STA, Vol. 5, No. 1, pp. 1472-1485.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, (2012), “Adaptive Generalized Predictive Control of a Heat Exchanger Pilot Plant,” Journal of Mechanical Engineering and Automation Vol. 2, No. 5, pp. 100-107.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, (2012), “Simulation Studies of Adaptive Predictive Control for Small Hydro Power Plant,” Journal of Mechanical Engineering and Automation, Vol. 2, No. 6 pp. 169-175.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, (2012), “Design of Linear Quadratic Gaussian Controller for Sample Power System,” International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 13-19.

Abréviations

GPC	Generalized Predictive Control
LQG	Linear Quadratic Gaussian
MV	Minimum Variance
GMV	Generalized Minimum Variance
DMC	Dynamic Matrix Control
EPSAC	Extended Prediction Self Adaptive Control),
QDMC	Quadratic Dynamic Matrix Control
EHAC	Extended Horizon Adaptive Control
MPHC	Model Predictive Heuristic Control
MAC	Model Algorithmic Control
CARIMA	Controller Auto-Regressive Integrated Moving Average
MSAP	Machine Synchrone à Aimants permanents
PID	Proportional-Integral-Derivative

Résumé

Le travail faisant l'objet de la présente thèse est consacré à la commande adaptative multivariable d'une micro-centrale hydraulique, laquelle constitue un moyen efficace pour une génération d'électricité à coût réduit et peut, de ce fait, être rentable particulièrement pour les sites isolés, si une topographie appropriée peut être trouvée.

Cependant, son modèle multivariable et non linéaire, ses paramètres qui peuvent varier dans le temps et ses caractéristiques physiques (constante de temps d'éléments chauffants, acquisition-conversion de signaux...) rendent sa commande davantage compliquée.

Le défi majeur de ce travail de recherche est de concevoir une loi de commande pour une microcentrale hydraulique plus performante au niveau de la poursuite des trajectoires de référence, du rejet de perturbations et de la stabilité.

Dans ce cadre, les lois de commandes prédictive et linéaire quadratique gaussienne se présentent alors comme une solution idéale. L'efficacité de ces lois s'est illustrée lors de nombreuses applications industrielles, pour lesquelles celles-ci ont été appliquées à plusieurs classes de systèmes : multivariables, non-linéaires, hybrides, instables, à non-minimum de phase ou à retard.

Cependant, lorsque les paramètres du système varient dans le temps, le maintien d'un niveau de performances élevé peut être impossible à atteindre avec un régulateur à paramètres fixes. Le développement d'une version adaptative du régulateur à paramètres connus s'avère donc nécessaire.

Les lois de commande Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG) et Prédictive généralisée (GPC) présentées dans cette thèse ont été appliquées à la partie turbine-alternateur d'une microcentrale hydraulique, afin d'étudier leurs comportement sur un système multivariable.

Les simulations effectuées ont permis de se rendre compte du comportement des schémas de commande LQG et GPC dans les cas non adaptatif et adaptatif. Avec de tels résultats la validité des méthodes proposées, est démontrée et l'objectif fixé au préalable est atteint.

Mots clés : commande adaptative ; commande linéaire quadratique gaussienne ; commande prédictive ; commande à minimum de variance ; commande à minimum de variance généralisée ; moindres carrés récurrents ; micro-centrale hydraulique.

ملخص

العمل الطاقة المخصص لهذه الأطروحة يتعلق بالتحكم القابل للتكيف المتعدد المتغيرات لمحطة الكهرومائية صغيرة الحجم و التي تعتبر طريقة فعالة لتوليد الطاقة الكهربائية بثمن منخفض. وبالتالي تكون مربحة خاصة للمواقع النائية إذا وجدت أرضية مناسبة لذلك.

لكن هذا النموذج المتعدد المتغيرات غير خطي، والتي يمكن أن تتغير برامتراته في الزمن و مميزاته الفيزيائية (ثابتة الزمن للعفو المسخن، استقبال و تحويل الإشارات،...) تجعل التحكم فيه مسألة صعبة.

التحدي الكبير لهذا العمل البحثي هو تصميم نظام مراقبة جد فعال للمحطة الكهرومائية على مستوى تتبع مسارات الإشارات من أجل حذف الإضرابات و ضمان الاستقرار للمحطة. في هذا الباب فإن قانوني التحكم: التنبؤية و المستقيمة التربيعية على شكل دالة غوص التي عُرضت تمثل حلا مثاليا.

فعالية هذه القوانين تتمظهر في عدة تطبيقات صناعية التي من أجلها تم تطبيقها في عدة أصناف من النظم: متعدد المتغيرات، غير خطية، هجينة، غير مستقرة، متعددة الحالات أو ذات تأخير.

لكن عندما تتغير برامترات النظام في الزمن، لضمان أداء جيد، يبقى مستحيل الوصول إليه بمُنظَم برامتراته ثابتة و بالتالي فإن تطوير نسخة قابلة للتكيف أصبح ضروريا.

قوانين التحكم المستقيمة التربيعية و التنبؤية المعممة المقدمة في هذه الأطروحة، تم تطبيقها على الجزء المولد التوربيني للمحطة الكهرومائية من أجل دراسة سلوكها على النظام المتعدد المتغيرات.

المحاكاة التي قمنا بها مكنت من الأخذ بعين الاعتبار سلوك عناصر التحكم المستقيمة التربيعية على شكل دالة غوص و التنبؤية المعممة في الحالة الغير القابلة و القابلة للتكيف. هذه النتائج تؤكد صحة الطرق المقترحة، و الوصول إلى الهدف الذي سطر في الأول.

كلمات البحث

تحكم قابل للتكيف، تحكم خطي تربيعي، تحكم تربيعي، تحكم ذو مغايرة دنوية، المربعات الصغرى العودية، محطة كهرومائية صغيرة.

Sommaire

Introduction Générale.....	01
1. Généralités sur la commande prédictive.....	05
1.1 Introduction.....	05
1.2 Commande quadratique à horizon infini.....	06
1.3 Commande quadratique à horizon fini	06
1.3.1 Régulateur de Smith.....	07
1.3.2 Commande à minimum de variance.....	09
1.3.3 Commande à minimum de variance généralisée.....	10
1.3.4 Commande prédictive.....	11
1.3.4.1 Philosophie de la commande prédictive.....	11
1.3.4.2 Critère de performance (fonction objectif).....	11
a. Paramètres.....	12
b. Trajectoire de référence.....	12
1.3.4.3 Aperçu historique sur la commande prédictive.....	13
1.4 Conclusion.....	17
2. Généralités sur la commande adaptative.....	18
2.1 Introduction.....	18
2.2 Historique.....	19
2.3 Commande adaptative indirecte (auto ajustable).....	20
2.4 Commande adaptative directe.....	20
2.5 Estimation paramétrique.....	21
2.5.1 Propriétés de l'estimateur.....	21
2.5.2 Avantages d'une estimation paramétrique.....	22
2.5.3 Moindres carrés récurrents.....	22
2.5.3.1 Régression linéaire.....	22
2.5.3.2 Estimateur des moindres carrés.....	23
2.5.3.3 Méthode des moindres carrés récurrents.....	24
2.5.3.4 Méthode des moindres carrés récurrents avec facteur d'oubli.....	25
2.5.3.5 Aspects pratiques de l'identification.....	26
a. Filtrage des signaux d'entrée sortie.....	26
b. Normalisation des signaux d'entrée-sortie.....	27

Introduction générale

L'étude présentée dans cette thèse concerne les sources d'énergie renouvelable et, plus particulièrement, les micro-centrales hydrauliques. Celles-ci représentent une voie de développement majeur pour atteindre l'objectif de l'Union Européenne : 20% de la consommation énergétique totale, à l'horizon 2020, seront des énergies renouvelables.

Les applications visées par la technique de la micro-hydraulique sont l'alimentation des sites isolés, non électrifiés, ainsi que la fourniture d'appoint au réseau interconnecté, notamment par l'association avec d'autres sources d'énergie renouvelable (comme par exemple l'éolien) [ERR 10], [KAD 00] et [MAA 00].

La demande du réseau électrique varie sans cesse, et les turbomachines au sein des centrales hydroélectriques doivent adapter, en permanence, leur point de fonctionnement [GRE 04], [KUE 02] et [SAN 03]. C'est pour cette raison que le réglage d'une micro-centrale hydraulique s'avère nécessaire.

Pour donc assurer la stabilité du réseau électrique et aussi la sécurité au niveau des installations, il faut songer à des dispositifs de régulation adéquats. Ces derniers doivent pouvoir commander de façon instantanée les turbomachines afin qu'elles répondent assez rapidement aux perturbations au sein du réseau. Ces systèmes de régulation doivent aussi garantir le fonctionnement des machines dans les limites permises, sans risque de détérioration pour ces dernières. Ce travail est en général effectué par des régulateurs de type PID.

La synthèse des régulateurs d'une installation hydraulique se trouve compliquée par la variation temporelle des paramètres du système, la présence de retard dus essentiellement aux caractéristiques physiques du système à contrôler (constante de temps d'éléments chauffants, acquisition-conversion de signaux...) et la présence de nombreux effets non-linéaires ; en effet, les caractéristiques des turbines sont fortement non linéaires, de même que la dynamique des installations d'aménagement hydraulique. Les outils classiques d'analyse de systèmes et de synthèse de régulateurs s'appliquent difficilement à une installation hydraulique. C'est pour résoudre ce type de problème qu'a été introduite la notion de la commande adaptative.

Ce travail de thèse se situe au croisement de deux axes importants parmi l'ensemble des structures de commande : la commande prédictive et la commande linéaire quadratique

Chapitre 1

Généralités sur la commande prédictive

1.1 Introduction

Le but principal de la commande des systèmes est de pouvoir satisfaire les objectifs définis dans les cahiers des charges, de la manière la plus performante possible. Il s'agit, par exemple, de contrôler les signaux de sortie en agissant sur ceux d'entrée, de sorte qu'il soit possible de pouvoir satisfaire les objectifs en présence des contraintes d'exploitation [MIG 04].

Les techniques de la commande prédictive constituent des outils puissants pour atteindre les performances souhaitées. La commande prédictive a reçu une attention particulière tout au long de cette dernière décennie, aussi bien de la part de la communauté scientifique que celle industrielle [MSA 96]. L'éclosion de cette commande avancée vient d'une part du besoin ressenti par les industriels pour les performances élevées des boucles d'asservissement des systèmes non-linéaires complexes, n'ayant pas trouvé satisfaction dans les régulateurs classiques de type PID, et d'autre part du fait que cette loi de commande permet de garantir ces performances requises en tenant compte des contraintes d'exploitation lors de l'élaboration de la commande [FIL 12].

La plupart des méthodes de synthèse disponibles dans la littérature sur la commande peuvent être obtenues en choisissant convenablement les paramètres de synthèse à partir des propriétés fondamentales suivantes [MSA 96] :

- P_1 : une large applicabilité. Le système à commander peut être stable ou instable, inversement stable ou non et peut exhiber un retard relativement important et variable dans le temps ;
- P_2 : une insensibilité de la loi de commande par rapport aux erreurs de modélisation pour assurer une bonne robustesse du système de commande sous-jacent ;
- P_3 : une compensation des perturbations ;
- P_4 : une simplicité de spécification des performances;

Ci-après, un bref historique de l'évolution de la commande à critère quadratique. Deux types de commande à critère quadratique sont généralement utilisés : Commande quadratique à horizon infini et celle à horizon fini.

Chapitre 2

Généralités sur la commande adaptative

2.1 Introduction

La théorie de la commande adaptative a été largement étudiée tout au long des quatre dernières décennies. Des résultats théoriques relativement importants sont disponibles dans la littérature [LJU 87] [LAN 97] [AST 97] [BIT 90] [GOO 84] [SAS 89] [NAR 89] [IOA 96]. Des applications industrielles réussies ont montré son applicabilité au point où des régulateurs auto ajustables sont d'ores et déjà sur le marché [AST 95] [CLA 94] [BEN 92] [MSA 93] [MSA 94a] [MSA 94b] [NAJ 82]. L'applicabilité de la commande adaptative est étroitement liée à la capacité de l'algorithme d'adaptation paramétrique à recouvrir les performances du système de commande sous-jacent indépendamment des perturbations d'état, des bruits de mesure, des éventuelles variations de paramètres et des dynamiques négligées.

L'adaptation paramétrique a reçu une attention particulière dans la communauté de commande adaptative. Des résultats théoriques et méthodologiques fort intéressants, sur la robustesse, et donc la crédibilité, des algorithmes de commande adaptative [MSA 96], sont disponibles.

L'utilisation des systèmes de commande adaptative connaît aujourd'hui un essor certain, à cause de leur complexité raisonnable et du développement de micro-processeurs pouvant servir de support pour leur mise en œuvre. Actuellement, les techniques de commande adaptative ont été utilisées avec succès pour un grand nombre d'applications, dont la liste non-exhaustive est comme suit :

- Asservissement à moteurs électriques ;
- Pilotage automatique ;
- Systèmes énergétiques ;
- Régulation de Ph ;
- Systèmes hydrauliques ;
- Réacteurs chimiques ;
- Robots manipulateurs ;
- Colonnes à distiller ;
- Cimenterie ;
- Procédés biotechnologiques [SAW 92].

Chapitre 3

Commande adaptative monovariante

3.1 Introduction

La synthèse d'un bon système de commande adaptatif passe avant tout par l'élaboration d'une loi de commande performante.

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés aux lois de commande basées sur la minimisation d'un critère quadratique à horizon infini (LQG) et à horizon fini et fuyant (GPC) dans le cas monovariante.

Dans un premier temps nous allons présenter le schéma de la commande linéaire quadratique gaussienne monovariante. Ce schéma constitue une généralisation de la commande à minimum de variance de la sortie. Il suffit en effet de faire tendre vers zéro le paramètre λ de pondération de l'énergie de la commande dans l'expression du coût quadratique à minimiser pour retrouver une stratégie de minimum de variance de la sortie. Cette commande présente d'autres avantages supplémentaires, par rapport à la commande à minimum de variance de sortie, d'être capable de stabiliser non seulement les systèmes à minimum de phase mais aussi les systèmes à non minimum de phase (c'est-à-dire les systèmes dont l'inverse de la fonction de transfert est instable). Ceci est dû au terme de pondération de l'action de commande introduit dans le critère, la stabilité en boucle fermée est assurée si le modèle du procédé est stabilisable. D'une certaine façon, cette commande est aussi conceptuellement plus simple que les commandes à placement de pôles parce qu'elle résolve implicitement le problème du placement de pôles simultanément des pôles de la fonction de transfert du système en boucle fermée et des vecteurs propres qui leur sont associés. Les méthodes de commande à critère quadratique fournissent en plus, contrairement aux méthodes de commande à placement de pôles, un moyen systématique de calcul du gain de perturbation de la commande ainsi que du terme responsable de la poursuite du signal de référence. Puis l'introduction du modèle CARIMA (Controller Auto-Regressive Integrated Moving Average), permet d'introduire une action intégrale dans la boucle fermée, assurant une erreur statique nulle vis-à-vis des consignes et perturbations du type échelon. Cependant, il est parfois difficile d'ajuster les paramètres de synthèse [SAN 89].

Par la suite, nous allons porter notre attention vers la commande prédictive, qui est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle englobe un ensemble de méthodes différentes (MAC, PFC, DMC, GPC, EPSAC...). Néanmoins, toutes ces techniques utilisent la

Chapitre 4

Commande adaptative multivariable

4.1 Introduction

La vraie nature des procédés industriels est, en général, multivariable. Ils possèdent un certain nombre d'entrées (n , appelées commandes) et un certain nombre de sorties (m), chaque sortie est affectée par au moins deux entrées. La représentation régissant le comportement du procédé est, par conséquent, une représentation multivariable.

L'aspect multivariable permet de tenir explicitement compte, dans l'élaboration de la commande, des couplages entre les différentes voies, afin de tenter de les minimiser.

Ce chapitre a pour objectif de développer, à partir des principes théoriques fondamentaux, les différentes étapes conduisant à la synthèse des lois de la commande LQG et de la commande GPC, dans le cas multivariable, faisant ainsi l'extension de ce qui avait été présenté dans le cas monovariable (cf. chapitre 3). L'intérêt d'une telle loi réside dans les performances et la robustesse montrée par ces algorithmes pour la commande des procédés monovariés, ainsi que la facilité de mise en œuvre et d'ajustement des paramètres de synthèse.

Finalement, pour illustrer l'utilité des lois de commandes développées, un exemple de simulation est présenté

4.2 Synthèse des lois de commandes multivariables à paramètres fixes

4.2.1 Commande Linéaire Quadratique Gaussienne LQG multivariable

4.2.1.1 Modèle du procédé

Considérons pour cela un modèle discret multivariable à m entrées et m sorties de type CARIMA suivant :

$$\Delta A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\Delta u(t-1) + C(q^{-1})\xi(t) \quad (4.1)$$

où A , B et C sont des polynômes matriciels en fonction de l'opérateur de décalage arrière q^{-1} tels que :

$$A(q^{-1}) = I_m + A_1 q^{-1} + \dots + A_{na} q^{-na} ; A_i \in \mathbb{R}^{m,m} ; \quad (4.2)$$

Chapitre 5

Microcentrale hydraulique

5.1 Introduction

L'énergie électrique est incontestablement l'une des formes d'énergie les plus utilisées de nos jours [LAL 05]. Elle est un besoin essentiel de l'être humain et n'est plus considérée comme un moyen de confort, mais utilisée pour la satisfaction d'autres besoins. Depuis sa première production, au XVII^e siècle, elle a marqué de façon considérable le mode de vie des gens et est devenue, de ce fait, l'une des énergies les plus courantes dans la vie quotidienne. Ses domaines d'applications sont nombreux et elle est préférée à beaucoup d'autres pour les raisons suivantes : elle n'est pas, ou peu, polluante et plus faciles à produire [LAL 05].

Il existe en effet différents moyens de production de l'énergie électrique. Dans les centrales hydroélectriques, par exemple, on utilise l'énergie hydraulique pour produire de l'énergie mécanique convertie par la suite en énergie électrique. Dans les centrales thermiques, c'est l'énergie calorifique qui est utilisée pour produire de l'énergie cinétique, laquelle sera convertie en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Les centrales nucléaires elles, utilisent l'énergie provenant de la fission des atomes; ensuite les étapes de conversion sont les mêmes que dans une centrale thermique classique. On peut citer aussi l'énergie éolienne, l'énergie solaire et bien d'autres sources encore, toutes utilisées pour produire de l'électricité. [LAL 05].

Convaincu de l'importance de l'électricité dans l'amélioration des conditions de vie de populations rurales et vu le faible taux d'électrification rurale, le Maroc a mis en œuvre un programme dans lequel les énergies renouvelables prennent une place de choix.

L'énergie renouvelable est celle qui provient des sources naturelles inépuisables, que ce soit grâce à la grande quantité d'énergie qu'elles contiennent, ou parce qu'elles sont capables de se régénérer naturellement.

Au contraire, les ressources non renouvelables sont celles qui ne peuvent pas se rétablir, leurs réserves sont limitées et s'épuisent avec leur utilisation ; comme c'est le cas de l'énergie nucléaire et des combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz naturel, et le charbon.

Sur le plan énergétique, le Maroc se caractérise par sa grande dépendance de l'importation de sources d'énergie primaire (94,6%), et d'énergie électrique (18,1%), ce qui a des conséquences négatives sur l'équilibre économique et financier du pays lorsque les prix du pétrole brut augmentent.

Chapitre 6

Application de la commande adaptative multivariable à une micro-centrale hydraulique

6.1 Introduction

Toutes les centrales électriques ont une partie commune : l'alternateur qui fournit l'énergie électrique. Il est entraîné par une turbine en rotation grâce à un mouvement d'eau. C'est donc la transformation énergie hydraulique/énergie mécanique/ énergie électrique.

Dans ce chapitre, sont appliquées les lois de commande adaptative multivariable développées auparavant sur la partie turbine-alternateur d'une micro-centrale hydraulique permettant de transformer l'énergie hydraulique en énergie électrique. Le modèle non linéaire de la partie turbine-alternateur de la micro-centrale hydraulique est utilisé pour simuler le comportement du système.

Les modèles non-linéaires sont linéarisés autour des points d'équilibres. Cette méthode s'intéresse aux processus décrits sous la forme $\dot{x} = f(x, u, t)$ où l'on suppose que la fonction f admet un développement limité au voisinage du point de fonctionnement défini par (x_0, u_0) .

6.2 Description du procédé

La configuration de la partie maîtresse d'une micro-centrale hydraulique consiste en une turbine (grosse roue munie de pales ou aubes), qui transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique, et un alternateur synchrone triphasé qui converti l'énergie mécanique en énergie électrique. Celui-ci est connecté à un bus infini par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur de tension et d'une ligne de transmission. Voici le schéma de principe du groupe turbine-alternateur :

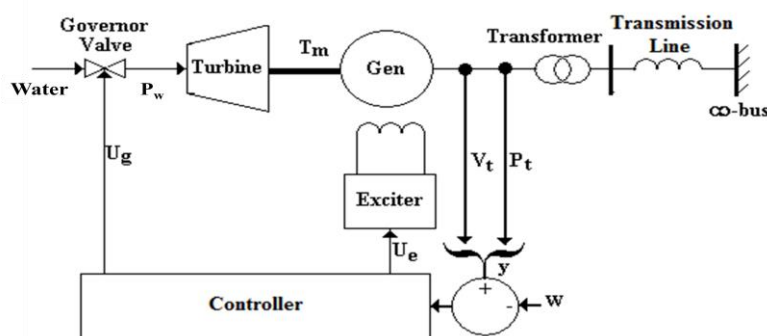


Fig. 6.1 : Schéma de la partie turbine-alternateur d'une micro-centrale hydraulique

Conclusion générale

Le travail de recherche présenté dans cette thèse porte sur la mise en œuvre des lois de commandes à critère quadratique à horizon infini (LQG) et à horizon fini (GPC). Durant ces dernières années la méthodologie de ces lois de commande a connu un développement important, et comme il a été rappelé dans ce travail, ceci est lié à sa large applicabilité aux milieux industriels et aux performances obtenues. En outre, les lois de commandes LQG et GPC présentent l'avantage d'être faciles à implanter et à comprendre pour des personnes ayant de faibles connaissances en commande.

De plus, comme il a été expliqué dans ce travail de thèse, ces méthodes présentent la vertu de s'appliquer à des systèmes à dynamique difficile, tels que ceux à comportement de phase non minimale ou instables; elles permettent en outre de traiter des systèmes multivariables et non linéaires, et incorporent de manière naturelle la compensation par anticipation "feedforward" et celle des systèmes à grands retards. Cependant, lors de la présence de variations importantes des paramètres systémiques, le maintien d'un haut niveau de performances peut être impossible à réaliser avec un régulateur standard conçu, au préalable, sur un système dit 'nominal' même si la loi de commande développée assure de façon intrinsèque une certaine robustesse. Le maintien d'un niveau de performances correct est dès lors rendu possible par le développement d'une version adaptative du régulateur à paramètres connus. Ce travail a étudié une version adaptative des commandes prédictive généralisée et linéaire quadratique gaussienne.

L'efficacité des lois de commandes développées a été testée au moyen d'exemples numériques, aux chapitres 3 et 4, par simulation, ce qui a permis de vérifier le bon comportement du système de commande.

Un aperçu sur l'histoire des énergies renouvelables et les secteurs énergétiques au Maroc a révélé les potentialités dont dispose ce pays en la matière. Dans ce cadre, une étude de la technique des micro-centrales hydrauliques a permis de faire connaissance de tous les éléments qui constituent une centrale hydroélectrique et surtout la turbine et le générateur.

Les lois de commande LQG et GPC ont été appliquées à la partie turbine-alternateur d'une microcentrale hydraulique. Afin d'étudier le comportement de ces lois de commande sur un système multivariable et non linéaire : turbo-alternateur, nous avons linéarisé le modèle du système autour d'un point de fonctionnement.

- [ABD 97] **Abdessemed, R. et Kadjouj, M. (1997)**, “Modélisation des machines électriques,” Presse de l’université de Batna.
- [AGG 94] **Aggoune, M. E., Boudjemaa, F. Bensenouci, A. et al. (1994)**, “Design of Variable Structure Voltage Regulator Using Pole Assignment Technique,” IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 39, No. 10, pp. 2106-10.
- [AIS 05] **Aissa, A. (2005)**, “Commande sans capteur de vitesse par DTC d’une Machine Synchrone à Aimant Permanent d’ôtée d’un Observateur d’ordre Complet à Mode Glissants,” Université de Batna.
- [AMI 12] **Amir, F. (2012)**, “Etude du fonctionnement des centres de production dans un système de marché libre de l’énergie électrique,” Université de Batna, Faculté des Sciences de l’Ingénieur.
- [AND 90] **Anderson, B. D. O. et Moore, J. (1990)**, “Optimal control: Linear Quadratic Methods,” Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- [AND 93] **Anderson, P. M. et Fouad, A. A. (1993)**, “Power System Control and Stability,” IEEE Press.
- [AST 72] **Astrom, K. J. et Wittenmark, B. (1972)**, “On self tuning regulators,” Lund institute of technology.
- [AST 73] **Astrom, K. J. et Wittenmark, B. (1973)**, “On self-tuning regulators,” Automatica, Vol. 9, No. 2, pp.185-199.
- [AST 77] **Astrom, K. J., Borisson, U., Ljing, L. et B. Wittenmark, (1977)**, Automatica, Vol.13, pp. 457-476.
- [AST 77] **Astrom, K. J., Borisson, U., Ljung, L. et Wittenmark, B. (1977)**, “Theory and applications of self-tuning controllers,” Automatica, Vol. 20, No.5, pp.645-651.

Remerciement

Le travail de recherche présenté dans cette thèse de doctorat a été effectué à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Béni Mellal, Université Sultan Moulay Slimane, dans le Laboratoire d'Automatique et de Conversion d'Energie (LACE).

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Mohamed RAMZI Directeur du LACE, qui m'a accueilli au sein de son laboratoire, qui a accepté d'être mon codirecteur de thèse et qui m'a rendu service malgré ses activités et ses contraintes.

Je remercie chaleureusement Monsieur Mustapha AIT LAFKIH Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Béni Mellal, qui a encadré mes travaux de thèse avec professionnalisme, rigueur, patience, disponibilité et générosité. Je lui apporte ma plus sincère gratitude pour son soutien constant, ses encouragements et le temps précieux qu'il m'a accordé pendant ces années de thèse.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur Abdelmajid BADRI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Mohammedia, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse et pour ses précieuses remarques. J'exprime ma gratitude à Messieurs Abdelmajid FARCHI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Settat et Brahim MINAOUI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Béni Mellal, qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse et pour leurs précieuses et judicieuses remarques.

De même je suis particulièrement reconnaissante à Monsieur Mohamed NAIMI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Béni Mellal et actuellement vice doyen à la Faculté Polydisciplinaire (FP) de Béni Mellal, pour son accueil chaleureux à chaque fois que j'ai sollicité son aide, ses encouragements, ses conseils, son soutien et sa générosité. Je le remercie également pour avoir accepté d'être un rapporteur de cette thèse et pour ses précieuses et judicieuses remarques.

J'exprime toute ma reconnaissance également à Monsieur Benachir El HADADI, Doyen de la Faculté Polydisciplinaire (FP) de Béni Mellal, pour avoir accepté d'être examinateur de ma thèse et surtout pour ses observations pertinentes et enrichissantes, ainsi que pour ses encouragements, son soutien et ses conseils.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Hassan EL HARFI, Professeur agrégé, pour son soutien constant, ses encouragements, ses conseils et sa gentillesse. Je lui adresse mes amitiés les plus sincères.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, (2013), “Application of Multivariable Linear Quadratic Gaussian Control and Generalized Predictive Control in a Hydropower Plant,” International Journal of Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering IJ-STA. Vol. 7, No. 1, pp. 1890-1907.

Communications Internationales

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH, M. RAMZI, and A. ABOUNADA, “Adaptive Minimum Variance Control of a DC Motor,” 18th Mediterranean Conference on Control & Automation, pp. 1-4, June 23-25, 2010, Congress Palace Hotel, Marrakech, Morocco.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH AND M. RAMZI, “Self-tuning Regulator based on Minimum Variance Criterion of a DC motor,” International Conference on Modelling and Simulation in Engineering (MS'2010), July 15-17 2010, Barcelona, Spain.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, “Adaptive Generalized Predictive Control of a Heat Exchanger Pilot Plant,” The 2nd International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS'11), April 7-9 2011, Ouarzazate, Morocco.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, “Adaptive Control of a Heat Exchanger,” International Congress on Numerical Analysis and Scientific Computing with Applications in Sciences and Engineering (NASCASE11), April 19-20, 2011, Settat Morocco.

Z. ZIDANE, M. AIT LAFKIH and M. RAMZI, “Adaptive Generalized Predictive Control of a DC Motor,” Premier Congrès International Informatique et Sciences de l'Ingénieur (ISI11), Juin 01-03, 2011, Meknès Morocco.

M. EZZARAA, M.AIT LAFKIH, M.RAMZI and **Z. ZIDANE**, “Adaptive Linear Quadratic Gaussian of DC Motor,” Premier Congrès International Informatique et Sciences de l'Ingénieur (ISI11), Juin 01-03, 2011, Meknès Morocco.

Abstract

The work covered by this thesis is devoted to the multivariable adaptive control for a micro-hydropower plant, which is an effective way for electricity generation at low cost and can, therefore, be particularly profitable for sites isolated if appropriate topography can be found.

However, the multivariable and nonlinear model's parameters that can vary over time and its physical characteristics (time constant of heating elements, acquisition, signal conversion ...) make its control more complicated.

The major challenge of this research is to conceive a control law for a more efficient micro-hydropower plant at further reference trajectories, disturbances rejection and stability.

Within this framework, the predictive control and linear quadratic Gaussian laws present themselves as an ideal solution. The effectiveness of these laws is illustrated in many industrial applications, for which they have been applied to several classes of systems: multivariable, nonlinear, hybrid, unstable, non-minimum phase or delay.

However, when the system parameters change over time, maintaining a high level of performance may be impossible to achieve with a fixed parameters controller. Therefore, the development of an adaptive version of the known parameters regulator is necessary.

Linear Quadratic Gaussian (LQG) and Generalized Predictive Control (GPC) laws presented in this thesis have been applied to the turbine-generator part of a micro-hydropower, to study their behavior in a multivariable system.

Simulations performed have allowed accounting for the behavior diagrams of LQG and GPC controllers in the adaptive and non-adaptive cases. With these results, the validity of the proposed methods is demonstrated and the goal firstly defined is reached.

Keywords: adaptive control; linear quadratic Gaussian control, predictive control, minimum variance control; generalized minimum variance control; recursive least squares; micro-hydropower plant.

c. Zone morte.....	28
d. Factorisation.....	29
e. Algorithme d'adaptation paramétrique.....	29
2.6 Conclusion.....	30
3. Commande adaptative monovariante.....	31
3.1 Introduction.....	31
3.2 Synthèse des lois de commandes monovariantes à paramètres fixes.....	32
3.2.1 Commande Linéaire Quadratique Gaussienne LQG monovariante	32
3.2.1.1 Modèle du procédé.....	32
3.2.1.2 Loi de commande.....	35
3.2.2 Commande Prédictive Généralisée GPC monovariante.....	36
3.2.2.1 Méthodologie de la commande GPC.....	36
3.2.2.2 Eléments de la commande GPC.....	37
3.2.2.3 Modèle du processus.....	38
3.2.2.4 Développement du prédicteur.....	38
3.2.2.5 Récurrence de l'équation de Diophantine.....	40
3.2.2.6 Loi de commande.....	42
3.2.2.7 Choix des paramètres de synthèse.....	45
3.3 Synthèse des lois de commandes adaptatives.....	46
3.4 Résultats de simulations.....	46
3.4.1 Résultats de simulations de la commande LQG monovariante à paramètres fixes, avec et sans perturbations.....	47
3.4.2 Résultats de simulations de la commande LQG adaptative monovariante, avec et sans perturbations.....	49
3.4.3 Résultats de simulations de la commande GPC monovariante à paramètres fixes, avec et sans perturbations.....	51
3.4.4 Résultats de simulations de la commande GPC adaptative monovariante, avec et sans perturbations.....	53
3.4.5 Interprétation des résultats de simulations.....	55
3.5 Conclusion.....	56
4. Commande adaptative multivariable.....	57
4.1 Introduction.....	57
4.2 Synthèse des lois de commandes multivariantes à paramètres fixes.....	57

gaussienne. Ces deux domaines ont démontré leur potentiel et ont au fil des années suscité un intérêt croissant de la part des communautés industrielle et scientifique.

L'efficacité de la commande prédictive s'est illustrée lors de nombreuses applications industrielles, pour lesquelles cette loi de commande a été appliquée à plusieurs classes de systèmes : multivariables, non-linéaires, hybrides, instables, à non-minimum de phase ou à retard. Toutes ces applications s'avèrent performantes grâce aux particularités de la commande prédictive :

- l'utilisation des informations issues d'un modèle (simple et approprié) du système à régler ;
- la minimisation d'un critère de performance sur un horizon fini de prédiction, afin de maintenir la sortie du système la plus proche possible de la référence souhaitée, en tenant compte de contraintes éventuelles sur le système.

Grâce à la simplicité d'implantation et aux performances obtenues, les lois de commandes prédictive et linéaire quadratique gaussienne figurent parmi les techniques de commande les plus utilisées dans le milieu industriel, en particulier lorsqu'elles s'appliquent à des systèmes avec une trajectoire de référence connue à l'avance, induisant alors un caractère anticipatif (le cas de la commande prédictive). Cet ensemble (anticipation, critère de performance, prise en compte de contraintes) fait que les lois de commande prédictive et linéaire quadratique gaussienne induit globalement de meilleures performances que celles issues de stratégies de commande plus classiques (régulateur PID, placement de pôles ...) [STO 08].

En présence de variations importantes des paramètres du système, le maintien d'un niveau de performances élevé peut être impossible à atteindre avec un régulateur à paramètres fixes conçu au préalable sur un système dit 'nominal', même si les lois de commande prédictive et linéaire quadratique gaussienne assurent de façon intrinsèque une certaine robustesse.

Le maintien d'un niveau de performances correct est dès lors rendu possible par le développement d'une version adaptative du régulateur à paramètres connus. Ce travail présente une version adaptative de la commande prédictive généralisée GPC et linéaire quadratique gaussienne LQG.

L'algorithme est présenté sous une forme originale basée, d'une part, sur la minimisation d'un critère quadratique à horizon fini (le cas de la commande GPC) et à horizon infini (le cas de la commande LQG) et, d'autre part, sur une stratégie d'identification en ligne des paramètres du régulateur.

1.2 Commande quadratique à horizon infini

La méthode la plus intuitive, pour atteindre la stabilité en boucle fermée, est le cas où l'horizon de prédiction est infini. Les preuves de stabilité sont basées en principe sur l'utilisation de la fonction de coût comme fonction de Layapunov [KEE03] [MEA 93].

L'objectif de cette commande consiste à minimiser un critère quadratique à horizon infini. Ce type de commande s'applique aux procédés représentés par les équations d'état suivantes :

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

Le critère quadratique à minimiser est

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \{ [y(t) - y^*(t)]^T Q [y(t) - y^*(t)] + u^T(t-1) \Lambda u(t-1) \} \quad (1.2)$$

et la commande le minimisant s'exprime sous la forme d'un retour d'état comme suit :

$$u(t) = -\Gamma(t)x(t) + W(t) \quad (1.3)$$

Où Γ et W sont fonctions d'une matrice symétrique définie positive, qui est la solution d'une équation algébrique du type Riccati [NGU 89].

La commande assure la stabilité du système en boucle fermée sous certaines conditions. La littérature montre que les résultats obtenus par cette technique sont plus simples en théorie mais irréalisables en pratique. Cependant, la troncature de l'horizon de prédiction introduit différentes hypothèses [FLI 10]. Cette commande sera étudiée en détail au chapitre III.

1.3 Commande quadratique à horizon fini

Le terme de la commande quadratique à horizon fini ne désigne pas une stratégie de commande spécifique, mais un ensemble de méthodes de l'automatique qui utilisent explicitement un modèle de processus à commander, afin d'obtenir le signal de commande par la minimisation d'une fonction de coût [GIN 03].

2.2 Historique

Avec les développements successifs de l'Automatique moderne, on s'est aperçu qu'un régulateur à paramètres fixes ne pouvait pas toujours fournir un comportement acceptable du système en toute situation. En particulier, lorsque les processus à commander possèdent des paramètres variant dans le temps, la conception d'un régulateur fixe, satisfaisant toujours les spécifications requises, s'avère très difficile. La notion d'ajustement automatique des paramètres d'un régulateur commence à pointer vers la fin des années 40. A ce moment précis et jusqu'en 1960, le terme de commande adaptative n'a pas encore la signification que l'on connaît aujourd'hui, mais traduit plutôt la capacité d'un régulateur à ajuster ses paramètres aux comportements dynamique et statique d'un procédé. C'est ainsi que se développe, pendant cette période, la technique de commande à gains programmés, qui s'applique avec succès si le comportement du processus évolue en fonction de conditions extérieures connues et mesurables. Les limites de cette stratégie sont cependant atteintes assez rapidement, par exemple, dès que le processus change sous l'effet d'autres perturbations [BOU 06].

Dans les années 1970, Aström et Wittenmark, [AST 72] introduisirent une nouvelle structure d'un régulateur auto-ajustable. En 1973, Carroll et Lindorff [CAR 73] produisirent l'observateur adaptatif qui garantit une bonne stabilité du système à contrôler. En 1978, Narendra et Valavani [NAR 78] élaborèrent un contrôleur adaptatif pour des systèmes d'ordre relatif $m = 1$ et 2. Par la suite Feuer et Morse [FEU 78] donnèrent la première solution pour le cas où $m > 2$. Néanmoins, cette méthode était relativement complexe et il fallut attendre Monopoli qui introduisit l'erreur augmentée afin de régler les paramètres du contrôleur : les anciens algorithmes étaient basés sur l'erreur de poursuite de trajectoire [MEZ 09] [LAN 96] [ZEL 01] [OLI 01].

Ce n'est qu'avec l'apparition des ordinateurs puis des microprocesseurs que la commande adaptative trouvera un essor certain, concrétisé en 1981 par la sortie du premier régulateur numérique adaptatif. Même si la mise en œuvre d'un algorithme adaptatif est relativement lourde, avec les progrès réalisés en micro-électronique, permettant de faire une implantation plus rapide, plus simple, plus performante et moins chère, la diffusion industrielle de cette technique s'est accrue.

Finalement, d'autres chercheurs, Landau et al. [LAN 86] utilisèrent cette idée pour montrer la validité de la commande adaptative. Durant cette période où la commande adaptative suscita un réel intérêt [MEZ 09].

La commande adaptative est définie comme une commande permettant au régulateur de s'adapter, de lui-même, aux changements du processus. En conséquence, l'objectif de la

même philosophie de contrôle et le principe de fonctionnement est le même. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la commande prédictive généralisée GPC. Cette commande est introduite à la fin des années 80 et elle est considérée comme étant la plus populaire des méthodes de prédiction, particulièrement pour des processus industriels. La GPC est basée sur la minimisation d'un critère quadratique au sens d'un horizon fini et fuyant et dépend de quatre paramètres qui sont les deux horizons de prédiction minimum et maximum, l'horizon de commande et le facteur de pondération de la commande, dont l'ajustement optimal ne peut être garanti [BEN 09].

Les stratégies de mise à jour des paramètres du régulateur font appel classiquement à la méthode d'identification des moindres carrés récurrents. La fin du chapitre illustre le comportement de ces lois de commande dans des exemples de simulation.

3.2 Synthèse des lois de commandes monovariantes à paramètres fixes

3.2.1 Commande Linéaire Quadratique Gaussienne LQG monovariante

La commande LQG présente l'intérêt de s'appliquer à des systèmes dont l'état n'est pas mesuré. Développée au début de la seconde moitié du 20^{ème} siècle et appliquée lors du programme spatial Apollo pour la stabilisation de lanceurs, elle est apparue comme la première méthode générale pour l'asservissement des systèmes multivariants. De ce fait, elle a connu un grand succès comme en témoigne les nombreuses publications sur le sujet.

3.2.1.1 Modèle du procédé

La mise en œuvre de cette loi demande d'une façon naturelle une représentation d'état comme modèle. En partant d'un modèle numérique défini par fonction de transfert entrée/sortie. Le modèle est représenté sous forme [BOU 06]:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + w(t) \quad (3.1)$$

Où $u(t)$ et $y(t)$ sont respectivement l'entrée de commande et la variable mesurée de la sortie et $w(t)$ est un signal de perturbation.

A et B sont des polynômes en fonction de l'opérateur de décalage arrière q^{-1} tels que :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (3.2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad (3.3)$$

$$B(q^{-1}) = B_0 + B_1 q^{-1} + \dots + B_{nb} q^{-nb} ; B_i \in \mathbb{R}^{m,m} ; \quad (4.3)$$

$$C(q^{-1}) = I_m + C_1 q^{-1} + \dots + C_{nc} q^{-nc} ; C_i \in \mathbb{R}^{m,m} ; \quad (4.4)$$

$$\Delta(q^{-1}) = (1 - q^{-1})I_m ; \quad (4.5)$$

Avec,

$$y(t), u(t), w(t) \text{ \& } \xi(t) \in \mathbb{R}^m$$

Comme nous avons vu dans le cas monovariable, la mise en œuvre de la commande LQG demande naturellement une représentation d'état comme modèle, soit

$$\begin{cases} x(t+1) = A'x(t) + B'u(t) + G'\xi(t) \\ y(t) = C'x(t) + \xi(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

Avec

$$A' = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & I & \mathcal{O} & \dots & \mathcal{O} \\ -\alpha_2 & \mathcal{O} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \mathcal{O} \\ \vdots & \vdots & \mathcal{O} & \ddots & I \\ -\alpha_n & \mathcal{O} & \dots & \dots & \mathcal{O} \end{bmatrix} ; B' = \begin{bmatrix} B_0 \\ \vdots \\ B_{n-1} \end{bmatrix} ; G' = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} ; C' = [I \quad \mathcal{O} \quad \dots \quad \mathcal{O}] \quad (4.7)$$

où $x(t)$ est l'état du système de dimension $n = \max(na + 1, nb + 1, nc)$.

L'observateur d'état est donné par :

$$\hat{x}(t) = H\phi_e(t-1) \quad (4.8)$$

4.2.1.2 Stratégie de commande

Celle-ci se déduit simplement de l'expression de la commande obtenue en monovariable :

$$\Delta u(t) = -\Gamma(t)x(t) - v(t) + W(t) \quad (4.9)$$

Avec

$$\Gamma(t) = (B'^T R B' + \Lambda)^{-1} B'^T R A' \quad (4.10)$$

C'est pour cela que le gouvernement marocain promeut le recours aux énergies renouvelables, et que celles-ci se placent comme alternative aux énergies conventionnelles. Ainsi, l'objectif du Gouvernement est qu'en 2012 le pourcentage des énergies renouvelables passe à 18% du total et qu'en 2020 les énergies renouvelables représentent 42% du mix énergétique du pays, étant ainsi une grande opportunité d'affaires. [MON 11].

Les principales énergies renouvelables qui sont produites dans le pays sont les énergies éolienne, solaire, et hydraulique [MON 11].

La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables. L'équipement est caractérisé par sa grande robustesse, sa fiabilité et sa longue durée de vie. L'entretien de l'installation est simple et les frais de fonctionnement sont réduits (quelques pourcents de l'investissement). Il s'agit d'une énergie qui ne génère directement aucune émission nocive significative et en particulier pas de gaz à effets de serre. Au Maroc la mobilisation des ressources hydrauliques (Micro-Centrales Hydrauliques MCH) dans la production électrique est l'une des technologies prioritaires dans la stratégie d'électrification nationale. Le recours à cette énergie est en effet le moyen efficace d'électrifier les villages non ensoleillés et reculés dans les montagnes de l'Atlas et du rif.

Nous nous intéresserons dans ce chapitre aux techniques des micro-centrales hydrauliques

5.2 Microcentrales hydroélectriques

Les microcentrales hydroélectriques sont une méthode efficace de génération d'électricité à coût réduit. La génération d'électricité par microcentrales hydroélectriques peut être rentable particulièrement pour les sites isolés, si une topographie appropriée peut être trouvée. Elles sont des installations simples et fiables, présentent un intérêt particulier puisqu'elles offrent un réseau 220V/50 Hz et par conséquent les équipements électriques utilisés sont des équipements standards dont la disponibilité ne présente pas un problème. Les Microcentrales sont très adaptées aux régions montagneuses dont les conditions géographiques et hydrologiques leur donnent un niveau de choix non concurrentiel.

5.2.1 À propos de l'énergie hydraulique

La turbine hydraulique comme excellent moyen d'entraînement des génératrices électriques fait son apparition à la fin du XIX^e et sonne l'heure de l'hydroélectricité. Des barrages de toute taille destinés à utiliser la force motrice de l'eau pour produire de l'électricité voient massivement le jour.

Le groupe turbine-alternateur est considéré comme un système à deux entrées et deux sorties qui sont :

Entrée n°1 : La tension d'entrée de l'excitateur U_e

Entrée n°2 : La tension d'entrée de la vanne U_g

Sortie n°1 : La puissance réelle de sortie aux bornes du générateur P_t

Sortie n°2 : La tension terminale aux bornes du générateur V_t

Dans les études de simulations décrites dans ce chapitre, les équations non linéaires de la génératrice synchrone sont représentées par un modèle non linéaire du troisième ordre basé sur les équations de parc. La turbine hydraulique, le régulateur de vanne et l'excitateur sont représentés chacun par un système de premier ordre. Dans ce qui suit, sont données les équations du modèle [GRE 00] [BAB 01] [AGG 94] [BEN 02] [DEM 69] [AND 93] [BEN 10] [DAN 00] [ZID 12]:

6.2.1 Equations mécaniques

La vitesse du rotor de la génératrice synchrone est donné par :

$$\dot{\delta}(t) = \omega(t) \quad (6.1)$$

L'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine est

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d\omega(t)}{dt} + D\omega = P_m - P_t \quad (6.2)$$

ou encore

$$M \frac{d\omega(t)}{dt} + D\omega = P_m - P_t \quad (6.3)$$

Avec,

$$M = \frac{H}{\pi f_0} \quad (6.4)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (6.5)$$

P_m : Puissance mécanique

Les simulations effectuées ont permis de se rendre compte du comportement des schémas de commande LQG et GPC dans le cas non adaptatif et adaptatif. Les résultats correspondants ont montré que la GPC donne très bonne satisfaction en absence et en présence de perturbations, comparativement à la LQG. Par ailleurs, le système est vu répondre sans dépassement et les sorties se conforment bien aux consignes dans le cas de la GPC. Pour les schémas de commandes adaptatives LQG et GPC on constate qu'après la période d'adaptation le comportement du système est identique à celui obtenu dans le cas à paramètres connus.

Les résultats de simulation obtenus montrent la validité des méthodes proposées et, de ce fait, l'objectif fixé au préalable est bien atteint.

Perspectives

Étant donné que ce travail a été effectué sur un turbo-alternateur d'une microcentrale hydraulique, et que nous nous sommes limités à la simulation du système, il serait intéressant de transposer, en perspective, à un procédé réel, et développer un contrôleur adaptatif qui identifie les paramètres du système en temps réel.

- [AST 83] **Astrom, K. J. (1983)**, Theory and applications of adaptive control: a survey. Automatica, Vol. 10, No.5, pp.471-486.
- [AST 95] **Astrom, K. J. et Wittenmark, B. (1995)**, "Adaptive Control," Addison-Wesley New York.
- [AST 97] **Astrom, K. J. et Wittenmark, B. (1997)**, "Computed Controlled Systems: Theory and Design," Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- [BAB 01] **Babak, N. (2001)**, "Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants: méthodes, convergence, robustesse, identification en ligne des paramètres," Université de Téhéran, Iran.
- [BEN 02] **Bensenouci, A. (2002)**, "Variable Structure Control for Voltage/Speed Control in Power System," Proc. 2nd IASTED, Crete, Greece.
- [BEN 07] **Bensalem, A. (2007)**, "Analyse Et Gestion De La Production Des Centrales Electriques Liées Aux Réseaux Electrique De Grande Taille," Université de El-Hadj Lakhdar, Batna.
- [BEN 09] **Benbrahim, A. (2009)**, Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents. Magister. Université El Hadl Lakhdar Batna. 2009.
- [BEN 10] **Bensenouci, A. (2010)**, "Design of a Robust H_1/H_2 /MOC LMI-based Iterative Multivariable PID for Speed and Voltage Control of a Sample Power System," Journal of Engineering and Computer Sciences, Qassim University, Vol. 3, No. 2, pp. 127-146.
- [BEN 92] **Bendotti, P. (1992)**, "Commande adaptative avec prise en compte des connaissances a priori," Institut national polytechnique de Grenoble.

Je remercie vivement Messieurs Mustapha AYAITA, professeur chercheur à l'université de Kassel d'Allemagne et Monsieur Rachid LBIBB, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Béni Mellal, pour leurs conseils précieux, leurs encouragements et pour les documents qu'ils m'ont fourni pour mener à bien ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je n'oublierai pas de remercier le cadre administratif et le corps enseignant de la Faculté Polydisciplinaire de Béni Mellal, pour tous les bons moments que nous avons partagés.

Un grand merci pour toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

4.2.1	Commande Linéaire Quadratique Gaussienne multivariabe.....	57
4.2.1.1	Modèle du procédé.....	57
4.2.1.2	Stratégie de commande.....	58
4.2.2	Commande Prédictive Généralisée GPC multivariable.....	59
4.2.2.1	Développement de prédicteur.....	59
4.2.2.2	Elaboration de la loi de commande.....	60
4.2.2.3	Mise en œuvre.....	63
4.3	Synthèse des lois de commandes adaptatives.....	64
4.4	Résultats de simulations.....	65
4.4.1	Résultats de simulations de la commande LQG multivariable à paramètres fixes, avec et sans perturbations.....	65
4.4.2	Résultats de simulations de la commande LQG adaptative multivariable, avec et sans perturbations.....	68
4.4.3	Résultats de simulations de la commande GPC multivariable à paramètres fixes, avec et sans perturbations.....	75
4.4.4	Résultats de simulations de la commande GPC adaptative multivariable, avec et sans perturbations.....	77
4.4.5	Interprétation des résultats de simulations.....	83
4.5	Résultats de simulation.....	84
5.	Microcentrale hydraulique.....	85
5.1	Introduction.....	85
5.2	Microcentrales hydroélectriques.....	86
5.2.1	À propos de l'énergie hydraulique.....	86
5.2.2	Définition.....	87
5.2.3	Systèmes hydroélectriques.....	87
5.2.4	Types de centrales hydroélectriques.....	88
5.2.4.1	Les centrales au fil de l'eau.....	89
5.2.4.2	Les centrales alimentées par un réservoir.....	89
5.2.5	Classification des petites centrales.....	89
5.2.5.1	Installations à basse pression.....	89
5.2.5.2	Installations à moyenne et haute pression.....	89
5.2.6	Constitutions d'une centrale hydroélectrique.....	90
5.2.7	Description d'une petite centrale.....	91

L'objectif de ce travail repose sur la synthèse des lois de commande basées sur la minimisation d'un critère quadratique à horizon infini (LQG), qui est capable de commander des procédés à inverses instables, et à horizon fini (GPC). Introduite à la fin des années 80, cette dernière est considérée comme étant la plus populaire des méthodes de prédiction, particulièrement pour des processus industriels. La commande GPC dépend de quatre paramètres qui sont les deux horizons de prédiction minimum et maximum, l'horizon de commande et le facteur de pondération de la commande [BOU 06]. Ces lois de commandes sont appliquées à la commande du groupe turbine-alternateur qui constitue la partie maitresse d'une microcentrale hydraulique.

Le présent travail est divisé en six chapitres que nous décrivons brièvement comme suit.

Chapitre 1 : Ce chapitre trace un panorama général des travaux engagés ces dernières années sur la commande à horizon infini et à horizon fini. Plusieurs méthodes, toutes basées sur le principe de prédiction de la sortie du système sont passées en revue.

Chapitre 2 : Ce chapitre présente le contexte général de la commande adaptative, en envisageant les approches directes et indirectes, puis rappelle les bases de l'algorithme des moindres carrés récurrents.

Chapitre 3 : Ce chapitre présente les détails de dérivation du correcteur LQG et du correcteur prédictif, dit généralisé, dans le cas des systèmes monovariables et sans contraintes. Des indications liées au choix des paramètres de réglage sont précisées. Des simulations illustrent le fonctionnement de ces lois de commande et les performances en matière de poursuite et de rejet de perturbations.

Chapitre 4 : Celui-ci présente l'extension au cas multivariable des lois de commande développées au chapitre 3. Des simulations terminent le chapitre et illustrent le comportement des lois de commandes LQG et GPC et les performances en terme de poursuite et rejet de perturbations.

Chapitre 5 : Après un bref bilan des différentes ressources énergétiques exploitables, nous focalisons notre attention sur la production d'électricité par la technique des microcentrales hydrauliques. Une description détaillée d'une micro-centrale hydraulique est également donnée.

Chapitre 6 : Ce dernier chapitre propose une application des lois de commande développées aux chapitres précédents à un système complexe non-linéaire : la partie turbine-alternateur d'une microcentrale hydraulique. Pour appliquer la méthodologie développée, le premier pas consiste à linéariser les équations qui régissent le fonctionnement de la partie turbine-alternateur

1.3.1 Régulateur de Smith

Le principe de commande par prédiction a été introduit pour la première fois par Smith à la fin des années 50 [SMI 59]. Cette méthode, connue sous le nom de prédicteur de Smith dans la littérature, a pour objectif primaire la compensation de l'effet du retard dans la boucle de commande. Rappelons brièvement l'idée de base du principe : considérons le schéma de régulation classique représenté par la figure (1.1) [SAW 92]

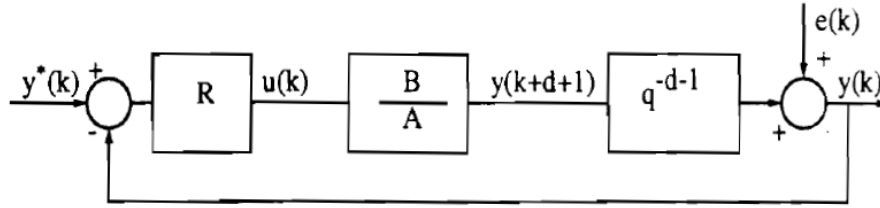


Fig. 1.1: Schéma de régulation classique

Dans ce schéma de régulateur classique l'équation du système bouclée est :

$$y(k) = \frac{q^{-d-1}BR}{A+q^{-d-1}BR} y^*(k) + \frac{A}{A+q^{-d-1}BR} e(k) \quad (1.4)$$

Où R représente la fonction de transfert du régulateur. L'équation (1.4) montre que le retard d du procédé, apparaissant dans l'équation caractéristique, peut constituer un inconvénient, car le système bouclé peut devenir facilement instable. En effet, d peut causer un large décalage de la marge de phase.

Dans les années 60, Smith [SMI 59] a proposé le schéma de régulation de la figure (1.2). L'idée de base de son approche était de transformer le problème classique de la commande de sortie à l'instant présent k , par la commande d'une prédiction de sortie à l'instant futur $k + d + 1$.

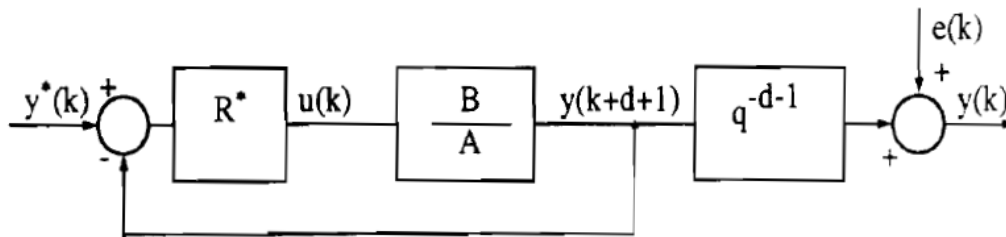


Fig.1.2 : Schéma de régulation par prédicteur de Smith

commande adaptative est l'ajustement automatique en ligne et celui des régulateurs des boucles de commande, afin de réaliser ou maintenir de façon identique un certain niveau de performances quand les paramètres du procédé à commander varient dans le temps [BOU 06]. Deux types de commande adaptative sont généralement utilisés : la commande adaptative indirecte et celle directe.

2.3 Commande adaptative indirecte (auto ajustable)

Encore appelée commande adaptative indirecte avec identification du modèle, cette stratégie a été proposée par Kalman en 1958 [MEZ 09] [RAM 01].

La commande auto ajustable est une commande adaptative indirecte qui comporte deux étapes à chaque période d'échantillonnage. Dans une première phase, on identifie de manière récursive un modèle du procédé, puis dans une deuxième phase, on calcule les paramètres du régulateur à partir des paramètres estimés du procédé [NGU 89] [SAN 89]. L'avantage de la séparation entre identification et commande est de pouvoir estimer les paramètres du système à contrôler tout en satisfaisant les objectifs de commande. Pour l'élaboration du régulateur, aucune erreur d'estimation n'est donc prise en compte [LAN 96] [OSB 61] [RAM 01].

Cependant, la stabilité de cette commande dépend fortement de la compatibilité des modèles utilisés pour les tâches d'identification et de calcul de la commande [MEZ 09]. La méthode indirecte nécessite un volume de calcul plus important, mais son domaine d'application est beaucoup plus large. Voici, le schéma de commande adaptative indirecte :

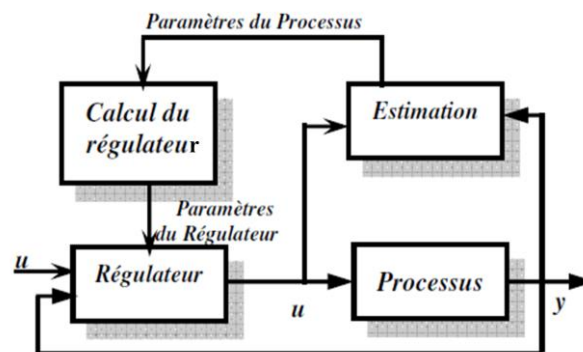


Fig. 2.1: Commande adaptative auto-ajustable indirecte

2.4 Commande adaptative directe

La commande adaptative directe (ou implicite) ne comporte qu'une seule étape à chaque période d'échantillonnage, les paramètres du régulateur étant directement identifiés d'une manière récursive. Dans ce cas, on identifie implicitement le procédé mais on reparamétrise

Où :

na représente le degré du polynôme A.

nb représente le degré du polynôme B.

En général $w(t)$, est modélisée par une moyenne mobile de la forme :

$$w(t) = C(q^{-1})\xi(t) \quad (3.4)$$

Avec

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \quad (3.5)$$

nc représente le degré du polynôme C.

$\xi(t)$ est une séquence aléatoire décorrélée de moyenne nulle et de variance finie.

Le modèle CARMA (Controlled Auto-Regressive and Moving Average) est obtenu à partir de (3.1) et (3.4)

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1})\xi(t) \quad (3.6)$$

Cette représentation s'avère inadéquate pour les applications industrielles où les perturbations ne sont pas stationnaires. Dans la pratique, les perturbations les plus fréquentes sont les échelons de grandeur, de durée et occurrences aléatoires, d'où l'utilisation d'un modèle CARIMA [SAN 89]

$$w(t) = \frac{C(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})}\xi(t) \quad (3.7)$$

Avec

$$\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (3.8)$$

En combinant l'équation (3.1) avec (3.7) on obtient :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})}\xi(t) \quad (3.9)$$

$$W(t) = (B'^T R B' + \Lambda)^{-1} B'^T R G' [y(t) - C' x(t)] \quad (4.11)$$

$$v(t) = (B'^T R B' + \Lambda)^{-1} B'^T [Y^*(t+1) + (A' - B' \Gamma) Y^*(t+2)] \quad (4.12)$$

$$Y^*(t) = [y^*(t) \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (4.13)$$

$$R(t+1) = A'^T \left[R(t) - R(t) B' [\Lambda + B'^T R(t) B']^{-1} B'^T R(t) \right] A' + C'^T Q C' ; R(0) > 0 \quad (4.14)$$

Quand $t \rightarrow \infty$, $R(t) \rightarrow R^*$, Où R^* est l'unique matrice définie positive solution de l'équation de Riccati.

$$R = A'^T \left[R - R B' [\Lambda + B'^T R B']^{-1} B'^T R \right] A' + C'^T Q C' ; R(0) > 0 \quad (4.15)$$

4.2.2 Commande Prédictive Généralisée GPC multivariable

4.2.2.1 Développement de prédicteur

Pour construire un ensemble de prédicteurs à j pas de $y(t+j)$, considérons l'identité de Bezout suivante :

$$I = E^j(q^{-1}) \Delta A(q^{-1}) + q^{-j} F^j(q^{-1}) \quad (4.25)$$

$E^j(q^{-1})$ et $F^j(q^{-1})$ sont les polynômes matriciels, solution unique d'ordre minimal de degrés " $j-1$ " et " na " de l'équation de Bezout. En multipliant les deux membres de l'identité (4.25) par $y(t+j)$ et en utilisant l'équation du système, on trouve :

$$y(t+j) = E^j(q^{-1}) B(q^{-1}) \Delta u(t+j-1) + F^j(q^{-1}) y(t) + E^j(q^{-1}) \xi(t+j) \quad (4.29)$$

En remarquant que $E^j(q^{-1})$ est de degré $j-1$, les composantes du bruit $E^j(q^{-1}) \xi(t+j)$ sont dans le futur, donc le prédicteur optimal de $y(t+j)$ à l'instant t est donné par :

$$\hat{y}(t+j/t) = E^j(q^{-1}) B(q^{-1}) \Delta u(t+j-1) + F^j(q^{-1}) y(t) \quad (4.30)$$

Jusqu'en 1960, l'hydroélectricité fait figure de pilier du développement industriel au même titre que la houille et le pétrole.

Temporairement détrônée par le faible coût de l'électronucléaire, l'hydroélectricité revient en force au XXI^e siècle face aux enjeux du développement des énergies renouvelables.

Aujourd'hui, elle occupe la place de première production mondiale d'énergie électrique d'origine renouvelable

5.2.2 Définition

Une microcentrale hydraulique est une installation de production d'énergie basée sur l'utilisation de la force hydraulique et dont la puissance est inférieure à 500 kW.

L'énergie hydraulique peut provenir:

- d'un fleuve ou d'une rivière;
- d'une source;
- d'un réseau d'approvisionnement en eau potable;
- d'un réseau d'évacuation d'eaux usées ou de drainages;
- de procédés industriels dans lesquels la pression d'un liquide est détruite dans un organe de réglage, vanne ou autre.

La production d'énergie par une centrale hydraulique qu'elle soit grande ou petite est fonction du débit de l'eau et de la hauteur de chute (différence de pression) à disposition.

Les petites centrales sont parfaitement adaptées à l'alimentation en électricité des populations habitant les régions les plus reculées ou les plus difficiles d'accès, elles peuvent être utilisées en réseau isolé ou contribuer à l'alimentation d'un réseau général interconnecté à d'autres centrales.

Tout aménagement hydroélectrique a pour objet la génération d'énergie électrique à partir de l'énergie potentielle d'une masse d'eau, coulant dans une rivière avec une certaine chute. La puissance de l'aménagement est proportionnelle au débit et à la chute.

Les petites centrales hydrauliques peuvent être un formidable outil de développement local et durable [FRA99] [KOD 94].

5.2.3 Systèmes hydroélectriques

L'énergie hydroélectrique est générée par la conversion de l'énergie potentielle, cinétique et de pression contenues dans les différents flux d'eau en énergie électrique [LAO 11]. C'est une source d'énergie propre et non polluante de l'environnement,

H : Constante d'inertie
 D : Coefficient de frottement
 ω_0 : Fréquence angulaire

L'équation électrodynamique du générateur s'écrit:

$$\frac{dE'_q(t)}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd}(t) - E_q(t)) \quad (6.6)$$

E'_q : Force électromotrice transitoire sur l'axe q
 E_{fd} : Tension d'excitation
 E_q : Force électromotrice sur l'axe q

6.2.2 Equations électriques (En supposant ($x'_d = x_q$)) (voir ci-dessous)

$$E_q(t) = E'_q(t) + (x_d - x_q)I_d(t) \quad (6.7)$$

$$P_t(t) = E_q(t)I_q(t) \quad (6.8)$$

$$I_d(t) = \frac{E'_q(t) - V_s \cos \delta(t)}{x'_{ds}} \quad (6.9)$$

$$I_q(t) = \frac{V_s \sin \delta(t)}{x'_{ds}} \quad (6.10)$$

$$E'_q(t) = x_{ad}I_f(t) \quad (6.11)$$

$$V_t(t) = \left[(V_d(t))^2 + (V_q(t))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.12)$$

$$V_d(t) = E'_q(t) - x'_d I_d(t) \quad (6.13)$$

$$V_q(t) = x'_d I_q(t) \quad (6.14)$$

- [BEN 98] Benchaib, R. (1998), “Application Des Modes De Glissement Pour La Commande En Temps Réel De La Machine Asynchrone,” Université de Picardie Jules Vernes. France.**
- [BIT 90] Bitmead, R. R., Gevers, M. et Wertz, V. (1990), “Adaptive Optimal Control: The Thinking Man’s Generalized Predictive Control,” Prentice-Hall International Englewood Cliffs, New Jersey.**
- [BIT 90] Bitmead, R. R., Gevers, M. et Wertz, V. (1990), “Adaptive optimal control – The thinking Man’s GPC,” Prentice Hall, London, UK.**
- [BOR 79] Borisson, ULF. (1979), Automatica, vol. 15, (1979) 209-215.**
- [BOU 05] Bouchereb, C. (2005), “Contrôle direct du couple des machines synchrones,” Université de Batna.**
- [BOU 06] Bououden, S. (2006), “Robustification de la loi de commande adaptative par la zone morte,” Université Mentouri-Constantine.**
- [BOU 06] Bououden, S. (2006), “Robustification de la loi de commande adaptative par la zone morte,” Université Mentouri – Constantine Faculté Des Sciences d’Ingénieur.**
- [BOU 11] Bourebia, O. (2011), “Commande Prédictive Floue des Systèmes Non Linéaires,” Université Montouri de Constantine, Faculté des Sciences et Techniques de l’ingénieur.**
- [BOU 96] Boucher, P. et Dumur, D. (1996), “la commande prédictive,” collection méthodes et pratiques de l’ingénieur, école centrale de Lille.**
- [BRE 08] Breban, S. (2008), “Etude de système de conversion électromécanique d’une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable,” Arts et métiers Paristech.**

5.2.7.1 L'ouvrage de prise d'eau.....	91
5.2.7.2 Canal d'amenée.....	91
5.2.7.3 Bassin de mise en charge.....	92
5.2.7.4 Conduite forcée.....	92
5.2.7.5 Grille-degrilleur-dessableur.....	93
5.2.7.6 Vannes.....	93
5.2.7.7 Turbine.....	93
a. Principe de fonctionnement.....	93
b. Types de turbines.....	94
5.2.7.8 Générateurs.....	98
A. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	99
B. Modélisation mathématique de la machine synchrone à aimants permanents.....	100
B.1 Hypothèses Simplificatrices.....	100
B.2 Mise en équations de la machine.....	101
B.2.1 Equations électriques.....	101
B.2.2 Equations magnétiques.....	102
B.2.3 Equation mécanique.....	103
B.3 Transformation triphasé – diphasé.....	104
B.3.1 Principe de la transformation de Park.....	104
B.3.2 Transformation de (α, β) au $d - q$ et inversement.....	105
B.3.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents dans le plan de Park.....	105
5.2.7.9 Réseau de distribution.....	108
6. Application de la commande adaptative multivariable à une micro-centrale hydraulique.....	111
6.1 Introduction.....	111
6.2 Description du procédé.....	111
6.2.1 Equations mécaniques.....	112
6.2.2 Equations électriques (En supposant ($x'_d = x_q$)).....	113
6.2.3 Linéarisation du modèle.....	116

autour d'un point d'équilibre, de façon à élaborer le comportement des lois de commandes LQG et GPC à partir de ce modèle. Les résultats obtenus traduisent l'efficacité des lois de commande développées.

Conclusions – Perspectives

Pour conclure, nous présentons une synthèse des travaux effectués ainsi que les principaux résultats obtenus, puis nous proposons des perspectives dans la continuité de ce qui est réalisé, à la fois au niveau théorique qu'au niveau plus appliqué.

L'équation du système en boucle fermée devient alors :

$$y(k) = \frac{q^{-d-1}BR^*}{A+BR^*} y^*(k) + \frac{A}{A+BR^*} e(k) \quad (1.5)$$

dans laquelle R^* est une fonction de transfert différente de R . Il est aisé de voir que le retard est éliminé du second terme du membre de droite d'une telle équation. Le signal de sortie utilisé dans la boucle de retour est maintenant $y(k+d+1)$ au lieu de $y(k)$, et il est non mesurable. Aussi, doit-on le prédire.

Ainsi, l'introduction de la notion de sortie prédite permet la prise en compte de l'effet du retard, à condition, bien entendu, de faire la prédiction à un instant au moins égal à l'instant présent augmenté du retard.

En égalant (1.4) à (1.5), on obtient pour R l'expression suivante :

$$R = \frac{R^*}{1 + R^* \frac{B}{A} (1 - q^{-d-1})} \quad (1.6)$$

En utilisant (1.6), le schéma de la figure (1.2) prend la forme de la figure (1.3). La notation $\hat{A}, \hat{B}$ signifie que la prédiction $\hat{y}(k+d+1)$ est générée en utilisant le modèle du procédé. Le signal utilisé dans la boucle de retour est maintenant une prédiction de $y(k+d+1)$. Si le procédé est correctement estimé ($\hat{A} = A, \hat{B} = B$) et si la perturbation est nulle ($e(k) = 0$), alors le terme de correction est nul ($c(k) = 0$) et $\hat{y}(k) = y(k)$. Dans le cas contraire, c'est-à-dire, si la perturbation est non nulle ou si le procédé n'est pas correctement estimé, $c(k) \neq 0$. De la figure (1.3), l'expression de $\hat{y}(k+d+1)$ s'obtient aisément, soit :

$$\hat{y}(k+d+1) = \frac{\hat{B}}{\hat{A}} u(k) + \left[y(k) - q^{-d} \frac{\hat{B}}{\hat{A}} u(k-1) \right] \quad (1.7)$$

C'est le prédicteur de Smith.

en termes de paramètres du régulateur. Le schéma de la commande adaptative directe est le suivant [NGU 89] [SAN 89]:

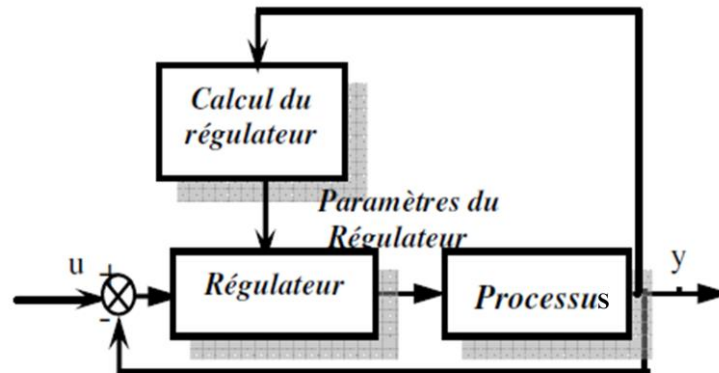


Fig. 2.2 : Commande adaptative directe

2.5 Estimation paramétrique

Dans cette section nous parlerons, d'abord, des propriétés générales que doivent remplir les algorithmes d'estimation paramétrique utilisés dans un schéma de commande adaptative. Ensuite, nous présenterons l'algorithme des moindres carrés récurrents. Enfin, des aspects pratiques et numériques de l'estimateur, liés à l'implantation, seront abordés [SAW 92].

2.5.1 Propriétés de l'estimateur

Pour assurer la stabilité et la robustesse d'un schéma de commande adaptative. Le système d'adaptation doit satisfaire un certain nombre de conditions à savoir :

1. L'estimateur doit reproduire en moyenne, le comportement entrée-sortie du procédé ;
2. les paramètres estimés doivent être bornés ;
3. les paramètres doivent évoluer relativement lentement par rapport à l'état du procédé ;
4. le modèle estimé doit être admissible en moyenne, par rapport à la loi de commande considérée.

L'importance de ces propriétés est directement liée à l'utilisation, laquelle se trouve dans un algorithme de commande adaptative. On peut les considérer comme les conditions (suffisantes) que doit satisfaire un algorithme d'estimation paramétrique faisant partie d'une commande adaptative. Les trois premières propriétés peuvent être assurées par une large classe d'estimateurs. En revanche, la dernière n'est pas évidente à satisfaire et doit, par conséquent, retenir l'attention particulière de l'utilisateur.

Le modèle CARIMA obtenu, on peut lui associer une représentation d'état bloc compaignon sous la forme observable, soit [LAF 93],

$$\alpha(q^{-1}) = \Delta A(q^{-1}) = 1 + \alpha_1 q^{-1} + \alpha_2 q^{-2} + \dots + \alpha_{na+1} q^{-(na+1)} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} x(t+1) = A'x(t) + B'u(t) + G'\xi(t) \\ y(t) = C'x(t) + \xi(t) \end{cases} \quad (3.11)$$

avec

$$A' = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -\alpha_2 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 1 \\ -\alpha_n & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}; B' = \begin{bmatrix} b_0 \\ \vdots \\ b_{n-1} \end{bmatrix}; G' = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}; C' = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (3.12)$$

Où $x(t)$ est l'état du système de dimension $n = \max(na + 1, nb + 1, nc)$.

Cette représentation est observable par construction et stabilisable si $\alpha(q^{-1})$ et $B(q^{-1})$ sont premières à gauche. Notez que le choix d'une forme canonique d'observabilité nous donne une grande souplesse pour la mise en œuvre de l'observateur d'état, qui est nécessaire car en général, les états du système ne sont pas mesurables. L'observateur d'état est donné par :

$$\hat{x}(t) = H\phi_e(t-1) \quad (3.13)$$

Avec

$$H = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & \dots & -\alpha_n & -b_0 & \dots & -b_{n-1} & -p_1 & \dots & -p_n \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_n & \dots & 0 & -b_{n-1} & \dots & 0 & -p_n & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\phi_e^T(t) = [y(t) \dots y(t-n+1) \Delta u(t) \dots \Delta u(t-n+1) \varepsilon(t) \dots \varepsilon(t-n+1)] \quad (3.15)$$

$$\varepsilon(t) = \hat{y}(t) - C'x(t) \quad (3.16)$$

Où $\varepsilon(t)$ représente l'erreur d'observation et la dynamique de l'observateur est donnée par le polynôme matriciel $P(q^{-1})$.

Le terme $E^j(q^{-1}) B(q^{-1}) \Delta u(t + j - 1)$ peut être décomposé en deux parties, l'une dépend de la commande future, l'autre du passé en utilisant l'identité suivante :

$$E^j(q^{-1}) B(q^{-1}) = G^j(q^{-1}) + K^j(q^{-1}) q^{-j} \quad (4.31)$$

$$G^j(q^{-1}) = I + g_1 q^{-1} + \dots + g_{j-1} q^{-j+1} ; g_i \in R^{m,m} \quad (4.32)$$

$$K^j(q^{-1}) = I + K_1^j q^{-1} + \dots + K_{nb-1}^j q^{-nb+1} , K_i^j \in R^{m,m} \quad (4.33)$$

$G^j(q^{-1})$ et $K^j(q^{-1})$ représentent la solution d'ordre minimal $j - 1$ et $nb - 1$ de l'identité polynomiale (4.31) qui peut être résolue de façon récurrente. L'équation de prédiction peut donc se mettre sous la forme :

$$\hat{y}(t + j/t) = G^j(q^{-1}) \Delta u(t + j - 1) + K^j(q^{-1}) \Delta u(t - 1) + F^j(q^{-1}) y(t) \quad (4.34)$$

On pose :

$$y_0(t + j) = K^j(q^{-1}) \Delta u(t - 1) + F^j(q^{-1}) y(t) \quad (4.35)$$

Le prédicteur à j pas dépend ainsi de deux termes :

$$\hat{y}(t + j/t) = G^j(q^{-1}) \Delta u(t + j - 1) + y_0(t + j) \quad (4.36)$$

Ou sous la forme vectorielle :

$$\hat{Y} = G \Delta U_t + Y_0 \quad (4.38)$$

4.2.2.2 Elaboration de la loi de commande

Une fois les prédictions faites, on doit trouver la future séquence de commande à appliquer sur le système pour atteindre les consignes désirées en suivant les trajectoires de référence. Pour cela, on vient minimiser un critère quadratique selon les méthodes.

économique et fiable [AMI 12] Les réservoirs offrent un avantage majeur puisqu'ils permettent de stocker de très grandes quantités d'énergie potentielle qui seront éventuellement converties en énergie électrique. Gérer efficacement la réserve d'énergie stockée dans les réservoirs est une tâche primordiale pour les compagnies productrices d'énergie hydroélectrique [LAO 11]. L'hydroélectricité met en valeur une richesse naturelle importante et produit une énergie propre et entièrement renouvelable, sans aucune émission de gaz à effet de serre. Leur principal désavantage est qu'elles ne sont pas des énergies qui peuvent répondre à des besoins certains, à des moments sûrs, c'est-à-dire que la production d'énergie électrique est dépendante des conditions météorologiques [BEN 07].

En contre partie, les aménagements hydrauliques nécessitent une durée de réalisation qui s'étend sur des années et un lourd investissement initial nécessaire à la construction de barrage.

Toutefois, ces aménagements deviennent à long terme des équipements très rentables car ils [BEN 07] [AMI 12] :

- Exploitent une énergie primaire gratuite et renouvelable, d'où le coût de production est très bas et constant.
- Nécessitent une maintenance réduite.
- Ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

L'adoption de l'énergie hydroélectrique par rapport aux autres types d'énergies dépend principalement de la disponibilité des ressources hydriques et de l'investissement. Un autre facteur encourage cette adoption est la double utilisation des eaux des barrages. En effet l'eau utilisée pour produire l'énergie électrique sera réutilisée pour d'autres fins telles que l'irrigation et l'alimentation en eau potable après traitement [BEN 07].

L'énergie hydroélectrique utilise la force de l'eau, c'est-à-dire, la combinaison d'un débit et d'une chute afin de produire de l'énergie électrique. Autrement dit, l'énergie potentielle de l'eau retenue dans le réservoir se transforme en énergie cinétique, ce qui entraîne la rotation de la turbine hydraulique. La turbine est couplée à un alternateur qui va produire à son tour de l'électricité [BEN 07].

5.2.4 Types de centrales hydroélectriques

On distingue deux types de centrales hydroélectriques : les centrales au fil de l'eau et les centrales alimentées par un réservoir.

Avec

$$x_{ds} = x_d + x_T + x_L; \quad x'_{ds} = x'_d + x_T + x_L; \quad x_s = x_T + x_L \quad (6.15)$$

V_d, V_q : Tension statorique sur l'axe d et l'axe q

I_d, I_q : Courant statorique sur l'axe d et l'axe q

x_d : Réactance totale sur l'axe d entre le générateur et la charge

x_q : Réactance totale sur l'axe q entre le générateur et la charge

x'_d : Réactance transitoire totale sur l'axe d entre le générateur et la charge

T'_{do} : Constante du temps transitoire sur l'axe d en circuit ouvert

x_{ad} : Réactance mutuelle stator-rotor

x_T : Réactance du transformateur

x_L : Réactance de la ligne de transmission

x_s : Réactance du système (transformateur et ligne de transmission)

x_{ds} : Réactance globale

x'_{ds} : Réactance transitoire globale

En utilisant les équations ci-dessus, $P_t(t)$ se réécrit sous la forme :

$$P_t(t) = \frac{V_s x_{ds}}{(x'_{ds})^2} E'_q(t) \sin \delta(t) - \frac{(x_d - x_q)(V_s)^2}{(x'_{ds})^2} \sin \delta(t) \cos \delta(t) \quad (6.16)$$

En termes de variables d'état δ et $\omega(t) = \dot{\delta}(t)$, l'équation (6.2) devient :

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = (P_m - \frac{V_s x_{ds}}{(x'_{ds})^2} E'_q(t) \sin \delta(t) + \frac{(x_d - x_q)(V_s)^2}{(x'_{ds})^2} \sin \delta(t) \cos \delta(t) - D\omega(t)) \frac{\omega_0}{2H} \quad (6.17)$$

En termes des variables d'état $E'_q(t)$ et $E_f(t)$ l'équation (6.3) devient :

$$\frac{dE'_q(t)}{dt} = \frac{\omega_0 r_{fd}}{x_{ad}} E_{fd}(t) - \frac{x_{ds}}{x'_{ds} T'_{do}} E'_q(t) + \frac{(x_d - x_q)V_s}{x'_{ds} T'_{do}} \cos \delta(t) \quad (6.18)$$

- [CAB 08]** **Cabaret, S. (2008)**, “Algorithmes de Contrôles Avancés pour les Installations à Gaz du LHC au CERN suivant le Framework et l’approche dirigée par les modèles du projet GCS,” Université de Picardie Jules Vernes, Centre Européen pour la Recherche Nucléaire.
- [CAM 03]** **Camacho, E.F. et Bordons, C. (2003)**, “Model Predictive Control,” Springer-Verlag London, 2^{ème} édition.
- [CAM 04]** **Camacho E. F. et Bordons, C. (2004)**, “Model predictive control,” London, Springer-Verlag, 2^{ème} édition, 2004.
- [CAMP 03]** **Campello, R. J. G. B., Von Zuben, F. J., Amaral, W. C., Meleiro, L. A. C. et Filho, R. M. (2003)**, “Hierarchical fuzzy models within the framework of orthonormal basis functions and their application to bioprocess control,” Chemical Engineering Science, Vol. 58, pp. 4259-4270.
- [CAR 73]** **Robert L. Carroll, R. L et Lindorff, D. P. (1973)**, “An adaptive observer for single-input single-output linear systems,” IEEE Trans. on Automat. Contr., Vol. AC-18, No. 5, pp. 428-435.
- [CLA 75]** **Clarke, D.W. et Gawthrop, P. J. (1975)**, “Self-tuning controller,” Proc. IEE Vol. 122, No. 9 pp. 920-934.
- [CLA 87]** **Clarke, D. W., Mohtadi, C. et Tuffs, P.S. (1987)**, “Generalized Predictive Control: I. The Basic Algorithm,” Automatica, Vol, 23, No. 2, pp.137-148.
- [CLA 94]** **Clarke, D. W. (1994)**, “Advances in Model-Based Predictive Control, chap. Advances in model-based predictive control,” Oxford University Press., pp. 3-21.
- [CLA 98]** **Clarke, D. W. (1998)**, “Application of generalized predictive control to industrial processes,” IEEE Control Systems Magazine, Vol. 122, pp. 49-55.

6.2.3.1	Modèle d'état non linéaire.....	116
6.2.3.2	Point de fonctionnement nominal.....	117
6.2.3.3	Perturbations.....	117
6.2.4	Résultats de simulations.....	121
6.2.4.1	Résultats de simulations de la commande LQG à paramètres fixes, avec et sans perturbations.....	121
6.2.4.2	Résultats de simulations de la commande LQG adaptive, avec et sans perturbations.....	124
6.2.4.3	Résultats de simulations de la commande GPC à paramètres fixes, avec et sans perturbations.....	133
6.2.4.4	Résultats de simulations de la commande GPC adaptive, avec et sans perturbations.....	135
6.2.5	Interprétation des résultats de simulations.....	142
6.3	Conclusion.....	144
	Conclusion générale.....	145
	Perspectives.....	146
	Bibliographie.....	147

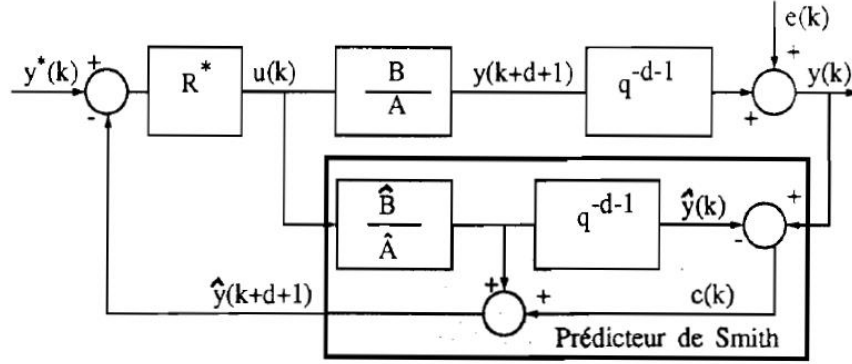


Fig. 1.3 : Schéma de régulation par prédicteur de Smith

Les principaux inconvénients de la méthode du prédicteur de Smith sont, d'une part, l'incapacité de stabiliser des procédés instables en boucle ouverte et, d'autre part, sa sensibilité vis-à-vis des erreurs sur le modèle du processus [WAT 81] [SAW 92].

1.3.2 Commande à Minimum de Variance (MV)

Dans la commande par prédiction, le plus célèbre des algorithmes est certainement celui de la commande par minimum de variance, proposé par Astrom et Wittenmark [SAW 92] [AST 77] [AST 83]. La synthèse de la loi de commande est basée sur le modèle entrée-sortie :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - k) + C(q^{-1})\xi(t) \quad (1.8)$$

Compte tenu de ceci, le modèle de l'équation (1.1) peut se réécrire sous la forme :

$$A(q^{-1})y(t + k) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})\xi(t + k) \quad (1.9)$$

L'objectif de la commande consiste en la minimisation d'un critère quadratique, constitué de l'erreur de prédiction de la sortie par rapport à la référence à l'instant $(t+k)$ [AST 77] [BOR 79]

$$J = E\{[y_r(t + k) - y(t + k)]^2 / t\} \quad (1.10)$$

Pour calculer le prédicteur à k pas en avant, on fait appel à l'équation de Diophantine :

2.5.2 Avantages d'une estimation paramétrique

L'estimation des paramètres par la méthode des moindres carrés récursifs procure les avantages suivants [LAN 02] :

- Obtention d'une estimation du modèle au fur et à mesure que le procédé évolue ;
- Compression importante des données ;
- Nécessite moins de puissance de calcul et de mémoire ;
- Mise en œuvre facile sur microprocesseur ;
- Identification en temps réel si nécessaire ;
- Possibilité de poursuite des paramètres variables dans le temps.

2.5.3 Moindres carrés récursifs

Étant donné que le concept de cette méthode est basé sur la régression linéaire, nous devons définir cette dernière avant de parler de la méthode elle-même.

2.5.3.1 Régression linéaire

La régression linéaire est une technique mathématique qui consiste à trouver la relation existant entre des variables dont au moins une est aléatoire, inconnue ou sujette à des variations aléatoires ou à des mesures inconnues. Le but de la régression linéaire est de calculer la meilleure valeur possible de chacun des p paramètres du vecteur θ

$$\theta = [\theta_1; \theta_2; \theta_3; \theta_4; \dots; \theta_p]^T \quad (2.1)$$

θ : Vecteur des paramètres à estimer

En d'autres termes, il faut estimer les p paramètres afin que notre modèle représente fidèlement la réalité incarnée par le système physique.

En général le modèle utilisé pour la régression linéaire est de la forme :

$$y(k) = \phi^T k(\theta) + e(k) \quad (2.2)$$

Où :

$y(k)$ représente la sortie du modèle ;

ϕ^T représente le "régresseur". C'est un vecteur $1 \times p$, p étant le nombre de paramètres à estimer. Il est formé de données enregistrées sur le système et/ou des constantes ;

3.2.1.2 Loi de commande

La loi de commande linéaire quadratique gaussienne peut être obtenue en faisant tendre les horizons de prédiction et de commande vers l'infini [AND 90]. Le critère quadratique à minimiser est alors donnée par [MSA 96] [LAF 93] :

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{t=0}^T \{ [y(t) - y^*(t)]^T Q [y(t) - y^*(t)] + u^T(t-1) \Lambda u(t-1) \} \quad (3.17)$$

La loi de commande qui minimise le critère (3.17)

$$\Delta u(t) = -\Gamma(t)x(t) - v(t) + W(t) \quad (3.18)$$

Avec

$$\Gamma(t) = (B'^T R B' + \Lambda)^{-1} B'^T R A' \quad (3.19)$$

$$W(t) = (B'^T R B' + \Lambda)^{-1} B'^T R G' [y(t) - C' x(t)] \quad (3.20)$$

$$v(t) = (B'^T R B' + \Lambda)^{-1} B'^T [Y^*(t+1) + (A' - B' \Gamma) Y^*(t+2)] \quad (3.21)$$

$$Y^*(t) = [y^*(t) \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (3.22)$$

$$R(t+1) = A'^T \left[R(t) - R(t) B' [\Lambda + B'^T R(t) B']^{-1} B'^T R(t) \right] A' + C'^T Q C'; R(0) > 0 \quad (3.23)$$

Quand $t \rightarrow \infty$, $R(t) \rightarrow R^*$, Où R^* est l'unique matrice définie positive solution de l'équation de Riccati

$$R = A'^T \left[R - R B' [\Lambda + B'^T R B']^{-1} B'^T R \right] A' + C'^T Q C'; R(0) > 0 \quad (3.24)$$

L'existence et unicité de R^* découlent des deux propriétés suivantes :

- Le couple (A', B') est stabilisable (on a l'hypothèse que le couple $(\Delta A, B)$ est premier à gauche).

On considère le critère à minimiser par rapport à la séquence de commande $u(t), u(t+1), \dots, u(t+N_u-1)$ de la forme :

$$J(N_i, N_p, N_u, t) = \sum_{j=N_i}^{N_p} [y_r(t+j) - \hat{y}(t+j/t)]^T R [y_r(t+j) - \hat{y}(t+j/t)] + \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u^T(t+j-1) Q \Delta u(t+j-1) \quad (4.42)$$

$y_r(t+j)$: La séquence de consigne future ou de référence.

N_p : L'horizon de prédiction

N_i : L'horizon initial

N_u : L'horizon de commande

R : Une matrice diagonale définie positive

Q : Une matrice diagonale semi-définie positive

A l'aide du pédicteur optimal (4.36), le problème de minimisation du critère (4.42) par rapport à ΔU_t est équivalent au problème de minimisation quadratique suivant :

$$\min_{\Delta U_t} J(N_i, N_p, N_u, t) = \min_{\Delta U_t} \left\{ \sum_{j=N_i}^{N_p} [y_r(t+j) - \hat{y}(t+j/t)]^T R [y_r(t+j) - \hat{y}(t+j/t)] + \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u^T(t+j-1) Q \Delta u(t+j-1) \right\} \quad (4.43)$$

Où $\min_{\Delta U_t} J(\cdot)$ représente le problème de recherche du vecteur ΔU_t qui minimise le critère $J(\cdot)$

Si $N_u = N_p$ et $N_i = 1$ en utilisant la forme vectorielle. Le critère (4.43) s'écrit sous la forme :

$$\min_{\Delta U_t} J(N_i, N_p, N_u, t) = \min_{\Delta U_t} \left[[Y_r - \hat{Y}]^T \bar{R} [Y_r - \hat{Y}] + \Delta U_t^T \bar{Q} \Delta U_t \right] \quad (4.44)$$

Avec

$$Y_r^T = [y_r^T(t+1), \dots, y_r^T(t+N_p)] \quad (4.45)$$

$$\bar{R} = \text{diag}(R, \dots, R) \quad (4.46)$$

$$\bar{Q} = \text{diag}(Q, \dots, Q) \quad (4.47)$$

5.2.4.1 Les centrales au fil de l'eau

Il s'agit d'une centrale installée directement dans le lit de la rivière et qui ne possède pas de réservoir. Le débit turbiné correspond au débit naturel du cours d'eau. La puissance produite varie uniquement avec ce débit.

5.2.4.2 Les centrales alimentées par un réservoir

Il s'agit d'une centrale alimentée par une retenue d'eau permettant un stockage d'eau saisonnier ou interannuel. Le réservoir permet de moduler le débit d'eau et offre donc une souplesse pour répondre aux variations de la demande d'électricité.

5.2.5 Classification des petites centrales

La classification s'effectue en fonction de la manière dont l'eau est captée et conduite à la turbine, de l'emplacement de cette dernière et de la hauteur de chute ou dénivellation exploitée.

On distingue deux classes principales de petites centrales:

5.2.5.1 Installations à basse pression

Le long d'un cours d'eau ou sur un canal de dérivation. L'ouvrage le plus important est le barrage, ou prise d'eau, le plus souvent construit en béton. Sa fonction est de détourner le débit nécessaire directement vers la turbine ou dans un canal de dérivation tout en laissant passer les crues. La centrale est soit intégrée directement dans le barrage, soit placée à l'extrémité d'un canal.

Il n'y a en règle générale pas de conduite forcée, ou celle-ci reste très courte.

Les chutes se situent entre 2 et 20 mètres et la pression dans la turbine est faible (0,2 à 2 bars) [BRE 08].

5.2.5.2 Installations à moyenne et haute pression

Les installations à moyenne et haute pression se trouvent sur des cours d'eau, des sources de montagne, des réseaux d'eau potable et dans des circuits hydrauliques industriels. Aux composants mentionnés pour la première catégorie s'ajoute une conduite forcée entre la prise d'eau, ou l'extrémité du canal de dérivation, et la centrale. La conduite est l'ouvrage le plus important de ce type de petite centrale.

La figure ci-dessous montre les parties les plus importantes d'une centrale à haute pression sur un canal de dérivation.

Avec,

$$T'_{do} = \frac{x_{ad}}{\omega_0 r_{fd}} \quad (6.19)$$

r_{fd} : Résistance du champ

Pour la vanne de régulation on a équation suivante :

$$\frac{P_w}{U_g} = \frac{K_v}{1 + \tau_g s} \quad (6.20)$$

P_w : Puissance hydraulique

K_v : Constante de la vanne de régulation

τ_g : Constante du temps de la vanne de régulation

L'équation de l'excitateur est :

$$\frac{E_{fd}}{U_e} = \frac{1}{1 + \tau_e s} \quad (6.21)$$

τ_e : Constante du temps de l'excitateur

L'équation de la turbine est :

$$\frac{P_m}{P_w} = \frac{1}{1 + \tau_b s} \quad (6.22)$$

τ_b : Constante du temps de la turbine

En termes des variables d'état E_{fd} , P_w et P_m les équations (6.20)-(6.22) peuvent être réécrites sous la forme:

$$\frac{dP_w(t)}{dt} = \frac{-P_w}{\tau_g} + \frac{K_v}{\tau_g} U_g \quad (6.23)$$

$$\frac{dE_{fd}(t)}{dt} = \frac{-E_{fd}(t)}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_e} U_e \quad (6.24)$$

- [COS 01]** **Costa, A. C., Meleiro, L. A. C. et Maciel Filho, R. (2001),** “Non-linear predictive control of an extractive alcoholic fermentation process,” *Process Biochemistry*, Vol. 38, pp. 743-750.
- [CUT 80]** **Cutler, C. R. et Ramaker, B. L. (1980),** “Dynamic matrix control: a computer control algorithm,” *Joint Automatic Control Conference*, San Francisco.
- [DAN 00]** **Daniel, O. (2000),** “Modelling and nonlinear control of voltage frequency of hydroelectric power plants,” *Universidad Politécnica de Cataluna, Instituto de Organizacion y Control de Sistemas Industriales*.
- [DEM 69]** **Demello, F. P. et Concordia, C. (1969),** “Concepts of Synchronous Machine Stability as affected by Excitation Control,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 88, No. 4, 316-328.
- [DIO 96]** **Dion, J. M. et Popescu, D. (1996),** “Commande optimale-conception optimisée des systems,” *Diderot, Paris*.
- [DOW 01]** **Dowd, J. E., Kwok, K. E. et Piret, J. M. (2001),** “Predictive modeling and loose-loop control for perfusion bioreactors,” *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 9, pp. 1-9.
- [ERR 10]** **Errouissi, R. (2010),** “Contribution à la commande prédictive non linéaire d’une machine synchrone à aimants permanents,” *Université du Québec à Chicoutimi*.
- [ESS 01]** **Essen, H.V. et Hijmeijer, H. (2001),** “Nonlinear model predictive control of constrained mobile robots,” In: *Proceedings of the European Control Conference*. Porto, Portugal. pp.1157-1162.
- [FER 95]** **Ferreres, G. (1995),** “De l’utilisation des outils de robustesse pour la commande adaptative,” *Institut national polytechnique de Grenoble*.

$$C(q^{-1}) = E(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-k}F(q^{-1}) \quad (1.11)$$

Une injection de (1.11) dans (1.9) conduit à :

$$y(t+k) = \hat{y}(t+k/t) + \tilde{y}(t+k/t) \quad (1.12)$$

Avec,

$$\hat{y}(t+k/t) = \frac{F(z^{-1})y(t) + G(z^{-1})u(t)}{C(z^{-1})} \text{ le prédicteur à } k \text{ pas en avant}$$

$$\tilde{y}(t+k/t) = E(z^{-1})\xi(t+k/t) \quad \text{l'erreur de prédiction et } G(q^{-1}) = E(q^{-1})B(q^{-1}).$$

En minimisant J , on obtient pour le contrôleur à minimum de variance [THA 99] l'expression suivante :

$$u(t) = -\frac{F(z^{-1})}{G(z^{-1})}y(t) \quad (1.13)$$

Les principaux inconvénients de la commande à minimum de variance sont, d'une part, la connaissance avec exactitude de la valeur du retard, ce qui n'est pas toujours évident en pratique et nécessite de disposer d'un modèle de prédiction à phase minimale (polynôme B Stable), et d'autre part, l'absence du terme de commande dans le critère à minimiser conduit à des efforts de commande très importants.

Pour ce dernier problème, une solution a été apportée par l'incorporation dans le critère d'une pondération du terme de commande [CLA 75]. C'est la commande à minimum de variance généralisée, dont le principe vient comme suit.

1.3.3 Commande à minimum de variance généralisée (GMV)

Cette approche est une généralisation de la commande à variance minimale. Elle réalise le compromis de minimiser la variance de l'erreur de poursuite et la variance de la variable de commande [CLA 75]. Le critère quadratique à minimiser est de la forme :

$$J = E\{R[y^*(t+k+1) - y(t+k+1)]^2 + \lambda[u(t) - u(t-1)]^2/t\} \quad (1.14)$$

θ est le vecteur des paramètres. C'est un vecteur $1 \times p$ formé des paramètres à estimer ;

$e(k)$ est la partie aléatoire du modèle, supposée généralement être un bruit blanc centré.

2.5.3.2 Estimateur des moindres carrés

Considérons, tout d'abord, une régression linéaire et l'équation d'erreur d'un processus dont les paramètres sont à identifier:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) - b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) = e(k) \quad (2.3)$$

Définissons ensuite le vecteur des entrées et sorties

$$\varphi(k) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, y(k-n), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n)]^T \quad (2.4)$$

et celui des paramètres θ à estimer

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_n \ b_1 \ \dots \ b_n]^T \quad (2.5)$$

de sorte que la sortie à l'instant k s'écrit :

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + e(k) \quad (2.6)$$

L'estimation se fera à partir de $N - n + 1$ série de mesures et puisque le processus est d'ordre n , nous aurons :

$$\begin{cases} y(n) = \varphi^T(n)\theta + e(n) \\ y(n+1) = \varphi^T(n+1)\theta + e(n+1) \\ \vdots \\ y(N) = \varphi^T(N)\theta + e(N) \end{cases} \quad (2.7)$$

L'estimateur des moindres carrés a pour objectif la minimisation du critère :

$$J_N(\theta) = \sum_{k=n}^N e^2(k) = \sum_{k=n}^N [y(k) - \varphi(k)^T \theta]^2 \quad (2.8)$$

- (A', C') est détectable (il est même observable par construction)

Ces deux propriétés entraînent la stabilité asymptotique de la matrice du système bouclé :

$$(A' - B'\Gamma^*) \quad (3.25)$$

Avec

$$\Gamma^* = \Gamma(t) \text{ pour } R(t) = R^* \quad (3.26)$$

3.2.2 Commande Prédictive Généralisée GPC monovariante

Cette partie a pour but d'analyser la structure la plus utilisée de la commande prédictive qui est la commande GPC.

3.2.2.1 Méthodologie de la commande GPC

Dans sa formulation la plus générale, la méthodologie concernant l'approche de la commande GPC peut s'illustrer sur le schéma représenté sur la figure (3.1).

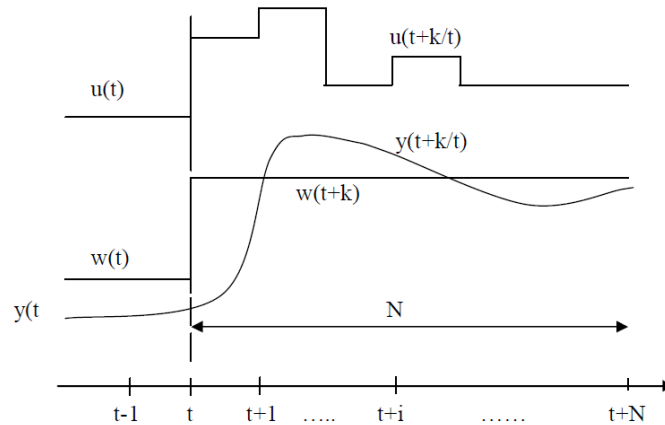


Fig. 3.1: La méthodologie de la commande prédictive

Le principe du fonctionnement de la commande GPC peut être caractérisé ainsi:

1. A chaque instant d'échantillonnage k , les sorties futures du système sont prédites sur un horizon de temps N_p , appelé horizon de prédiction, qui est relativement long par rapport à la vitesse d'évolution du procédé. Les prédictions $\hat{y}(t + j/t)$, pour $j = 1, \dots, N_p$, sont réalisées en utilisant le modèle du système et dépendent non seulement du passé du système, mais aussi des commandes futures $u(t+i)$, pour $i =$

Ou :

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U_t} J(N_i, N_p, N_u, t) &= \min_{\Delta U_t} [(Y_r - G \Delta U_t - Y_0)^T \bar{R} (Y_r - G \Delta U_t - Y_0) + \Delta U_t^T \bar{Q} \Delta U_t] = \\ \min_{\Delta U_t} [(Y_r - Y_0)^T \bar{R} (Y_r - Y_0) + \Delta U_t^T (G^T \bar{R} G + \bar{Q}) \Delta U_t - 2(Y_r - Y_0)^T \bar{R} G \Delta U_t] \end{aligned} \quad (4.48)$$

Puisque $(Y_r - Y_0)^T \bar{R} (Y_r - Y_0)$ est indépendant des entrées présentes et futures, la relation (4.48) est équivalent à

$$\min_{\Delta U_t} J(N_i, N_p, N_u, t) = \min_{\Delta U_t} [\Delta U_t^T (G^T \bar{R} G + \bar{Q}) \Delta U_t - 2(Y_r - Y_0)^T \bar{R} G \Delta U_t] \quad (4.49)$$

La solution est de trouvée en annulant la dérivée du critère par rapport à ΔU_t

$$\frac{\partial J(N_i, N_p, N_u, t)}{\partial \Delta U_t} = 0 \quad (4.50)$$

Quand il n'y pas de contraintes et que $(G^T \bar{R} G + \bar{Q})$ est définie positive la solution s'exprime sous la forme explicite suivante :

$$\Delta U_t = (G^T \bar{R} G + \bar{Q})^{-1} G^T \bar{R} (Y_r - Y_0) \quad (4.51)$$

Le premier élément de ΔU_t est $\Delta u(t)$, donc la loi de commande est :

$$u(t) = u(t-1) + [I \ 0 \ \dots \ 0] (G^T \bar{R} G + \bar{Q})^{-1} G^T \bar{R} (Y_r - Y_0) \quad (4.52)$$

De façon à restreindre la dimension du problème étudié et le temps de calcul, comme dans le cas du GPC [Clarke et al, 1987], on impose à l'entrée d'être constante après un certain horizon de commande N_u , i.e $\Delta u(t+j-1) = 0$ si $j > N_u$

Dans ce cas là, l'équation (4.49) s'écrit pour $N_u < N_p$ et $N_i = 1$ comme suit :

$$\min_{\Delta U_t} J(N_i, N_p, N_u, t) = \min_{\Delta U_{t, N_u}} [\Delta U_{t, N_u}^T (G_{N_u}^T \bar{R} G_{N_u} + \bar{Q}_{N_u}) \Delta U_{t, N_u} - 2(Y_r - Y_0)^T \bar{R} G_{N_u} \Delta U_{t, N_u}] \quad (4.53)$$

Avec

Dans leur principe, les petites centrales se distinguent peu des grandes installations. La différence se situe avant tout au niveau de la simplicité de conception et d'exploitation.

En effet, les petites centrales doivent non seulement être peu coûteuses à la construction, mais doivent aussi pouvoir fonctionner automatiquement sans personnel permanent et avec un minimum de surveillance et d'entretien.

En règle générale elles sont exploitées au fil de l'eau, sans réservoir d'accumulation, éléments trop coûteux pour de petites installations. Lorsqu'il y a stockage temporaire par le biais d'un étang ou d'un réservoir, celui-ci sert tout au plus à produire de l'énergie de pointe durant quelques heures de la journée.



Fig. 5.1 : Vue d'ensemble d'une centrale à haute pression sur canal de dérivation

5.2.6 Constitutions d'une centrale hydroélectrique

Une centrale hydroélectrique se compose principalement d'un réservoir, d'une conduite à la turbine, d'une turbine couplée avec une génératrice électrique comme il est illustré à la figure ci-dessous:

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{-P_m}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_b} P_w \quad (6.25)$$

En définissant $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T = [\delta \ \dot{\delta} \ E'_q \ E_{fd} \ P_w \ P_m]^T$ le vecteur des variables d'état. Les équations précédentes peuvent se récrire sous la forme de représentation d'état suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = (x_6 - K_1 x_3 \sin x_1 - K_2 \sin x_1 \cos x_1 - D x_2) \frac{\omega_0}{2H} \\ \dot{x}_3 = \frac{\omega_0 r_{fd}}{x_{ad}} x_4 + K_3 x_3 - K_4 \cos x_1 \\ \dot{x}_4 = \frac{-x_4}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_e} U_e \\ \dot{x}_5 = \frac{-x_5}{\tau_g} + \frac{1}{\tau_g} U_g \\ \dot{x}_6 = \frac{-x_6}{\tau_b} + \frac{x_5}{\tau_b} \end{array} \right. \quad (6.26)$$

Lesquelles servent à formuler les sorties y_1 et y_2 comme suit :

$$y_1 = P_t = K_1 x_3 \sin x_1 + K_2 \sin x_1 \cos x_1 \quad (6.27)$$

$$y_2 = V_t = (V_d^2 + V_q^2)^{1/2} \quad (6.28)$$

Avec,

$$V_d = K_5 \sin x_1 \quad (6.29)$$

$$V_q = K_6 x_3 + K_7 \cos x_1 \quad (6.30)$$

6.2.3 Linéarisation du modèle

6.2.3.1 Modèle d'état non linéaire

Le modèle d'état d'une équation non-linéaire stationnaire se constitue de :

- Equation d'état

- [FEU 78]** **Feuer, A., Morse, A. S. et Barmish, B. R. (1978)**, “An unstable system associated with model reference adaptive control,” IEEE Transactions on Automatic Control, 23, pp. 499-500.
- [FIL 12]** **Filali, R. (2012)**, “Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO₂,” SUPELEC, Ecole Centrale Paris.
- [FLI 10]** **Flila, S. (2010)**, “Identification optimale et commande prédictive. Applications en Génie des Procédés,” UCBL1, Lyon.
- [FOS 95]** **Foss, B. A., Johansen, T. A. et Sorensen A. V. (1995)**, “Nonlinear predictive control using local models-applied to a batch fermentation process,” Control Engineering Practice, Vol. 3, No. 3, pp. 389-396.
- [FRA 99]** **Fraenkel, P. (1999)**, “Flowing too slowly - Performance and potential of small hydro-power,” Renewable Energy World, Vol. 2, No. 2.
- [GIN 03]** **Ginhoux, R. (2003)**, “Compensation des mouvements physiologiques en chirurgie robotisée par commande prédictive,” Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- [GOO 84]** **Goodwin, G. C. et Sin, K. S. (1984)**, “Adaptive Filtering Prediction and Control,” Prentice- Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [GRE 00]** **Grellet, G. et Clerc, G. (2000)**, “Actionneurs électrique Principe/Modèle/Commande,” Eyrolles, Deuxieme Edition.
- [GRE 04]** **Greiveldinger, B. (2004)**, “Étude de la stabilité de réglage d’une centrale hydroélectrique en réseau séparé,” Faculté des sciences et techniques de l’ingénieur, Institut des sciences de l’énergie.
- [IDI 11]** **Idiri, G. (2011)**, “Commande prédictive des systèmes non linéaires dynamiques,” Université Mouloud Mamméri de Tizi-Ouzou, Faculté de génie électrique et informatique.

où R et λ sont des termes de pondération. Par un choix adéquat, la pondération λ permet d'avoir des efforts de commande raisonnables. Par contre le problème de l'incapacité à contrôler des procédés à non minimum de phase persiste [GIN 03].

1.3.4 Commande prédictive

Le concept de la commande prédictive est envisagé comme solution au problème précédemment mentionné. Ce concept fait appel à un ensemble de prédictions effectuées sur un horizon supérieur au retard, d'où une relative insensibilité à la valeur de ce retard.

La commande prédictive est une stratégie de commande avancée qui a connu un intérêt croissant ces dernières années dans de nombreux secteurs industriels [NAJ 82]. Les vraies raisons de l'avènement d'une telle technique sont précisées en introduction (Cf. 1.1).

1.3.4.1 Philosophie de la commande prédictive

La philosophie de la commande prédictive ou commande à horizon glissant, est basée sur la notion essentielle de prédiction, d'où son nom. Il faut prédire le comportement futur du système afin de pouvoir le contrôler par anticipation.

La commande prédictive se différencie des autres techniques de commande par le fait que doit être résolu en ligne, elle consiste à optimiser, à partir des entrées/sorties d'un système (état, couples,...), le comportement futur prédit du système considéré. La prédiction est faite à partir d'un modèle interne du système sur un intervalle de temps fini appelé horizon de prédiction. La solution du problème d'optimisation est un vecteur de commande dont la première entrée de la séquence optimale est injectée au système. Le problème est à nouveau résolu sur l'intervalle de temps suivant en utilisant les données du système mises à jour [BEN 09].

1.3.4.2 Critère de performance (fonction objectif)

Les divers algorithmes d'une commande prédictive proposent différentes fonctions de coût pour obtenir la loi de commande. L'objectif principal consiste à faire en sorte que la sortie future pour l'horizon de prédiction considéré s'approche de la meilleure façon possible de la trajectoire de référence $y_r(t+j)$ avec un minimum d'effort $u(t+j-1)$. Une expression générale de fonction objectif adaptée à cette tâche est donnée par [MIG 04]

$$J(N_i, N_p, N_u) = E \left\{ \sum_{j=N_i}^{N_p} [P(j)(y_r(t+j) - y(t+j))]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 / t \right\} \quad (1.15)$$

On cherche le vecteur de paramètres θ qui minimise $J_N(\theta)$. Comme le critère est quadratique, il existe une solution analytique (en annulant sa dérivée première), ce qui donne, sous réserve que l'inverse existe :

$$\theta_N(k) = [\sum_{k=n}^N \varphi(k)\varphi(k)^T]^{-1} \sum_{k=n}^N \varphi(k)y(k) \quad (2.9)$$

Remarque : Cette formule analytique ne sera pas utilisée directement, car elle n'est pas stable numériquement.

2.5.3.3 Méthode des moindres carrés récurrents

Si les données sont en nombre trop important ou si on souhaite utiliser le modèle à l'instant k sans attendre la fin des mesures, il est nécessaire d'utiliser un algorithme récursif : la méthode recalcule une nouvelle estimation des paramètres, à chaque instant, sur la base de l'estimation précédente.

Posons

$$R(k) = \sum_{t=n}^k \varphi(t)\varphi(t)^T \quad (2.10)$$

$$f(k) = \sum_{t=n}^k \varphi(t)y(t) \quad (2.11)$$

il vient

$$\hat{\theta}(k) = R(k)^{-1}f(k) \quad (2.12)$$

$R(k)$ et $f(k)$ peuvent être mis sous forme récursive sans aucune approximation, soit :

$$R(k) = R(k-1) + \varphi(k)\varphi(k)^T \quad (2.13)$$

$$f(k) = f(k-1) + \varphi(k)y(k) \quad (2.14)$$

On en déduit :

$$\hat{\theta}(k) = R(k)^{-1}f(k) \quad (2.15)$$

$0, \dots, N_p - 1$, à déterminer et appliquer au système. Par conséquent, le modèle du système fait partie de l'algorithme de commande. Ainsi la prédiction ne va pas dépendre uniquement des sorties précédentes mais aussi de l'évolution envisagée dans le temps futur pour la variable de commande. Notons que plusieurs évolutions sont possibles pour la variable de commande [IDI 11].

2. La séquence de signaux de commande, dénote par $u(t + i / t)$, $i = 0, \dots, N_p - 1$, est calculée en minimisant un critère de performance afin de mener la sortie du processus vers une sortie de référence. On dénote par $w(t + j / t)$, $i = 0, \dots, N_p$, d'habitude le critère de performance à minimiser est un compromis entre une fonction quadratique des erreurs entre $y(t + j / t)$ et $w(t + j / t)$ et un coût de l'effort de commande [BEN 09]
3. Le signal de commande $u(t/t)$ déterminée par optimisation sera ensuite envoyé au processus tandis que les autres signaux de commande sont oubliés. Au temps $t + 1$ on acquiert la sortie réelle $y(t+1)$ et on recommence au premier [BEN 09] [BOU 96]. Ceci permet d'obtenir une valeur réactualisée pour la commande, en fonction des mesures les plus récentes en utilisant le concept de l'horizon glissant.

3.2.2.2 Éléments de la commande GPC

Dans la figure (3.2) on montre la structure basique, commune à toutes les stratégies de commande GPC.

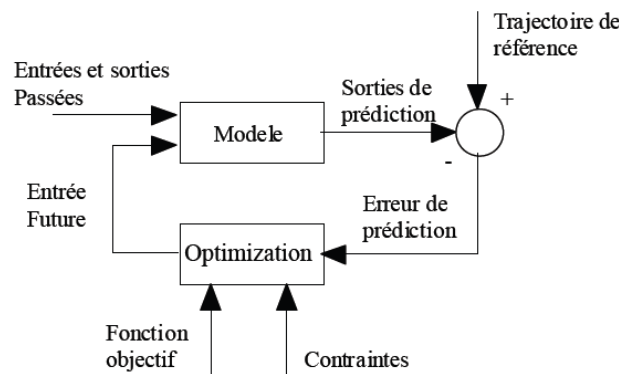


Fig. 3.2 : Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes d'une commande prédictive

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments [IDI 11]:

- Un modèle du système (pour la prédiction).
- Une fonction objective pour calculer la stratégie optimale de commande ;

$$\Delta U_{t,N_u}^T = [\Delta u^T(t), \dots, \Delta u^T(t + N_u - 1)] \quad (4.54)$$

$$G_{N_u} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ g_{N_p-1} & g_{N_p-2} & \dots & \dots & g_{N_p-N_u} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

La loi de commande s'écrit alors :

$$\Delta U_{t,N_u} = (G_{N_u}^T \bar{R} G_{N_u} + \bar{Q}_{N_u})^{-1} G_{N_u}^T \bar{R} (Y_r - Y_0) \quad (4.56)$$

La loi de commande optimale est alors :

$$u_{N_u}(t) = u_{N_u}(t-1) + [I \ 0 \ \dots \ 0] (G_{N_u}^T \bar{R} G_{N_u} + \bar{Q}_{N_u})^{-1} G_{N_u}^T \bar{R} (Y_r - Y_0) \quad (4.57)$$

Le schéma de la commande prédictive généralisée est présenté sur la figure suivante :

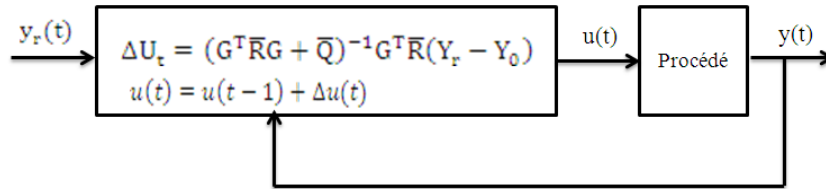


Fig. 4.1 : Schéma de commande prédictive

Remarques sur le choix des paramètres de synthèse

Le choix des paramètres de synthèse est similaire au cas monovariable

4.2.2.3 Mise en œuvre

Dans la pratique, le succès d'une loi de commande numérique dépend fortement de la mise en œuvre, i.e. les algorithmes et méthodes numériques utilisées pour les calculs.

Pour la mise en œuvre du GPC, nous devons résoudre l'équation :

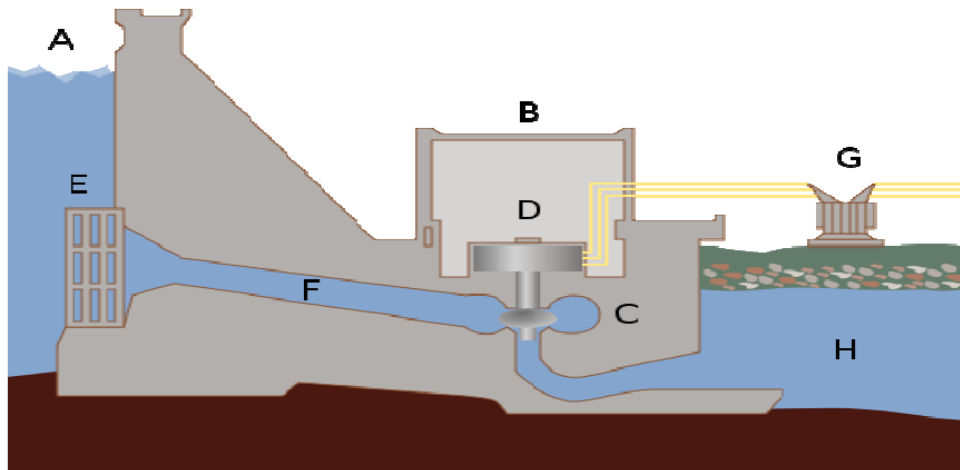


Fig. 5.2 : Constitution d'une centrale hydroélectrique

L'eau présente dans le réservoir (A) coule à travers la conduite forcée (F) jusqu'à la rivière (H). En coulant, elle fait tourner la turbine (C) qui permet de générer de l'électricité grâce au générateur (D) (principe de la dynamo). La centrale électrique (B) possède plusieurs conduites forcées, turbines et générateurs. La vanne (E) permet de contrôler la quantité d'eau qui passe à travers la conduite forcée (F) et donc la quantité d'énergie électrique qui est produite. L'énergie électrique ainsi produite est transportée grâce à des lignes haute tension (G) aux consommateurs.

5.2.7 Description d'une petite centrale

5.2.7.1 L'ouvrage de prise d'eau

Il s'agit d'un ouvrage de dérivation de forme et de dimension adaptée aux conditions techniques locales. La prise d'eau a pour fonction de délivrer le débit nécessaire pour alimenter la turbine.

La prise d'eau peut comporter :

- Un seuil équipé de grosses grilles pour arrêter les galets et les branchages.
- Un bassin de décantation des sables et limons
- Des grilles fines pour arrêter l'essentiel des feuilles et des corps flottants.
- Une vanne pour la protection et l'isolement de l'ouvrage d'amenée.
- Des systèmes de chasse et de purge pour nettoyer le bassin de décantation

5.2.7.2 Canal d'amenée

Les ouvrages d'amenée sont les ouvrages qui relient la prise d'eau à la conduite forcée, ils peuvent être en terre ou en béton.

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = f_1(X_1(t), \dots, X_n(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \\ \vdots \\ \dot{X}_n = f_n(X_1(t), \dots, X_n(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \end{cases} \quad (6.31)$$

- Equation de sortie

$$\begin{cases} Y_1 = g_1(X_1(t), \dots, X_n(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \\ \vdots \\ Y_n = g_n(X_1(t), \dots, X_n(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \end{cases} \quad (6.32)$$

qu'on peut présenter sous la forme matricielle suivante :

$$\dot{X} = f(X(t), U(t)) \quad (6.33)$$

$$Y = g(X(t), U(t)) \quad (6.34)$$

où $X(t), U(t)$ et $Y(t) \in \mathcal{R}^n$ et f et g sont des champs de fonctions non linéaires.

f et g sont des champs de fonctions non linéaires

6.2.3.2 Point de fonctionnement nominal

Soient $\bar{U}$ une entrée nominale et $\bar{X}$ l'état correspondant tels que :

$$\dot{\bar{X}} = f(\bar{X}(t), \bar{U}(t)) \quad (6.35)$$

$(\bar{X}(t), \bar{U}(t))$ défini une trajectoire dans l'espace qui peut se réduire à un point de fonctionnement $(\bar{X}, \bar{U})$ telle que :

$$\bar{Y} = g(\bar{X}(t), \bar{U}(t)) \quad (6.36)$$

6.2.3.3 Perturbations

Soient $u(t)$ des perturbations faibles affectant $\bar{U}$. Alors :

- [IOA 96]** **Ioannou, P. A. et Sun, J. (1996)**, “Stable and Robust Adaptive Control,” Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [KAD 00]** **Kaddouri, A. (2000)**, “Étude d’une commande non linéaire adaptative d’une machine synchrone à aimant permanent,” Université Laval Québec.
- [KEE03]** **Keerthi, S. S. et Gilbert, E. G. (2003)**, “Optimal infinite-horizon feedback laws for a general class of constrained discrete time systems: Stability and moving-horizon approximations,” *Journal of optimization Theory and Applications*, Vol. 57, No. 2, pp. 265-293.
- [KEY 79]** **De Keyser, R. M. C. et Van Cauwenberghe, A. (1979)**, “A self-tuning multistep predictor application,” *Automatica*, vol. 15, pp. 167-174.
- [KEY 88]** **De Keyser, R. M. C., Van de Velde, Ph. G. A. et F.G.A Dumortier, (1988)**, “A Comparative Study of Self-adaptive Long-range Predictive Methods,” *Automatica*, vol. 24, pp. 149-163.
- [KHA 06]** **Khatounian, F. (2006)**, “Contribution a la Modélisation, L’Identification et à la Commande d’une Interface Haptique à un Degré de Liberté Entraînée par une Machine Synchrone à Aimants Permanents,” Ecole Normale Supérieure de Cachan, France.
- [KIY 04]** **Kiyyour, B. (2004)**, “Commande vectorielle de la machine à réluctance variable à stator lisse et rotor massif,” *Electrotechnique*, Université de Batna.
- [KOD 94]** **Kodosakis, D.E. (1994)**, “Gestion des Ressources Naturelles et d’Energie,” Éditions A. Stamoulis, Le Pirée.
- [KUE 02]** **Kueny, J. L. (2002)**, “Turbomachines hydrauliques,” Notes de cours, Laboratoire de machines hydrauliques, EPF Lausanne.
- [LAF 93]** **Ait Lafkih, M. (1993)**, “State observance in adaptive multivariable control, *Advances in Modeling & Analysis*,” AMSE Press, Vol. 39, No.2, pp. 43-49.

Où les pondérations $P(j)$ et $\lambda(j)$ sont symétriques définies positives. Leur choix caractérise l'importance relative que nous souhaitons donner aux diverses composantes du critère à minimiser [IDI 11].

Dans quelques méthodes le deuxième terme, relatif à l'effort de commande, n'est pas pris en compte. Une comparaison de différents types de fonction objectif, peut être trouvée dans [CAMP 03].

a. Paramètres

Choisir le bon modèle du système et un correcteur prédictif comme stratégie de commande ne résout pas encore le problème. Il reste à déterminer les paramètres de réglage spécifiques à la commande prédictive, qui interviennent généralement dans le critère de minimisation [STO 08].

Ces paramètres de réglage sont les suivants : N_i , N_p et N_u représentent respectivement l'horizon de prédiction initial, l'horizon de prédiction maximal et l'horizon de commande [IDI 11], et les facteurs de pondérations sur l'erreur de poursuite $P(j)$ et sur l'effort de commande $\lambda(j)$.

b. Trajectoire de référence

Un des grands avantages des commandes prédictives est que, si l'on connaît l'évolution future de la trajectoire de référence, le système peut commencer à répondre avant que le changement ne soit détecté [MIG 04]

L'évolution future de la référence est bien connue dans beaucoup d'applications. Dans la plupart des méthodes utilisent une trajectoire de référence qui n'est pas nécessairement égale à la vraie référence. Par exemple, on peut approcher celle ci au moyen d'un système du premier ordre:

$$w(t+i) = \alpha w(t+i-1) + (1-\alpha)r(t+i) \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad (1.16)$$

Où α est un paramètre contenu entre 0 et 1 qui constitue une valeur réglable qui influencera la réponse dynamique du système.

$$= R(k)^{-1}[f(k-1) + \varphi(k)y(k)] \quad (2.16)$$

$$= R(k)^{-1}[R(k-1)\hat{\theta}(k-1) + \varphi(k)y(k)] \quad (2.17)$$

$$= R(k)^{-1} \left[[R(k) - \varphi(k)\varphi(k)^T]\hat{\theta}(k-1) + \varphi(k)y(k) \right] \quad (2.18)$$

$$= R(k)^{-1} \left[[R(k) - \varphi(k)\varphi(k)^T]\hat{\theta}(k-1) + \varphi(k)y(k) \right] \quad (2.19)$$

$$= \hat{\theta}(k-1) + R(k)^{-1}\varphi(k)[y(k) - \varphi(k)^T\hat{\theta}(k-1)] \quad (2.20)$$

On peut donc calculer $\hat{\theta}(k)$ de façon récursive sans aucune approximation

Pour éviter d'inverser $R(k)$ à chaque pas, il est pratique d'introduire :

$$P(k) = R(k)^{-1} \quad (2.21)$$

et d'appliquer le lemme d'inversion :

$$[A + BCD]^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B[DA^{-1}B + C^{-1}]^{-1}DA^{-1} \quad (2.22)$$

En posant $A = R(k-1)$, $B = D^T = \varphi(k)$ et $C = 1$, on obtient la mise à jour suivante :

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (2.23)$$

$$P(k) = P(k-1) - K(k)\varphi^T(k)P(k-1) \quad (2.24)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (2.25)$$

Où $K(k)$ est le vecteur de gain et $P(k)$ est la matrice de covariance.

L'algorithme ci-dessus ne garantit une estimation non biaisée que si la séquence $e(k)$ est un bruit blanc.

2.5.3.4 Méthode des moindres carrés récursifs avec facteur d'oubli

L'équation (2.24) montre que la séquence $P(k)$ est décroissante et par conséquent il en est de même de la séquence $K(k)$, ce qui entraîne une diminution du gain d'adaptation.

3.2.2.3 Modèle du processus

Le modèle de base de la méthode GPC à partir duquel sera dérivée l'expression de la loi de commande est le modèle CARIMA, défini par l'équation (3.9), ce modèle a été utilisé par Clarke en 1985 pour le développement des stratégies du contrôle prédictif à un pas en avant. L'utilisation de ce modèle (avec l'introduction d'un intégrateur dans le système de contrôle) permet d'avoir deux avantages essentiels :

- L'amélioration de la qualité d'identification des paramètres de modèle de processus à contrôler.
- L'effet d'éliminer l'influence des oscillations (offset libre) de perturbation non désirées. [BEN 09]

La commande GPC utilise la notion de prédicteur optimal qui a pour objectif d'anticiper le comportement du processus sur j -pas dans le futur sur un horizon fini [BOU 11].

3.2.2.4 Développement du prédicteur

Pour la simplicité au cours de développement $C(q^{-1})$ est choisie comme étant égale à 1, le modèle du procédé devient [CAM 03] :

$$\Delta A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\Delta u(t-1) + \xi(t) \quad (3.29)$$

Le calcul du prédicteur $\hat{y}(t+j)$, la prédiction à l'instant t de la valeur de y à j pas d'échantillonnage en avance, nécessite la résolution de l'équation de Diophantine [MSA 93]

Considérons l'équation de Diophantine suivant :

$$1 = E^j(q^{-1})\Delta A(q^{-1}) + q^{-j}F^j(q^{-1}) \quad (3.30)$$

Avec

$$E^j(q^{-1}) = 1 + e_1 q^{-1} + \dots + e_{j-1} q^{-(j-1)} \quad (3.31)$$

$$F^j(q^{-1}) = f_0^j + f_1^j q^{-1} + \dots + f_{na}^j q^{-na} \quad (3.32)$$

$E^j(q^{-1})$ est un polynôme d'ordre $(j-1)$

$F^j(q^{-1})$ est un polynôme d'ordre na

$$\Delta U_t = (G^T \bar{R} G + \bar{Q})^{-1} G^T \bar{R} (Y_r - Y_0) \quad (4.58)$$

laquelle peut être analysée en 4 parties du point de vue mise en œuvre, soient :

- Le calcul de Y_0 , i.e la réponse autonome de la sortie du modèle du procédé $y(t + j)$, $j = 1$ à N_p , en prenant comme conditions initiales, l'état du procédé au temps t ;
- La trajectoire de référence Y_r qui peut être connue à l'avance ou bien construire à partir d'un modèle de référence simple (i.e découplé au premier ordre) ;
- Le calcul des coefficients de la matrice G , qui sont en fait les N_p premiers éléments du quotient $[\Delta A(q^{-1})]^{-1} B(q^{-1})$, i.e la réponse à l'échelon du modèle du procédé ;
- L'obtention de ΔU_t comme solution du système d'équations $(G^T \bar{R} G + \bar{Q}) \Delta U_t = G^T \bar{R} (Y_r - Y_0)$. Pour ce faire, une grande variété de méthodes existe.

Pour le calcul de Y_0 , nous proposons deux méthodes : la première est une généralisation au cas multivariable de la méthode proposée par Clarke et al dans le cas monvariable. Elle est basée sur le calcul récurrent de l'équation de Diophantine associé au prédicteur à j pas à l'avance de la sortie du modèle du procédé. Le but est de calculer les coefficients du prédicteur à $j + 1$ pas à partir de ceux de celui à j pas. Ceci nous évite de résoudre directement une équation de Diophantine pour chaque prédicteur. La deuxième méthode repose sur la propriété de concaténation du prédicteur optimal [GOO 84]. C'est cette dernière qui est retenue pour la mise en œuvre de l'algorithme, puisque elle demande moins de calculs. Alors le prédicteur optimal à j pas à l'avance peut être obtenu à partir de celui à un pas à l'avance, soit :

$$y_0(t + j) = q(I - \Delta A)y_0(t + j - 1) + B\Delta u(t + j - 1) \quad (4.61)$$

Avec

$$y_0(t + j) = y(t + j) \text{ pour } i \leq 0 \quad (4.62)$$

$$\Delta u(t + i) \text{ pour } i \geq 0 \quad (4.63)$$

4.3 Synthèse des lois de commandes adaptatives

Nous faisons l'extension de l'algorithme de moindres carrés récurrents, décrit notamment dans le chapitre 2, soit

Le tracé d'un canal ou d'une conduite en charge suit les lignes de niveau avec une pente compensant les pertes de charges ; il évite les discontinuités et changements brusques de direction. Les revêtements doivent être lisses pour diminuer les pertes de charge. La section de l'ouvrage peut être trapézoïdale ou rectangulaire. Elle doit conduire à des vitesses maximales de l'ordre de 1 m/s si les revêtements sont peu lisses, à 3 m/s pour le béton lissé.

5.2.7.3 Bassin de mise en charge

Un ouvrage d'amenée se termine par une chambre de mise en charge, d'où part la conduite forcée. Ses dimensions permettent des variations rapides de débit appelé par les machines, sans dénoyer la conduite forcée, une entrée d'air en conduite pouvant être catastrophique. Des grilles fines sont nécessaires à l'entrée des conduites. Un déversoir est prévu pour éviter les débordements en cas de fermeture rapide du débit ; le déversement sera évacué dans un canal, ou conduit d'évacuation.

Une cheminée d'équilibre s'avère souvent nécessaire sur les conduits en charge pour amortir les surpressions des coups de bélier en cas de fermeture rapide du débit, et éviter les dépressions en cas d'augmentation rapide de débit appelé. Elle permet des variations rapides de charge. Le calcul d'une cheminée d'équilibre doit être confié à des spécialistes.

5.2.7.4 Conduite forcée

La conduite forcée est la canalisation qui relie le bassin de mise en charge à la turbine. Elle est dimensionnée pour tenir la surpression et la dépression d'un coup de bélier sur une fermeture rapide de la turbine. Les valeurs extrêmes de ces pressions sont limitées par la cheminée d'équilibre et une ventouse placée en tête de conduite.

Elle peut être réalisée en acier, béton armé, plastique, fonte, selon les valeurs des charges. Les traitements de surfaces intérieures doivent être particulièrement lisses afin de diminuer les pertes de charge, et les revêtements extérieurs doivent résister à la corrosion. Ce sont les pertes de charge qui conditionnent le diamètre de conduite. On recherchera un optimum économique entre pertes capitalisées et surcoût d'augmentation de diamètre, en pratique la vitesse d'eau est de 3 à 7 m/s.

Les pertes de charges sont deux types :

- Pertes locales ou singulières : liées aux singularités géométriques des aménagements, telles que : entrées, sorties, grilles, rétrécissement, élargissements. Elles sont données

$$\text{par : } H_{ls} = \frac{KV^2}{2g}$$

$$U(t) = \bar{U}(t) + u(t) \quad (6.37)$$

Celles-ci perturbent également le vecteur d'état, qui devient :

$$X(t) = \bar{X}(t) + x(t) \quad (6.38)$$

ce qui donne comme équation d'état :

$$\dot{X}(t) = \dot{\bar{X}}(t) + \dot{x}(t) \quad (6.39)$$

ou encore

$$\dot{X} = f(X(t), U(t)) = f(\bar{X}(t) + x(t), \bar{U}(t) + u(t)) \quad (6.40)$$

et pour les sorties :

$$Y(t) = \bar{Y}(t) + y(t) \quad (6.41)$$

$$Y(t) = g(X(t), U(t)) = g(\bar{X}(t) + x(t), \bar{U}(t) + u(t)) \quad (6.42)$$

En développant selon Taylor au premier ordre f et g , il vient pour les équations d'état et de sortie la forme matricielle suivante :

$$\dot{X}(t) = \dot{\bar{X}}(t) + \dot{x}(t) \approx f(\bar{X}(t), \bar{U}(t)) + F_X x(t) + F_U u(t) \quad (6.43)$$

$$Y(t) = \bar{Y}(t) + y(t) \approx g(\bar{X}, \bar{U}) + G_X x(t) + G_U u(t) \quad (6.44)$$

Alors le modèle linéarisé prend la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F_X x(t) + F_U u(t) \\ y(t) = G_X x(t) + G_U u(t) \end{cases} \quad (6.45)$$

- [LAL 05] **Laleye, MM. A. et Sanou, C. O. (2005)**, “Modélisation et régulation d’une turbine à vapeur dans une centrale thermique,” Université Cheikh Anta Diop, Ecole Supérieure Polytechnique.
- [LAN 02] **Landau, I. D. (2002)** “Commande des systèmes : conception, identification et mise en œuvre,” Ed. Hermes Science, Paris.
- [LAN 86] **Landau I. D. et Dugard L., (1986)**, “Commande adaptative - Aspects pratiques et théoriques,” Masson, Paris.
- [LAN 96] **Landau, I. D. et Dugard, L. (1996)**, “Commande adaptative aspects pratiques et théoriques,” Editions Masson, Parie.
- [LAN 97] **Landau, I. D., Lozano, R., et M’Saad, M. (1997)**, “Adaptive Control,” Communications and Control Engineering Series, Springer.
- [LAO 11] **Laouini, I. (2011)**, “La gestion des centrales hydroélectriques en série par balancement des réservoirs,” Université de Montréal, Ecole Polytechnique de Montréal.
- [LAS 04] **Lasse, L. (2004)**, “Analysis of torque and speed ripple producing no idealities of frequency converters in electric drives,” University of Technology, Lappeenranta.
- [LJU 87] **Ljung, L. (1987)**, “System Identification,” Theory for the User. Prentice-Hall, London.
- [MAA] **Maaziz, M. (2000)**, “Commande prédictive de systèmes non linéaires: Application à la commande de machines asynchrones,” Ecole Supérieure d’électricité, France.
- [MAL 06] **Malala, A. N. (2006)**, “Automatisation d’une microcentrale hydroélectrique,” Université d’Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique.

1.3.4.3 Aperçu historique sur la commande prédictive

Dans cette partie, est présenté un bref historique de l'évolution de la commande prédictive [FIL 12]. Cette dernière a connu, au cours de ces dernières décennies un essor grandissant auprès des industriels [MAR 10]. On peut citer les travaux de Richalet et al. [RIC 76] [RIC 78] où est formulé le problème de la commande heuristique prédictive basée sur le modèle MPHC (Model Predictive Heuristic Control), qui fût connu, plus tard, sous le nom de commande algorithmique MAC (Model Algorithmic Control) [BEN 09]. Cette approche est basée sur un modèle à réponse impulsionnelle pour le système, linéaire en entrée, dans le but de prédire l'effet sur la sortie des commandes futures [GIN 03] :

$$y(t + j/t) = \sum_{i=0}^{n_H} h_i u(t + j - i - 1/t) \quad (1.7) \quad (1.17)$$

Où $y(t + j/t)$ est la prédiction de la sortie à l'instant $t + j$ étant donnée sa connaissance à l'instant t , $u(t + j - i - 1/t)$ est l'entrée à $t + j - i - 1$ et h_i sont les valeurs de la sortie à chaque période d'échantillonnage quand on met à l'entrée un signal impulsionnel d'amplitude égal à 1 [MIG 04].

L'équation (1.11) est utilisée pour générer les valeurs prédites de la sortie sur un horizon de prédiction N_p . Ce modèle est couplé à la synthèse d'une trajectoire de référence [SAW 92], définie comme une trajectoire de premier ordre à partir d'une valeur de la sortie à l'instant présent jusqu'à la consigne désirée [SAW 92] [MAR 10].

$$y^*(t + i) = (1 - \alpha^i)w + \alpha^i y(t) \quad i = 1, \dots, N_p, \text{ et } 0 \leq \alpha < 1 \quad (1.18)$$

A l'origine, cette méthode ne prenait pas en compte un modèle de perturbation. Par conséquent, ni la rejection de perturbation, ni l'annulation des erreurs statiques n'étaient garanties.

Ensuite, Les ingénieurs de Shell, Cutler et Ramaker [CUT 80], ont développé ce qui sera connu, plus tard, comme Matricielle Dynamique DMC (Dynamic Matrix Control). L'élaboration de la loi de commande à partir d'un problème de moindres carrés nécessite un modèle à réponse indicielle pour le système, soit

$$y(t + j/t) = \sum_{i=0}^{n_s} s_i \Delta u(t + j - i - 1/t) \quad (1.19)$$

Cependant, si l'on désire identifier des paramètres variables, il est nécessaire que la capacité d'adaptation de l'algorithme soit préservée au cours du temps. C'est pour cette raison qu'a été introduite la notion de facteur d'oubli [SAW 92].

On cherche alors à calculer les paramètres qui minimisent un critère pondéré par la puissance d'un coefficient λ , soit :

$$\hat{\theta}(k) = \arg \min \sum_{t=n}^k \lambda^{k-1} [y(t) - \varphi(t)^T \theta]^2 \quad (2.26)$$

Ainsi les résidus les plus anciens ont moins d'importance et on peut faire les mêmes démonstrations que précédemment (cf. 2.5.3.3).

Choix du facteur d'oubli

Si les paramètres de système ne varient pas dans le temps, alors on peut choisir $\lambda(k) = 1$ et retomber, par la suite, sur les formules des moindres carrés récurrents. Dans le cas contraire, on choisira $\lambda(k) < 1$ (typiquement entre 0.98 et 0.995). La valeur choisie dépend de la dynamique d'évolution des paramètres du système.

2.5.3.5 Aspects pratiques de l'identification

Certains problèmes apparaissant au niveau de la mise en œuvre d'un estimateur ne sont pas théoriquement pris en compte. Il devient alors nécessaire d'agir sur l'estimateur en aval et en amont de la procédure d'estimation proprement dite. La vue d'ensemble de la procédure globale d'estimation (**Fig. 2.3**) présente :

- Le traitement des données en amont (filtrage et normalisation) ;
- L'estimateur ;
- La procédure de tests en aval, qui a pour but essentiel d'assurer l'admissibilité du modèle

a. Filtrage des signaux d'entrée sortie

Le modèle du procédé (2.2) comprend un terme représentant les perturbations agissant sur la sortie. Pour le développement théorique de l'estimateur, nous avons supposé que ces perturbations avaient des propriétés simples et générales, mais en pratique on rencontre plusieurs types de perturbations, à savoir :

On multipliant l'équation (3.29) par le terme $E^j(q^{-1})q^j$ on obtient :

$$\Delta A(q^{-1})E^j(q^{-1})y(t+j) = E^j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + E^j(q^{-1})\xi(t+j) \quad (3.33)$$

En utilisant l'identité de Diophantine (3.30) on obtient :

$$(1 - q^{-j}F^j(q^{-1}))y(t+j) = E^j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + E^j(q^{-1})\xi(t+j) \quad (3.34)$$

On obtient l'équation de sortie $y(t+1)$:

$$y(t+j) = E^j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + F^j(q^{-1})y(t) + E^j(q^{-1})\xi(t+j) \quad (3.35)$$

Dans cette dernière équation, toutes les références à des valeurs de la perturbation pour des instants d'échantillonnage passés et présents ont été supprimées.

Il ne subsiste plus que la combinaison linéaire $E^j(q^{-1})\xi(t+j)$ de valeurs futures de la perturbation ou du bruit. Or ces valeurs sont par définition indépendantes de signaux mesurables à l'instant t . Il est donc clair que la prédiction optimale à l'instant t de $y(t+j)$, notée $\hat{y}(t+j)$, obtenue au sens du minimum de la variance de l'erreur et grâce à des grandeurs dont la valeur est connue à l'instant t , est donnée par [SED 08]:

$$\hat{y}(t+j/t) = E^j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + F^j(q^{-1})y(t) \quad (3.36)$$

On pose

$$f^j(t+j) = F^j(q^{-1})y(t) \quad (3.37)$$

$$G^j(q^{-1}) = E^j(q^{-1})B(q^{-1}) \quad (3.38)$$

$G^j(q^{-1})$ est définie par $G^j(q^{-1}) = g_0^j + g_1^j q^{-1} + \dots + g_{j-1}^j q^{-(j-1)}$

Donc la prédiction à long horizon se fait par le calcul récursif du polynôme $G^j(q^{-1})$ et de la fonction $f^j(t+j)$.

Pour calculer $G^j(q^{-1}) = E^j(q^{-1})B(q^{-1})$ et $f^j(t+j) = F^j(q^{-1})y(t)$ on procède de la récursivité de l'équation de Diophantienne utilisée précédemment.

4.4 Résultats de simulations

Pour illustrer ses performances, les lois de commande présentées dans ce chapitre sont appliquées ici sur un exemple académique d'un système multivariable. Dans ce but, le modèle de la colonne à distiller à temps discret, tiré de la littérature, est considéré. Ce modèle est stable, à non minimum de phase, est très couplé et il n'est pas découplable avec stabilité par retour d'état statique. Il a été considéré comme un système à deux entrées et deux sorties, qui sont :

Entrée n°1 : puissance de chauffe ;

Entrée n°2 : taux de reflux interne ;

Sortie n°1 : concentration du produit en tête ;

Sortie n°2 : débit du produit en tête ;

Le modèle de la colonne à distiller a été identifié pour une période d'échantillonnage de 10 s. Il s'écrit :

$$y(t) = \sum_{i=1}^3 (A_i y(t-i) + B_i u(t-i)) \quad (4.64)$$

Avec

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1.0908 & -0.1882 \\ -0.1549 & -1.1585 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 0.2504 & 0.2898 \\ 0.2119 & 0.1661 \end{bmatrix}; A_3 = \begin{bmatrix} -0.0052 & -0.0705 \\ -0.0621 & 0.1356 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.0119 & -0.0061 \\ -0.0007 & -0.0369 \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} -0.0521 & 0.0325 \\ 0.0625 & -0.1091 \end{bmatrix}; B_3 = \begin{bmatrix} -0.0358 & 0.1018 \\ 0.2451 & 0.0517 \end{bmatrix}$$

4.4.1 Résultats de simulations de la commande LQG multivariable à paramètres fixes, avec et sans perturbations

Les résultats de simulation sont obtenus avec les paramètres de réglage suivants : $\Lambda = 0.5 I_{2 \times 2}$; $Q = I_{2 \times 2}$;

K : Coefficient de pertes de charge, sans unité, dépendant du type de singularité et de sa géométrie.

V : Vitesse de l'écoulement, à l'amont de singularité

g : Grandeur de pesanteur

- Pertes réparties ou linéaires : qui se calculent de la formule : $H_{lf} = \frac{V^2 L}{K^2 R_h^{4/3}}$

L : Longueur de la conduite considérée

K : Coefficient de rugosité, dépend du type du matériau et de l'état de la surface de contact entre l'eau et la paroi

R_h : Rayon hydraulique de la section, est défini comme le rapport entre la surface mouillée S et le périmètre mouillé P .

5.2.7.5 Grille-degrilleur-dessableur

Il convient de protéger la turbine contre les corps charriés par la rivière, par une grille qu'il y a lieu de nettoyer manuellement ou par un degrilleur de conception simple. Un dessableur permet aux particules fines de se déposer avant l'entrée dans l'installation [MAL 06].

5.2.7.6 Vannes

Il est nécessaire de déposer des vannes adaptées à différentes utilisations :

- protection contre les crues
- isolation du canal
- isolation de la turbine ([MAL 06])

5.2.7.7 Turbine

a. Principe de fonctionnement

Une turbine hydraulique est une machine tournante entraînée par une veine d'eau mise sous pression par une conduite forcée.

La turbine est l'organe qui transforme l'énergie potentielle et cinétique de l'eau en énergie mécanique. La roue en est la partie mobile entraînant l'arbre de rotation qui transmettra l'énergie mécanique au générateur.

La puissance hydraulique fournie à la turbine par l'eau qui alimente est donnée par la formule suivante :

Avec

$$F_X = \left. \frac{\partial f}{\partial X^T} \right|_{\bar{X}, \bar{U}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \end{bmatrix}_{\bar{X}, \bar{U}} ; F_U = \left. \frac{\partial f}{\partial U^T} \right|_{\bar{X}, \bar{U}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial U_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial U_m} \end{bmatrix}_{\bar{X}, \bar{U}}$$

$$G_X = \left. \frac{\partial g}{\partial X^T} \right|_{\bar{X}, \bar{U}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial X_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial X_n} \end{bmatrix}_{\bar{X}, \bar{U}} ; G_U = \left. \frac{\partial g}{\partial U^T} \right|_{\bar{X}, \bar{U}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial U_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial U_m} \end{bmatrix}_{\bar{X}, \bar{U}}$$

où F_X, F_U, G_X et G_U sont les matrices jacobiennes des dérivées partielles de f et g , respectivement par rapport à X et U , évaluées au point $(\bar{X}, \bar{U})$

Le modèle linéaire représentant état du groupe turbine-alternateur est de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (6.46)$$

Avec,

$$A = F_X ; \quad B = F_U ; \quad C = G_X ; \quad D = G_U$$

Tout calcul fait, alors les matrices A, B, C et D sont données par :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_8 & \frac{-D\omega_0}{2H} & K_9 & 0 & 0 & \frac{\omega_0}{2H} \\ K_{10} & 0 & K_3 & \frac{\omega_0 r_{fd}}{x_{ad}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau_b} & \frac{-1}{\tau_b} \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau_e} & 0 \\ 0 & \frac{K_g}{\tau_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & K_{12} & 0 & 0 & 0 \\ K_{13} & 0 & K_{14} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Où

$x = [\delta \quad \dot{\delta} \quad E'_q \quad E_{fd} \quad P_w \quad P_m]^T$ est le vecteur des variables d'état

- [MAR 10]** **Marcelin, D. M. (2010)**, “Commande prédictive généralisée non linéaire à temps continu des systèmes complexes,” Université de Rouen.
- [MEA 93]** **Meadows, E. S. et Rawlings, J. B. (1993)**, “Receding horizon control with an infinite horizon,” In Proceeding American Control Conferences, San Francisco, pp. 2926-2930.
- [MEZ 09]** **Meziane S. (2009)**, “Commande adaptative et prédictive d’une machine asynchrone,” Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de l’ingénieur.
- [MEZ 09]** **Meziane S. (2009)**, “Commande adaptative et prédictive d’une machine asynchrone,” Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de l’ingénieur.
- [MIG 04]** **Migliore, E. G. (2004)**, “Commande Prédictive à base de programmation semi définie,” Laboratoire d’Analyse et d’Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS, à Toulouse, au sein du groupe : Méthodes et Algorithmes en Commande (MAC).
- [MIG04]** **Migliore, E. G. (2004)**, “Commande Prédictive à Base de Programmation Semi Définie,” Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [MON 11]** **Monje, B. C., Ramírez, R. E. & Roig, C. S. (2011)**, “Le secteur des énergies renouvelables au Maroc,”. Etude.
- [MSA 93]** **M’Saad, M., Hammad, S. et Dugard, L. (1993)**, “A suitable generalized predictive adaptive controller-case study: control of flexible arm,” Automatica, Vol. 29, No. 3, pp. 589-608.
- [MSA 94a]** **M’Saad, M. et Hejda, I. (1994)**, “On adaptive control of flexible transmission system,” Control Engineering Practice, Vol. 2, No. 4, pp. 629-639.

$y(t + j/t)$ est la prédiction de la sortie à $t+j$ étant donnée sa connaissance à t , les s_i sont les paramètres obtenus à la sortie du système lorsqu'on applique un échelon $\Delta u(t) = u(t) - u(t - 1)$ à l'entrée

Avec

$\Delta = 1 - q^{-1}$ est un opérateur différentiateur.

L'objectif de la commande DMC est d'amener la sortie le plus proche possible de la consigne, au sens des moindres carrés, avec un terme de pénalité sur les variables de commande. Cela permet d'avoir de faibles signaux de commande et une réponse moins agressive sur la sortie [MAR 10]. Cette commande introduit la notion d'horizon de commande N_u , avec $N_u \leq N_p$. Le critère de commande est alors :

$$J = E\{[y^*(t + j) - y(t + j)]^2 + \lambda[\Delta u(t + j - 1)]^2 / t\} \quad (1.20)$$

avec comme contrainte $\Delta u(t + i) = 0 \quad \forall i \geq N_u + 1$

Cependant, bien que cette première génération de commande prédictive soit attrayante, elle présente les limitations suivantes :

- Elle repose sur un modèle de type boîte noire et ne tient pas compte des contraintes lors de l'élaboration de la commande [FIL 12];
- Elle ne permet pas de stabiliser des procédés instables en boucle ouverte ou à non minimum de phase.

C'est pourquoi les études qui ont suivi se sont orientées vers l'utilisation de modèles formulés à partir d'une représentation entrée-sortie du système (fonction transfert) [SAW 92], la plupart du temps, discrète. En général ces modèles s'écrivent

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t - 1) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}\xi(t) \quad (1.21)$$

De Keyser et Van Cauwenberghe [KEY 79] ont développé la commande auto-adaptative prédictive étendue EPSAC (Extended Prediction Self Adaptive Control), qui permet d'appliquer les notions du prédictif sur des modèles sous forme de représentation entrée-sortie. Cette méthode propose un signal de commande constant pour tout l'horizon de prédiction, et qui est appliqué dès le début du calcul de la commande qui optimise le critère de coût choisi [BEN 09].

- les perturbations inhérentes au système de contrôle, telles que les bruits de mesure dus aux capteurs,
- les perturbations engendrées par le type de contrôle, telles que les dynamiques négligées lors du choix de la structure du modèle, ou le repliement dû à l'échantillonnage.

Ces perturbations peuvent engendrer des variations brusques et importantes des paramètres, mettant ainsi en cause l'admissibilité du modèle. Si une information sur la nature de ces perturbations est disponible, elle doit être incorporée dans la structure du modèle sinon, un filtrage des signaux d'entrée sortie devient nécessaire.

Nous avons considéré, lors de la synthèse des lois de commande, que le modèle des perturbations était supposé connu. Il sera donc incorporé dans le modèle d'identification avec un filtrage adéquat. Finalement, les signaux seront filtrés par

$$H(q^{-1}) = \frac{\Delta G(q^{-1})}{F(q^{-1})} \quad (2.27)$$

où $G(q^{-1})$ et $F(q^{-1})$ sont des polynômes asymptotiquement stables, choisis tel que $\frac{G(q^{-1})}{F(q^{-1})}$ soit un filtre passe bas

b. Normalisation des signaux d'entrée-sortie

L'opération de la normalisation consiste à diviser le vecteur d'observation et la mesure à l'instant t par la racine carrée de

$$\eta(k) = \max(\varphi(k)^T \varphi(k), \eta_0) \quad (2.28)$$

$\eta_0 > 0$ fixe une norme minimale.

La norme peut être filtrée par un premier ordre dont la bande passante contient les modes dominants du procédé et écarte les dynamiques négligées. Dans ce cas, l'expression de $\eta(k)$ devient :

$$\eta(k) = \mu \eta(k-1) + (1-\mu) \max(\varphi(k)^T \varphi(k), \eta_0) \quad (2.29)$$

où $0 < \mu \leq 1$ définit la bande passante du filtre de normalisation.

3.2.2.5 Récurrence de l'équation de Diophantine

On peut calculer $E^{j+1}(q^{-1})$ et $F^{j+1}(q^{-1})$ à partir de $E^j(q^{-1})$ et $F^j(q^{-1})$ et ainsi de suite.

$$1 = E^{j+1}(q^{-1})\Delta A(q^{-1}) + q^{-j-1}F^{j+1}(q^{-1}) \quad (3.39)$$

En faisant retrancher (3.30) de (3.39) on obtient:

$$(E^{j+1}(q^{-1}) - E^j(q^{-1}))\Delta A(q^{-1}) + q^{-j}(q^{-1}F^{j+1}(q^{-1}) - F^j(q^{-1})) = 0 \quad (3.40)$$

Etant donné que les polynômes $A(q^{-1})$ et q^{-1} sont premier entre eux, il est permis d'écrire

$$E^{j+1}(q^{-1}) - E^j(q^{-1}) = r_j q^{-j} \quad (3.51)$$

En remplaçant dans l'expression (3.40) on obtient :

$$q^j(\Delta A(q^{-1})r_j + q^{-1}F^{j+1}(q^{-1}) - F^j(q^{-1})) = 0 \quad (3.52)$$

$$F^{j+1}(q^{-1}) = q(F^j(q^{-1}) - r_j \Delta A(q^{-1})) \quad (3.53)$$

On pose

$$\alpha(q^{-1}) = \Delta A(q^{-1}) = \alpha_0 + \alpha_1 q^{-1} + \alpha_2 q^{-2} + \dots + \alpha_{na+1} q^{-(na+1)} \quad (3.54)$$

Avec

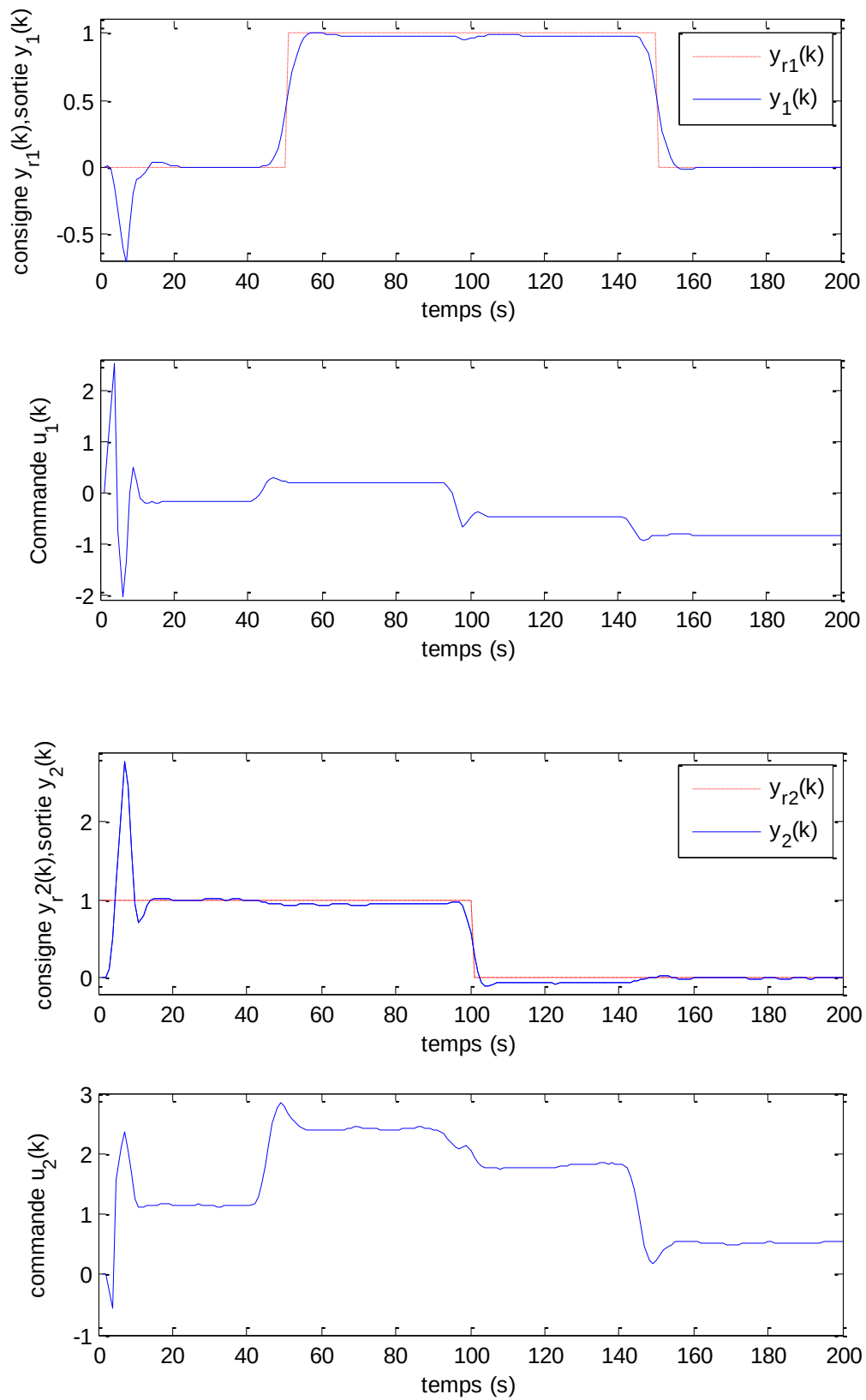
$$\alpha_0 = 1 \quad (3.55)$$

$$\alpha_i = a_i - a_{i-1} \quad i = 0, 1, \dots, na \quad (3.56)$$

$$\alpha_{na+1} = -a_{na} \quad (3.57)$$

Après identification dans (3.53), on obtient les relations récurrentes suivantes :

$$r_j q^{-1} = f_0^j \quad (3.58)$$

**Fig.4.2** : Performances en poursuite du LQG

$$P_{hyd} = \rho Q g h \quad (5.1)$$

h : Hauteur nette à l'entrée de la turbine.

Q : Débit de l'eau

ρ : Masse volumique de l'eau

g : Grandeur de pesanteur

L'eau sous pression qui entre dans la turbine exerce une force hydrodynamique sur les pales ou augets de la roue. Cette force crée un couple C qui met la roue en rotation.

La turbine produit alors une puissance mécanique donnée par :

$$P_{mec} = C . w \quad (5.2)$$

w : La vitesse de rotation

b. Types de turbines

Le choix du type des turbines dépend de ces deux variables : la hauteur nette h et le débit Q .

Les turbiniers proposent des abaques pour le choix de leur fabrication (figure ci dessous)

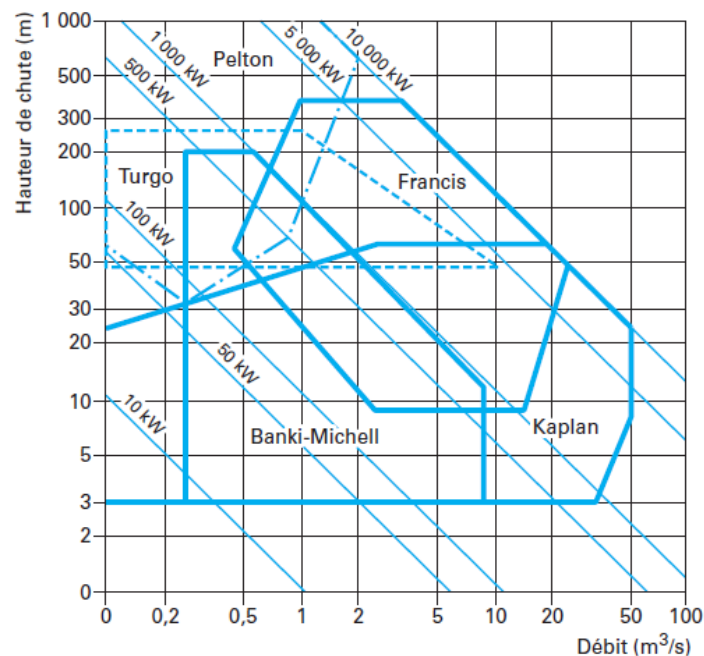


Fig. 5.3 : Choix des turbines selon hauteur de chute (m) et débit m^3/s

On classe les turbines en deux grandes familles :

$u = [U_e \quad U_g]^T$ est le vecteur des paramètres d'entrée

$y = [P_t \quad V_t]^T$ est le vecteur des paramètres de sorties

$P_t = K_{11}x_1 + K_{12}x_3$ est la puissance de sortie

$V_t = K_{13}x_1 + K_{14}x_3$ est la tension terminale

Les expressions des paramètres K_i ($i=1,14$) sont :

$$K_1 = \frac{V_s x_{ds}}{(x'_{ds})^2}; K_2 = -\frac{(x_d - x_q)V_s^2}{(x'_{ds})^2}; K_3 = -\frac{x_{ds}}{x'_{ds}T'_{do}}; K_4 = -\frac{(x_d - x_q)V_s}{x'_{ds}T'_{do}}; K_5 = \frac{x_q V_s}{x_{ds}}; K_6 = \frac{x_t + x_l}{x'_{ds}};$$

$$K_7 = \frac{x'_d V_s}{x_{ds}}; K_8 = -K_1 x_{30} \cos(x_{10}) - K_2 \cos(2x_{10}); K_9 = -K_1 \sin(x_{10}); K_{10} = -K_4 \sin(x_{10})$$

$$K_{11} = -K_1 x_{30} \cos(x_{10}) + K_2 \cos(2x_{10}); K_{12} = K_1 \sin(x_{10});$$

$$K_{13} = ((K_5 - K_7^2) \sin(x_{10}) \cos(x_{10}) - K_6 K_7 x_{30} \sin(x_{10})) ((K_5 \sin(x_{10}))^2 + (K_6 x_{30} + K_7 \cos(x_{10}))^2)^{-1/2};$$

$$K_{14} = 2K_6 (K_6 x_{30} + K_7 \cos(x_{10})) ((K_5 \sin(x_{10}))^2 + (K_6 x_{30} + K_7 \cos(x_{10}))^2)^{-1/2}$$

Pour obtenir la dynamique appropriée pour le présent travail, le modèle de représentation d'état obtenu doit être transformé sous forme d'une fonction de transfert matricielle. Pour ce faire, effectuant la transformée de Laplace de l'équation d'état, soit :

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \rightarrow (sI - A)X(s) = BU(s) \quad (6.48)$$

qui, combinée avec l'équation de sortie : $Y(s) = CX(s) + DU(s)$ donne

$$Y(s) = C(sI - A)^{-1}BU(s) + DU(s) \quad (6.49)$$

Finalement la fonction du transfert du système en temps continu s'écrit :

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (6.50)$$

- [MSA 94b]** M'Saad, M. et Hejda, I. (1994), "Partial state reference model (adaptive) control of a benchmark example," Automatica, Vol.30, pp. 605-614.
- [MSA 96]** M'Saad, M. et Chebassier, J. (1996), "Commande adaptative des systèmes," École nationale supérieure d'ingénieurs de Caen.
- [NAJ 82]** Najim, K., Najim, M. et Youlal, H. (1982), "Self tuning control of an industrial phosphate dry process," Optimal Control Applications and Methods Vol. 3, pp. 435-442.
- [NAR 78]** Narendra, K. S. et Valavani, L. S. (1978), "Stable Adaptive Controller Design-Direct Control," IEEE Transactions on Automatic Control, AC-23, pp. 570-583.
- [NAR 89]** Narendra, K. S. et Annaswamy, A. M. (1989), "Stable Adaptive Systems," Prentice- Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [NGU 89]** Nguyen, M. T. (1989), "Commande adaptative multivariable avec contraintes," Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [OLI 01]** Olivier P. (2001), "Etude et comparaison de différentes structures de commande multicontrôleurs application a un axe robotise," Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy, Université de Savoie).
- [OSB 61]** Osburn, P. V., Whitaker, H. P. et Kezer, A. (1961), "New developments in the design of adaptive control systems," Institute of Aeronautical Sciences, pp. 61-39.
- [PRE 03]** Preub, K., Lann, M. V., Cabassud, M. et Anne-Archard, G. (2003), "Implementation procedure of an advanced supervisory and control strategy in the pharmaceutical industry," Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 1449-1458.

Au début des années 80, une deuxième génération d'algorithmes de commande prédictive a été développée en introduisant la résolution d'un problème d'optimisation quadratique et en prenant en compte des contraintes sur les entrées et les sorties « Quadratic Dynamic Matrix Control » (QDMC) [CUT 80]. Ydstie [YDS 84] a développé une commande prédictive à horizon étendu « Extended Horizon Adaptive Control » (EHAC), permettant d'optimiser la sortie future vers celle de la consigne pour un horizon temporel plus grand que le retard présent dans le procédé [FIL 12].

La commande GPC proposée par Clarke et al. [CLA 87], est en ce moment, la méthode la plus populaire de la famille des commandes à horizon étendu et constitue de ce fait la base de ce travail de thèse. Elle sera étudiée en détail au chapitre III. Elle représente, en fait, une généralisation des algorithmes présentés ci-dessus [BEN 09].

La commande GPC est devenue l'un des algorithmes de commande prédictive les plus répandus. [GIN 03]. Elle a été très tôt implémentée, avec succès, dans de nombreuses applications industrielles [CLA 98], et a montré de bonnes performances et un certain degré de robustesse.

La commande GPC est une structure complète qui s'assure de fournir un système corrigé stable pour un jeu de paramètres élaboré. Cette méthodologie permet de résoudre des problèmes de processus à déphasage non minimal, système intrinsèquement instable ou possédant des pôles mal amortis, système avec temps morts variables ou inconnus et système d'ordre inconnu [CLA 87] [CAB 08].

L'idée de base de la commande GPC est de calculer une séquence de commandes futures de telle façon qu'une fonction de coût à plusieurs composantes soit minimale sur un certain horizon de prédiction. L'indice à optimiser est une fonction quadratique qui mesure la distance entre la sortie prédite du système et une séquence de référence, plus une fonction quadratique qui mesure l'effort de commande [GIN 03].

La philosophie de la commande GPC se base sur quatre grandes idées : création d'un effet anticipatif par exploitation de la trajectoire à suivre dans le futur, définition d'un modèle numérique de prédiction, minimisation d'un critère quadratique à horizon fini, principe de l'horizon fuyant [BOU 06].

On notera qu'on peut également définir la commande GPC comme étant une version simplifiée du correcteur LQG. Ils ont en commun la minimisation d'une fonction de coût dépendant de l'intégrale de l'erreur au carré et de l'énergie de commande. La différence réside dans le fait que, pour le GPC, cette fonction est faite sur un horizon fini fuyant, tandis

D'un point de vue théorique, la normalisation des signaux traités par l'estimateur a comme conséquence la bornétude des erreurs de modélisation, ce qui permet l'obtention de résultats de convergence et de stabilité,

Du point de vue pratique, la normalisation améliore le conditionnement numérique et réduit l'effet des perturbations.

La figure (2.3) montre l'environnement de l'estimateur de paramètres :

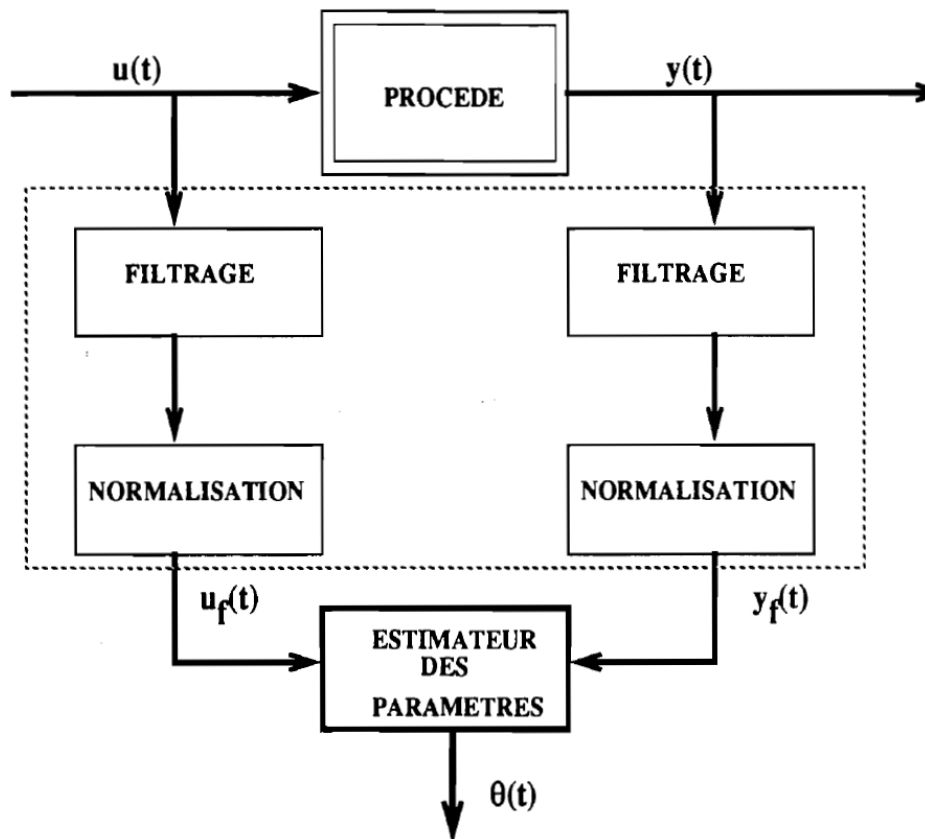


Fig. 2.3: Environnement de l'estimateur de paramètres

c. Zone morte

L'utilisation d'une zone morte revient à geler l'estimateur lorsque l'erreur de prédiction a priori ε est inférieure à un certain seuil ε_0 . Pratiquement parlant, l'importance d'une zone morte est évidente dans le cas où l'utilisateur connaît la variance σ de la perturbation (ou une borne supérieure de la variance). En effet, un choix tel que $\varepsilon_0 \geq 2\sigma$ permet d'éviter, en régime établi (régulation), d'exciter l'estimateur avec des signaux non significatifs de la dynamique du procédé.

$$f_i^{j+1} = f_{i+1}^j - \alpha_{i+1} r_j \quad i = 0, 1, \dots, na \quad (3.59)$$

$$f_{na}^{j+1} = -\alpha_{na+1} r_j \quad (3.60)$$

Ces relations déterminant le polynôme $F^{j+1}(q^{-1})$, nous retrouvons à partir de (3.51)

$$E^{j+1}(q^{-1}) = E^j(q^{-1}) + r_j q^{-j} \quad (3.61)$$

L'initialisation des itérations de calcul se fait en supposant pour $j = 1$, $e_1 = 1$

L'ensemble de prédictions pour pour $j = 1$ à N_p est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{y}(t+1/t) = G^1(q^{-1})\Delta u(t) + f(t+1) \\ \hat{y}(t+2/t) = G^2(q^{-1})\Delta u(t+1) + f(t+2) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+N_p/t) = G^{N_p}(q^{-1})\Delta u(t+N_p) + f(t+N_p) \end{array} \right. \quad (3.62)$$

Ce qui peut s'écrire sous une forme vectorielle comme :

$$Y = G\Delta U + F \quad (3.63)$$

Avec

$$Y = [\hat{y}(t+1/t) \ \hat{y}(t+2/t) \ \dots \ \hat{y}(t+N_p/t)]^T \quad (3.64)$$

$$\Delta U = [\Delta u(t) \ \Delta u(t+1) \ \dots \ \Delta u(t+N_p-1)]^T \quad (3.65)$$

$$F = [f(t+1) \ f(t+2) \ \dots \ f(t+N_p)]^T \quad (3.66)$$

La matrice G définie dans l'équation (3.63) serait une matrice triangulaire inférieure de dimension $N_p \times N_p$ tel que :

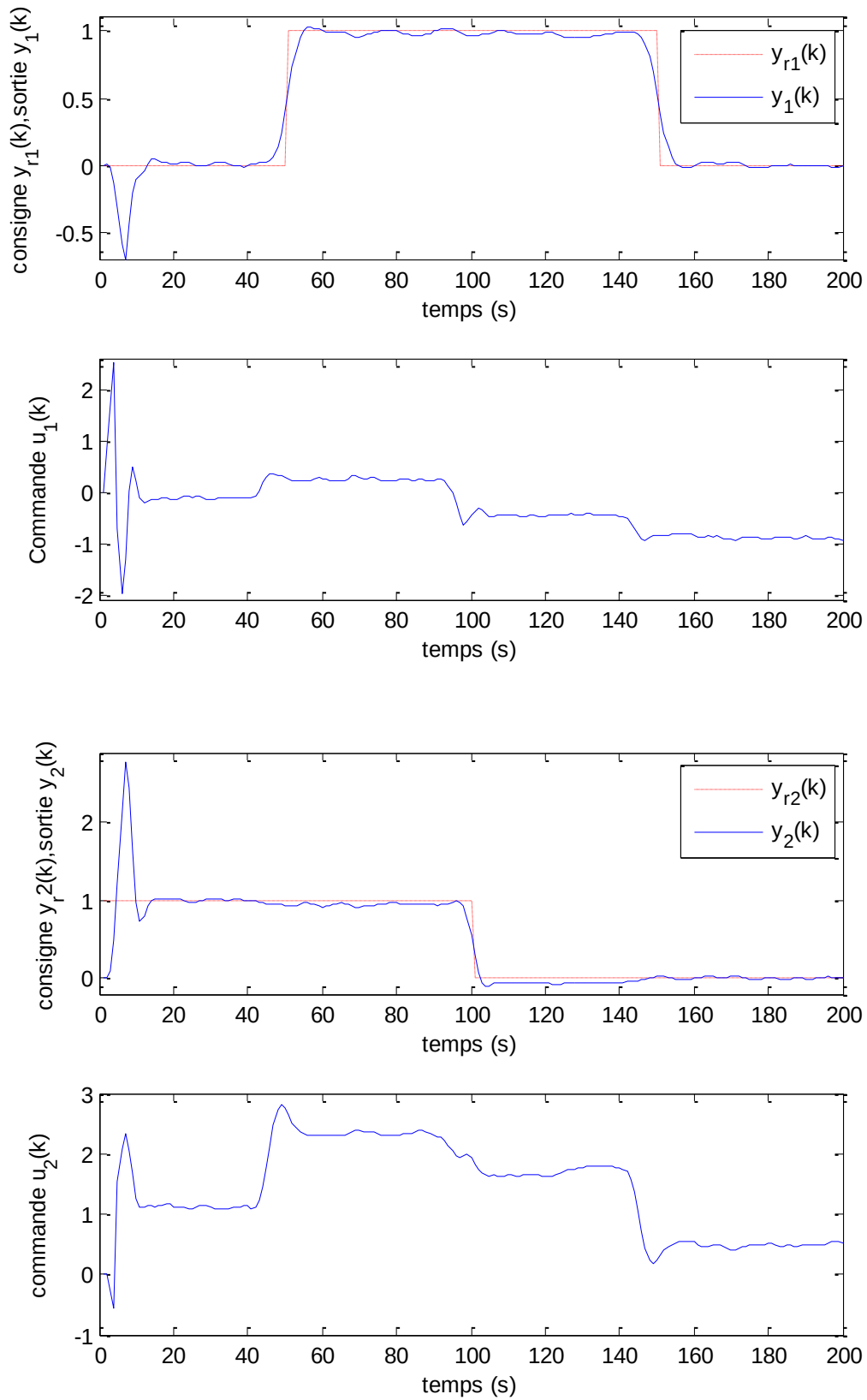


Fig.4.3 : Performance en rejet de perturbations du LQG

- les turbines à action
- les turbines à réaction

✓ Turbines à action

Un jet libre agit sur des augets ou des aubes profilées placées sur la périphérie d'une roue (action). Ce jet exerce une force sur l'auget en mouvement de rotation, qui est transformée en couple et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine. La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage est entièrement sous forme d'énergie cinétique. L'échange d'énergie entre l'eau et l'aubage a lieu à pression constante, généralement la pression atmosphérique. La roue de la turbine est dénoyée et tourne dans l'air [BRE 08]. Elle se compose uniquement d'un distributeur et d'une roue mobile

Les principaux types de turbines à action sont:

La turbine Pelton est la plus couramment utilisée pour des chutes de 30 m à 500 m, ou plus. Elle est équipée d'une roue à augets qui sont frappés par un ou plusieurs jets d'eau à grande vitesse.

Par déviation dans les augets, l'eau transmet sa force à la roue. Le débit, et en conséquence la puissance de la turbine, est réglé en variant l'ouverture de l'injecteur qui produit le jet avec un pointeau mobile.



Fig. 5.4 : turbine Pelton

La turbine Turgo est une turbine dont les injecteurs envoient leur jet tangentiellement sur une couronne d'augets à simple cuillère. Le couple moteur a donc une composante axiale, qu'il faudra prendre en compte sur la butée ou pivot de l'arbre.

La turbine Banki-Mitchell (crossflow) est une turbine dans laquelle les aubes sont disposées de façon cylindrique ; l'écoulement traverse les aubes depuis le distributeur, se retrouve à l'intérieur de la roue et en ressort par les aubes opposées au distributeur. Elles sont peu sensibles au colmatage par les feuilles et très faciles d'entretien

Après discrétisation de cette dernière, on obtient pour le modèle du groupe turbine-alternateur

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - 1) \quad (6.51)$$

Avec,

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1.826 & 0 \\ 0 & -1.54 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 1.21 & 0 \\ 0 & 0.7693 \end{bmatrix}; A_3 = \begin{bmatrix} -0.3479 & 0 \\ 0 & -0.1275 \end{bmatrix};$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0.03653 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; B_0 = \begin{bmatrix} 1.367 & -0.03534 \\ -0.07828 & 1.218 \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} -2.107 & -0.06115 \\ 0.1818 & -0.8947 \end{bmatrix};$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1.043 & 0.06876 \\ -0.1276 & 0.1182 \end{bmatrix}; B_3 = \begin{bmatrix} -0.1629 & -0.01589 \\ 0.02571 & 0.02204 \end{bmatrix}; B_4 = \begin{bmatrix} 0.003059 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

6.2.4 Résultats de simulations

6.2.4.1 Résultats de simulations de la commande LQG à paramètres fixes, avec et sans perturbations

Les résultats de simulation sont obtenus avec les paramètres de réglage suivants : $\Lambda = 5 I_{2 \times 2}$; $Q = I_{2 \times 2}$.

Ces paramètres ont une influence déterminante sur le comportement du système, mais leurs valeurs optimales ne sont pas toujours faciles à obtenir et il devient nécessaire de les chercher afin de satisfaire les performances souhaitées :

$$y_1 = P_t$$

$$y_2 = V_t$$

$$u_1 = U_e$$

$$u_2 = U_g$$

- [PWG 88]** **Pwgasan, P. et Knshnan, R. (1988)**, “Modeling of Permanent Magnet Motor Drives,” IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 35, No. 4.
- [QIN 03]** **Qin, S. J. et Badgwell, T. (2003)**, “A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology,” Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 733-764.
- [RAM 01]** **Ramond Ramond, G. (2001)**, “Contribution à la Commande Prédictive Généralisée Adaptative Directe et Application,” Université Paris XI U.F.R. Scientifique D’Orsay.
- [RAM 05]** **Ramaswamy, S., Cutright, T. J. et Qammar, H. K. (2005)**, “Control of a continuous bioreactor using model predictive control,” Process Biochemistry, Vol. 40, pp. 2763-2770.
- [RIC 76]** **Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L. et Papon. J. (1976)**, “Algorithmic control of industrial processes,” Proceedings of the Fourth IFAC symposium on identification and system parameter estimation, pp. 1119–1167.
- [RIC 78]** **Richalet, J. Rault, A. Testud, J. L. et Papon, J. (1978)**, “Model predictive heuristic control application to industrial processes,” Automatica, Vol. 14, pp. 413–428.
- [SAN 03]** **Sansevero, G. (2003)**, “Model Predictive Control Algorithm for Francis Hydro Turbine-generators,” Waterpower XIII.
- [SAN 89]** **Sanchez, G. G. A. (1989)**, “Commande adaptative multivariable à horizon de prédiction étendu,” Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [SAS 89]** **Sastry, S. S. et Bodson, M. (1989)**, “Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness,” Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [SAW 92]** **Sawadogo, S. (1992)**, “Modélisation, Commande Prédictive et supervision d’un système d’irrigation,” Université Paul Sabatier de Toulouse (Sciences).

que pour la commande LQG, cette minimisation est faite sur un horizon qui s'étend jusqu'à l'infini [BIT 90] [DIO 96] [GIN 03]

La synthèse de la loi de commande est basée sur la minimisation du critère quadratique

$$J = E \left\{ \sum_{j=N_i}^{N_p} [R(y^*(t+j) - y(t+j))]^2 + \lambda [Qu(t+j-1)]^2 / t \right\} \quad (1.22)$$

sous la contrainte $\Delta u(t+i) = 0$ pour $i \geq N_u$

La plupart des algorithmes de commande à prédiction étendue sont des cas particuliers de la commande GPC, et peuvent donc être retrouvés par certains choix de paramètres de synthèse. Le tableau 1.1 résume les différents types d'algorithmes suivant le choix des paramètres du critère. Dans cette table, le symbole 'x' signifie qu'il s'agit d'un paramètre de synthèse, et '-' que la méthode correspondante n'utilise pas de paramètre de synthèse [SAW 92].

Commande	N_p	N_i	N_u	λ	Q	R
GPC	x	x	x	x	Δ	x
MAC	x	k+1	$N_p - k$	x	Δ	1
DMC	x	k+1	x	x	Δ	1
EPSAC	x	k+1	1	0	-	x
EHAC	x	N_p	1	0	-	1
MV	k+1	k+1	1	0	-	1
GMV	K+1	k+1	1	x	X	x

Enfin ce n'est qu'à partir des années 90 qu'une réelle explosion du nombre d'applications utilisant la commande prédictive a été enregistrée. La commande prédictive a été utilisée avec succès dans différentes applications industrielles, notamment dans le domaine des processus chimiques [KEY 88] [CAM 04] dans le domaine de la robotique [ESS 01] [GIN 03] et plus récemment dans le domaine des bioprocédés [FOS 95] [COS 01] [DOW 01] [PRE 03] [CAMP 03] [RAM 05].

d. Factorisation

Tout au long de l'estimation, la matrice $P(k)$ doit demeurer définie positive. En pratique, il se peut que durant de longues estimations, $P(k)$ devienne semi-définie positive (par propagation d'erreurs d'arrondis). Pour éviter ce problème, la matrice de covariance est factorisée sous la forme:

$$P(k) = U(k)D(k)U^T(k) \quad (2.30)$$

où $U(k)$ est une matrice triangulaire supérieure dont les éléments sont égaux à 1 et $D(k)$ est une matrice diagonale

e. Algorithme d'adaptation paramétrique

Dans cette partie nous présentons la version complète de l'estimateur de paramètres. Les données sont préalablement filtrées et normalisées, soit :

$$\bar{y}_f(k) = \frac{\Delta G(q^{-1})}{F(q^{-1})} \frac{y(k)}{\sqrt{\eta(k)}} \quad (2.31)$$

$$\bar{\varphi}_f(k) = \frac{\Delta G(q^{-1})}{F(q^{-1})} \frac{\varphi(k)}{\sqrt{\eta(k)}} \quad (2.32)$$

L'actualisation du vecteur paramètre se fait alors de la façon suivante :

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)\varepsilon(k) \quad (2.33)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\bar{\varphi}_f(k)}{c + \bar{\varphi}_f^T(k)P(k-1)\bar{\varphi}_f(k)} \quad (2.34)$$

$$P(k) = \frac{1}{\alpha(k)} [P(k-1) - K(k)\bar{\varphi}_f^T(k)P(k-1)] \quad (2.35)$$

$$\varepsilon(k) = [\bar{y}_f(k) - \bar{\varphi}_f^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (2.36)$$

$$\alpha(k) = \frac{\text{trace}[P(k)]}{\text{trace}[P(k-1)]} \quad (2.37)$$

$$c = \text{Cste} \quad (2.38)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ g_{N_p-1} & g_{N_p-2} & \dots & \dots & g_0 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Avec

$$g_i^j = g_j \quad \text{pour } j = 0, 1, \dots \leq i \quad \text{et} \quad g_i^j = 0 \quad \text{pour } j > i \quad (3.68)$$

3.2.2.6 Loi de commande

La loi de commande est calculée de façon à minimiser une fonction de coût cette fonction contient les erreurs quadratiques entre la trajectoire de référence et les prédictions sur l'horizon de prédiction ainsi que la variation de la commande.

Cette fonction de coût est la suivante :

$$J(N_i, N_p, N_u, t) = \sum_{j=N_i}^{N_p} [[y_r(t+j) - \hat{y}(t+j/t)]^T R [y_r(t+j) - \hat{y}(t+j/t)] + \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2] \quad (3.69)$$

$\hat{y}(t+j/t)$: Sortie prédite à l'instant $(t+j)$

$y_r(t+j)$: Trajectoire de référence à l'instant $(t+j)$

$\Delta u(t+j-1)$: Incrément de commande à l'instant $(t+j-1)$

$\lambda(j)$: Coefficient de pondération du signal de commande

N_i : Horizon minimal de prédiction

N_p : Horizon maximal de prédiction

La minimisation du critère J fournit la séquence des commandes futures dont seule la première sera effectivement appliquée. Le coefficient λ donne plus ou moins de poids à la commande par rapport à la sortie, de façon à assurer la convergence lorsque le système de départ présente un risque d'instabilité [CAB 08].

Le critère (3.69) peut être écrit sous forme matricielle comme suit :

4.4.2 Résultats de simulations de la commande LQG adaptative multivariable, avec et sans perturbations

On utilise les mêmes paramètres de synthèse qu'avec la LQG à paramètres connus ($\Lambda = 0.5 I_{2 \times 2}$; $Q = I_{2 \times 2}$).

Les valeurs d'initialisation de l'algorithme d'adaptation sont :

$$\hat{A}_0 = I + \begin{bmatrix} 0.95 & 0.38 \\ -0.13 & -1.15 \end{bmatrix} q^{-1} + \begin{bmatrix} 0.09 & -0.57 \\ -0.07 & 0.79 \end{bmatrix} q^{-2} + \begin{bmatrix} 0.00 & 0.20 \\ -0.07 & 0.14 \end{bmatrix} q^{-3}$$

$$\hat{B}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0.006 \\ -0.04 & -0.006 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.04 & 0.04 \\ -0.08 & 0.03 \end{bmatrix} q^{-1} + \begin{bmatrix} -0.07 & 0.09 \\ 0.05 & 0.13 \end{bmatrix} q^{-2}$$

Le gain d'adaptation initial est $P(0) = 50 I$

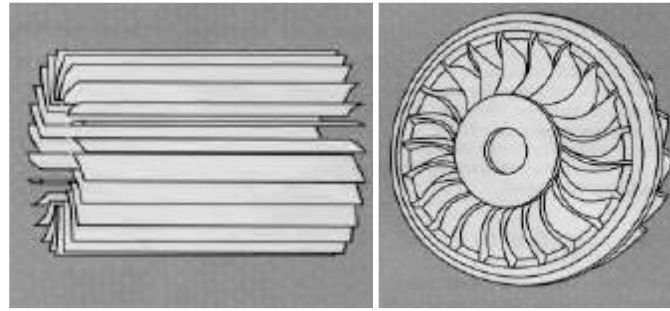


Fig. 5.5: turbine Banki-Mitchell (crossflow)

✓ Turbines à réaction

Une turbine à réaction est une machine fermée (noyée) qui utilise à la fois la vitesse de l'eau (énergie cinétique) et une différence de pression. Deux principes sont à la base de son fonctionnement :

- La création d'un tourbillon au moyen d'une bêche spirale, d'aubages directeurs, ou les deux à la fois ;
- La récupération du mouvement circulaire du tourbillon par les aubages d'une roue en rotation qui dévient les filets d'eau pour leur donner une direction parallèle à l'axe de rotation [BRE 08].

Elle se compose des éléments suivants :

- Un distributeur fixe pour régler le débit et l'orientation du flux d'eau afin de lui permettre de placer les pales sous un angle adéquat et éviter des pertes importantes de rendement.
- Une roue mobile munie de pales en forme de cuillère qui a pour rôle de transformer l'énergie hydraulique en un mouvement de rotation qui peut être exploité pour la production d'électricité.
- Un aspirateur-diffuseur qui de par sa forme permet de récupérer une partie de l'énergie cinétique résiduelle en créant une dépression à la sortie de la roue.

Les principaux types de turbines à réaction sont :

La turbine Kaplan est une autre forme de turbine à réaction, dont la roue est entièrement immergée dans l'eau.

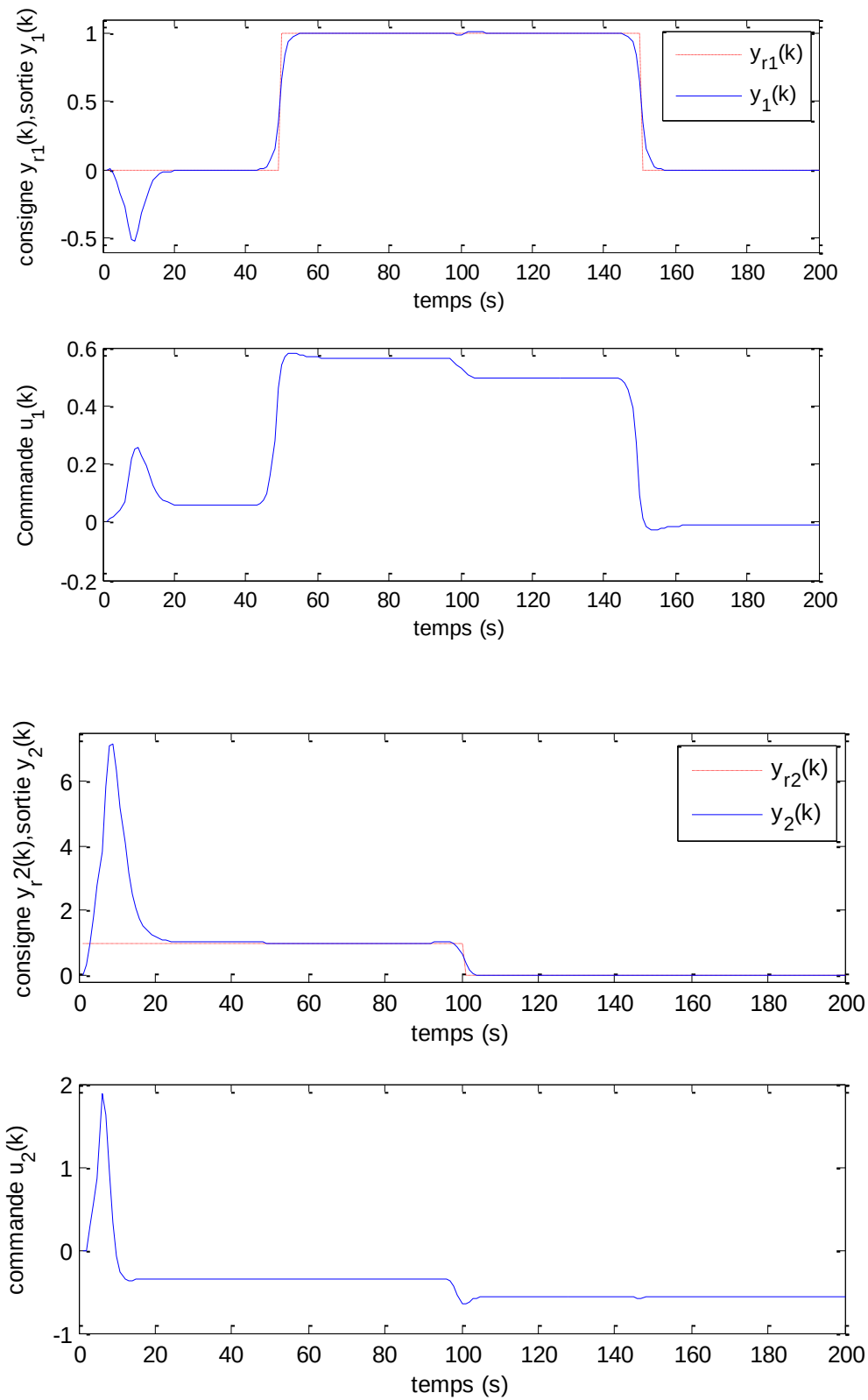


Fig. 6.2 : la variation des sorties (P_t, V_t) et des commandes (U_e, U_g) avec la LQG à paramètres connus, en absence de perturbations

- [SED 08]** **Sedraoui, M. (2008)**, “Apport des principales méthodes d’optimisation dans la commande prédictive généralisée multivariable sous contraintes,” Université Montouri de Constantine, Faculté des Sciences et Techniques de l’ingénieur.
- [SMI 59]** **Smith, O. J. M. (1959)**, “A controller to overcome dead-time,” Instrument Society of America Journal, Vol. 6 No. 2 pp. 28-33.
- [STO 08]** **Stoica, C. N. (2008)**, “Robustification de lois de commande prédictives multivariables,” Université Paris-sud 11, Faculté des Sciences d’Orsay.
- [THA 99]** **Tham, M. T. (1999)**, “Minimum Variance and Generalized Minimum Variance Algorithms,” Dept. of Chemical and Process Engineering, University of Newcastle upon Tyne.
- [WAT 81]** **Watanabe, K. et Ito, M. (1981)**, “Control for linear systems with delay,” IEEE Trans. On Automatic Control, Vol. 26, No. 6 pp.1261-1269.
- [YDS 84]** **Ydstie, B. E. (1984)**, “Extended Horizon Adaptive Control,” Proceedings of the 9th IFAC World Congress, Budapest, Hungary.
- [ZEL 01]** **Zelmat, M. (2001)**, “Automatisation des processus industriels Tome 2, Commande modale et adaptative,” Office des publications universitaires.
- [ZEM]** **Zelmat, M. (2001)**, “Automatisation des processus industriels Tome 2, Commande modale et adaptative,” Office des publications universitaires, Algérie.
- [ZID 08]** **Zidane, Z. and Mesquine, F. (2008)**, “Commande d’un moteur à courant continu,” Mémoire de Master, Faculté des Sciences, Semlalia, Marrakech, Maroc.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons donné un état de l'art non exhaustif sur la commande prédictive, ce qui permet au lecteur d'avoir une idée sur les différentes approches dans le domaine. Nous avons montré l'évolution chronologique de ces méthodes, en précisant pour chacune d'elle les avantages et les défauts. Nous avons pu constater un manifeste et incontestable évolution vers l'utilisation de la commande prédictive à horizon glissant, laquelle s'avère efficace pour le contrôle des systèmes complexes.

Lorsque les processus à commander possèdent des paramètres variant dans le temps, un régulateur fixe ne pouvait pas toujours fournir un comportement acceptable du système pour toute situation. La partie adaptative des commandes susmentionnées va consister à ajuster en ligne les coefficients des polynômes du modèle. L'estimation paramétrique est, de ce fait, très importante, en ce sens qu'elle conditionne souvent le bon fonctionnement du système de commande adaptatif.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte général de la commande adaptative, en adoptant les approches directes et indirectes. Ainsi, les principes de commande adaptative ont été développés. Puis, nous avons vu que la partie adaptative des commandes consistait à ajuster en ligne les coefficients des polynômes du modèle. Ensuite, la stratégie de la mise à jour des paramètres du régulateur a été développée, selon la méthode des moindres carrés récurrents. Enfin, nous avons présenté les problèmes relatifs à l'estimation paramétrique.

$$J = (\Delta U + F - Y_r)^T R (\Delta U + F - Y_r) + \lambda \Delta U^T \Delta U \quad (3.70)$$

Avec

$$Y_r = [y_r(t+1) \ y_r(t+2) \ \dots \ y_r(t+N_p)]^T \quad (3.71)$$

La solution optimale est ensuite obtenue par dérivation du critère J par rapport au vecteur des incréments de commande ΔU et en annulant cette dérivée.

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0 \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 2 \left((G^T G + \lambda I) \Delta U + G^T (F - Y_r) \right) \quad (3.73)$$

On obtient ainsi la commande optimale :

$$\Delta U = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (F - Y_r) \quad (3.74)$$

Enfin, seule la première valeur de la séquence (3.74) est appliquée au système en accord avec la stratégie de l'horizon fuyant d'où :

$$\Delta u_{opt} = K_1 (F - Y_r) \quad (3.75)$$

Avec K_1 représente la première ligne de la matrice $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$

$$K_1 = [1 \ 0 \ \dots \ 0] (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T \quad (3.76)$$

D'où la loi de commande est donné par :

$$u_{opt}(t) = u(t-1) + K_1 (F - Y_r) \quad (3.77)$$

Horizon de commande

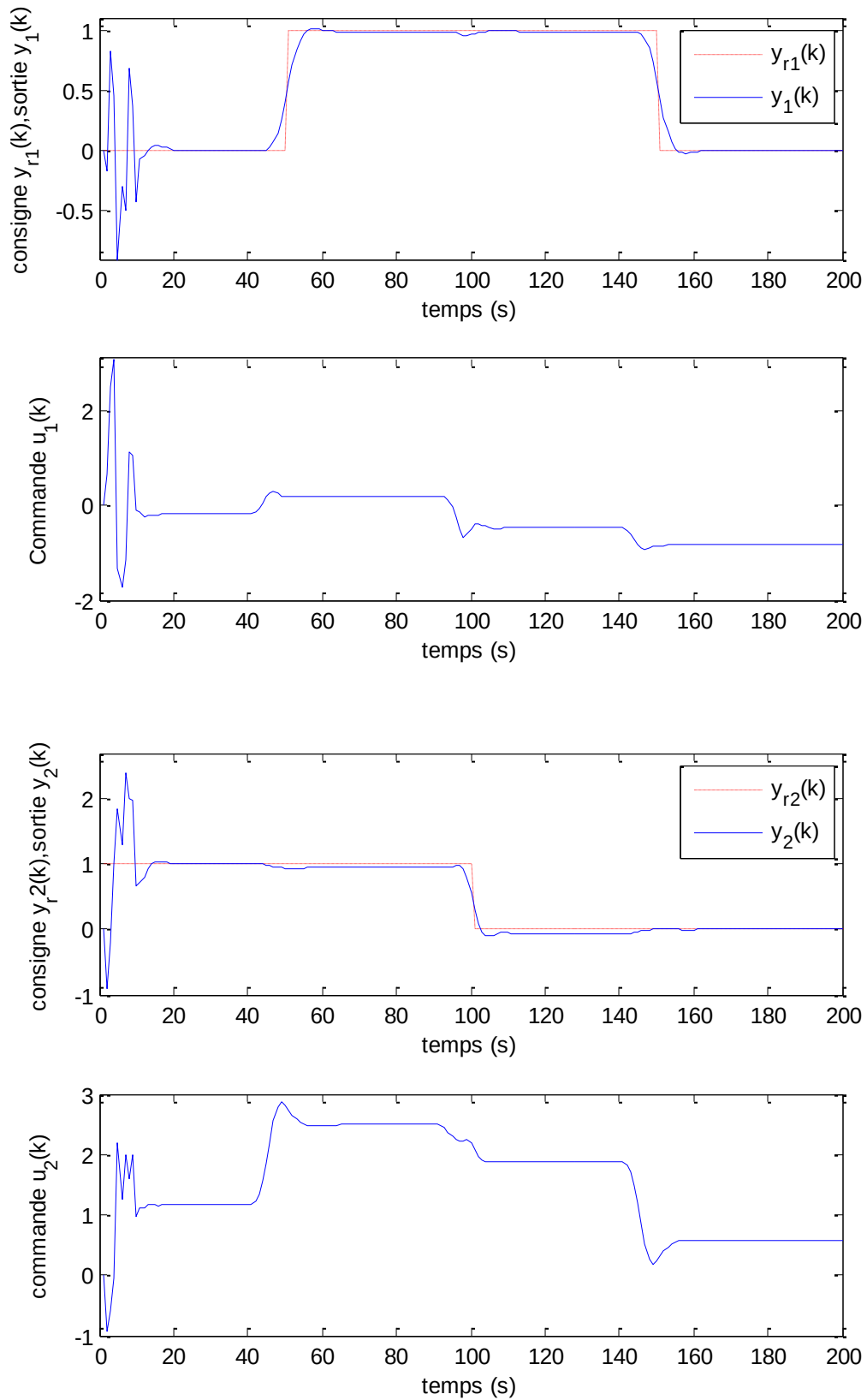


Fig.4.4 : performances en poursuite du LQG adaptative

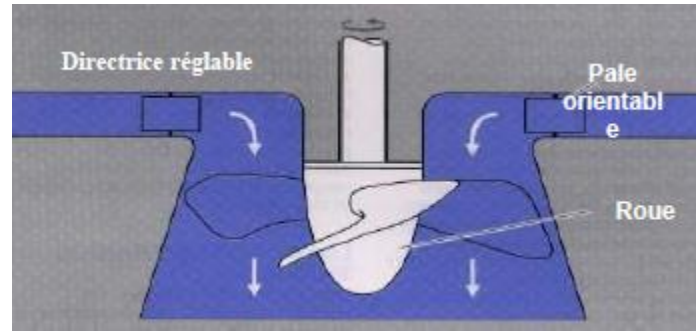


Fig. 5.6 : Turbine Kaplan

Sa roue est une hélice, comparable à celle d'un bateau. Le débit est réglé le plus souvent en changeant l'orientation des pales de la roue, éventuellement par l'ajustement parallèle d'aubes directrices similaires à celle de la turbine Francis pour en améliorer encore le rendement. Ce type de turbine trouve son application dans des petites centrales à basse chute

La turbine Francis est la turbine la plus répandue dans les anciennes installations à faible chute. En fonction de la puissance, elle est installée pour des chutes comprises entre 3 mètres (installation en chambre d'eau ouverte) et plus de 100 mètres (turbines à bache spirale d'un aspect similaire à celui d'une pompe centrifuge).

Contrairement à celle de la Pelton, la roue de cette turbine, est complètement immergée dans l'eau. Cette roue est constituée d'une série d'aubages profilés qui forment des canaux au travers desquels l'eau est accélérée et déviée.

La régulation du débit est réalisée par des pales mobiles placées sur la circonférence de la roue. Elles portent le nom d'aubes directrices.

Etant donné sa construction compliquée, qui implique un prix d'achat élevé, ce type de turbine n'est que rarement installé dans des petites centrales récentes.

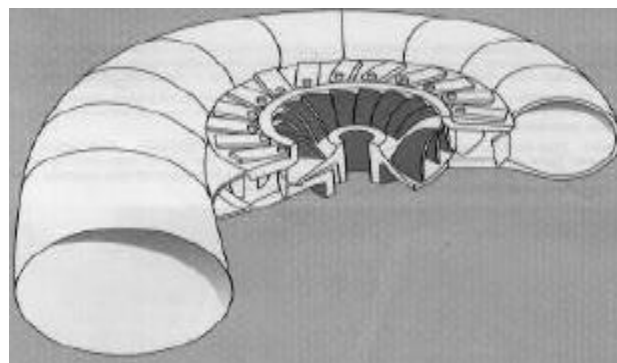


Fig. 5.7 : Turbine Francis

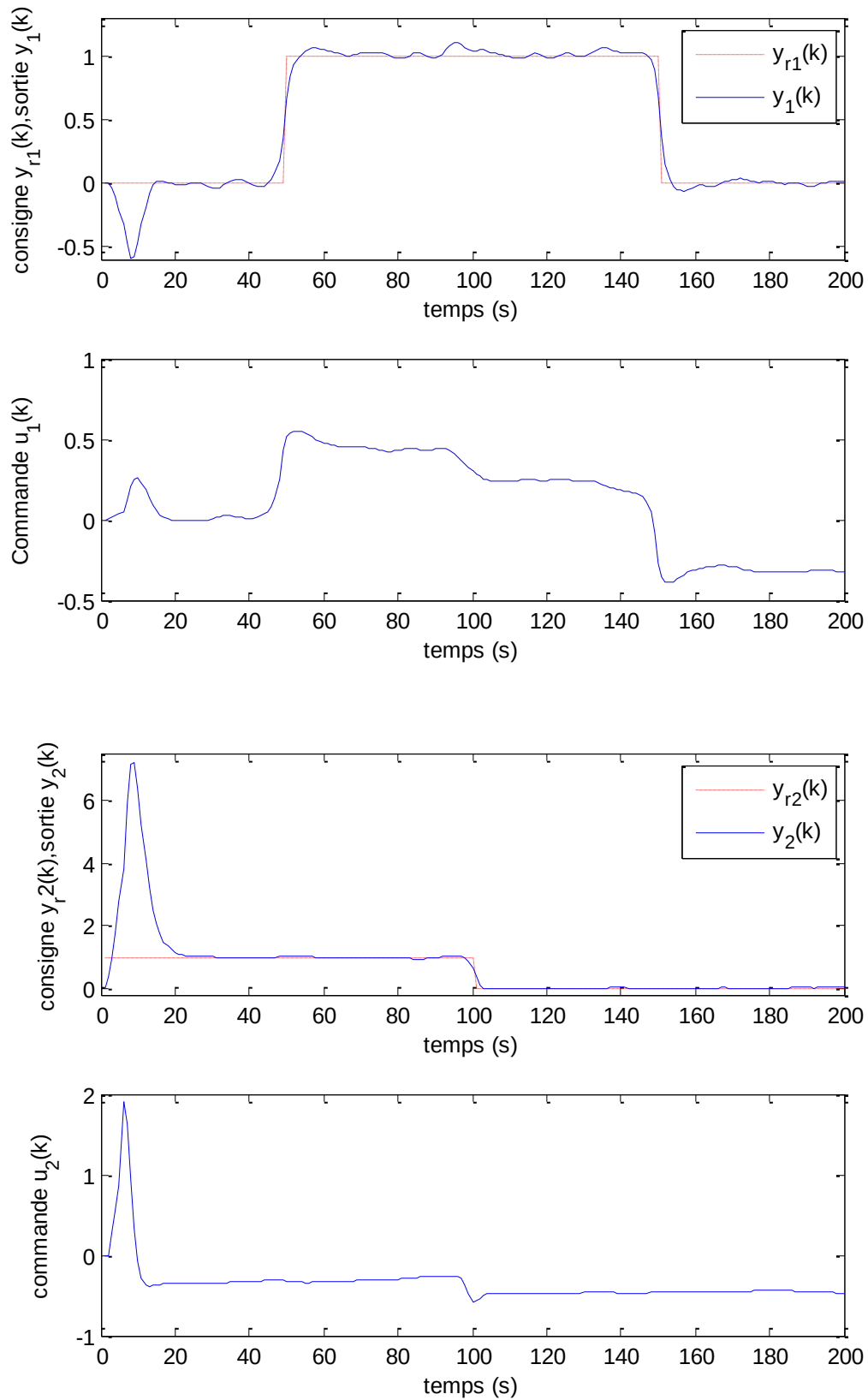


Fig. 6.3 : la variation des sorties (P_t, V_t) et des commandes (U_e, U_g) avec la LQG à paramètres connus, en présence de perturbations

- [ZID 11a]** **Zidane, Z., Ait Lafkih, M. and Ramzi, M. (2011)**, “Adaptive Generalized Predictive Control of a Separately Excited DC Motor,” International Journal of Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering IJ-STA, Vol. 5, No. 1, pp. 1472-1485.
- [ZIDb 11b]** **Zidane, Z., Ait Lafkih, M. and Ramzi, M. (2011)**, “Adaptive Generalized Predictive Control of a DC Motor,” Premier Congrès International Informatique et Sciences de l’Ingénieur (ISI11), Meknès Morocco.
- [ZID 12]** **Zidane, Z., Ait Lafkih, M. and Ramzi, M., (2012)**, “Design of Linear Quadratic Gaussian Controller for Sample Power System,” International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 13-19.

La puissance de l'approche repose dans l'hypothèse faite sur les actions de commandes futures. Au lieu de les laisser libres comme cela était le cas dans le développement précédent, le GPC reprend une idée de la loi de commande DMC (Dynamic Matrix Control [CUT 80].

Cette idée est la suivante :

Il existe un horizon de commande N_u à partir duquel les actions de commande restent constantes. i.e. $\Delta u(t+j) = 0$ pour $j \geq N_u$.

En d'autres termes, cela veut dire que l'on impose une pondération infinie aux changements des actions de commande après un certain temps. Si $N_u = 1$, on ne considère qu'un seul changement de la commande, après quoi, les commandes $u(t+j)$ pour $j = 1$ à N_p , sont toutes égales à $u(t)$.

Donc, un N_u plus grand de degrés de liberté pour minimiser le critère, ce qui nous conduit à une meilleure performance, mais ceci au prix d'avoir une commande plus agitée en général. D'autre part, si l'horizon de prédiction est égal à l'horizon de commande ($N_p = N_u$) et $\lambda = 0$, la loi de commande minimisant le critère J , est celle qui simplifie les dynamiques du modèle inverse du procédé ; Or, il est bien connu que ce type de loi (à variance minimale) n'est pas capable de stabiliser un procédé à déphasage non minimal (la commande devient infinie).

En plaçant une pondération infinie sur les incréments de la commande (i.e. $N_u < N_p$), on peut arriver à stabiliser la boucle, même avec $\lambda = 0$.

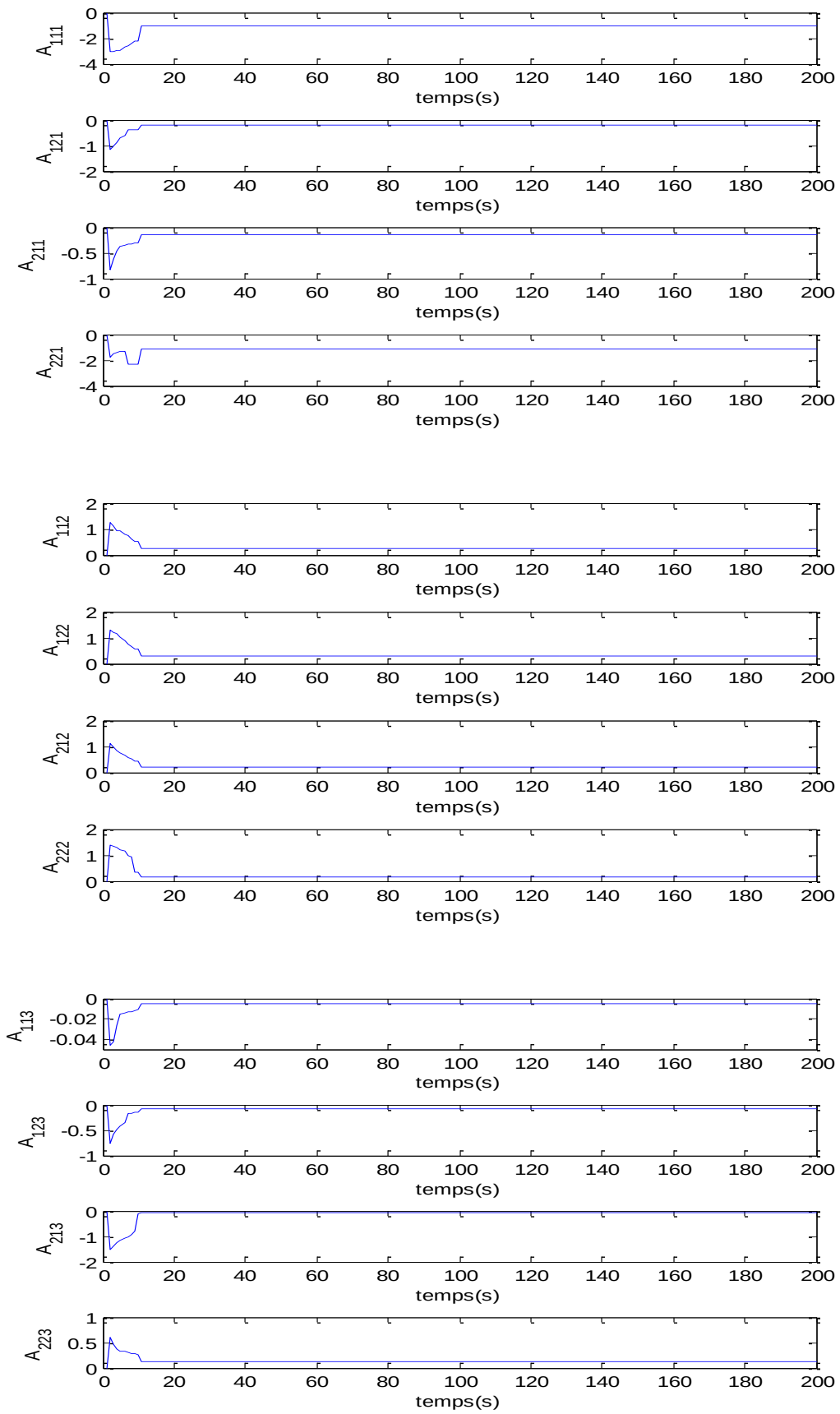
L'utilisation de $N_u < N_p$ réduit la taille de la matrice $(G^T G + \lambda I)$, ce qui simplifie les calculs puisque G devient :

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \dots & \dots & g_0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ g_{N_p-1} & g_{N_p-2} & \dots & \dots & g_{N_p-N_u} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Les valeurs $\Delta u(t+j-1)$ pour $j = 1$ à N_p pourront être calculées si la matrice $(G^T G + \lambda I)^{-1}$ est non singulière.

Ceci peut être assuré de différentes façons :

- a. Choisir $\lambda > 0$



5.2.7.8 Générateurs

Le choix du générateur et du système de régulation dépend en premier lieu du mode de fonctionnement de la microcentrale: en parallèle avec le réseau de distribution électrique ou en régime isolé [BRE 08]

En parallèle, l'installation injecte du courant électrique dans le réseau de distribution local, alors qu'en mode isolé, la microcentrale n'alimente qu'un seul utilisateur (alpage, hôtel ou cabane de montagne). Une combinaison des deux formules est possible, bien que plus complexe et plus onéreuse.

Pour le fonctionnement en parallèle Les microcentrales de puissance inférieure à $300kW$ et ne fonctionnant qu'en parallèle sont essentiellement équipées de générateurs asynchrones. La tension et la fréquence sont dictées par le réseau de distribution et sont constantes.

Pour le fonctionnement en régime isolé ou îlot, le groupe turbine-générateur doit avoir la capacité de maintenir par lui-même une tension et une fréquence constantes. La puissance produite par le générateur doit être identique à celle consommée par les utilisateurs. Si tel n'est pas le cas, fréquence et tension se modifient, ce qui peut provoquer des dommages aussi bien aux appareils consommateurs (moteurs, lampes, électronique), qu'aux installations de production.

Les microcentrales en régime isolé sont dans leur grande majorité équipées de générateurs synchrones, machines qui peuvent alimenter tout type d'appareils consommateurs.

La tension est maintenue constante par un régulateur électronique intégré au générateur. La fréquence est fixée par la vitesse de la turbine, dont le réglage est également assuré, de nos jours, presque exclusivement par voie électronique ou électromécanique [BRE 08] [IOA 96] [BEN 07].

Les installations de production électrique peuvent utiliser deux types de générateurs selon les conditions d'utilisation pré-identifiées :

- Le générateur synchrone équipé d'un système d'excitation associé à un régulateur de tension qui peut régler la tension du réseau.
- Le générateur asynchrone qui n'a aucune possibilité de réglage de tension et absorbe l'énergie réactive pour leur propre magnétisation.

Nous nous intéressons à la machine synchrone à aimants permanents.

6.2.4.2 Résultats de simulations de la commande LQG adaptative, avec et sans perturbations

On utilise les mêmes paramètres de synthèse qu'avec la LQG à paramètres connus ($\Lambda = 5 I_{2 \times 2}$; $Q = I_{2 \times 2}$).

Les valeurs d'initialisation de l'algorithme d'adaptation sont :

$$\hat{A}_0 = I + \begin{bmatrix} 0.950 & 0.270 \\ -0.13 & -1.18 \end{bmatrix} q^{-1} + \begin{bmatrix} 0.070 & -0.607 \\ -0.009 & 0.890 \end{bmatrix} q^{-2} + \begin{bmatrix} 0.010 & 0.020 \\ -0.007 & 0.104 \end{bmatrix} q^{-3} \\ + \begin{bmatrix} -0.010 & 0.220 \\ -0.0170 & 0.240 \end{bmatrix} q^{-4}$$

$$\hat{B}_0 = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.004 \\ 0.002 & -0.003 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.050 & 0.030 \\ 0.070 & 0.500 \end{bmatrix} q^{-1} + \begin{bmatrix} -0.170 & 0.004 \\ 0.025 & 0.130 \end{bmatrix} q^{-2} \\ + \begin{bmatrix} -0.117 & 0.000 \\ 0.0305 & 0.001 \end{bmatrix} q^{-3}$$

Le gain d'adaptation initial est de $P(0) = 20 I$

- b. Utiliser le résultat de shah, Mohtadi et Clarke 1987, $N_p - N_u \geq d - 1$, Où d est l'ordre maximum des zéros à l'infini de la fonction de transfert du procédé.
- c. Utiliser un horizon initial. Le critère à minimiser va de $j = 1$ à N_p , on pourrait envisager de faire varier j de N_i à N_p ou N_i tel que G_{N_i} est non singulière, ce qui suppose une connaissance a priori sur la structure des retards du procédé.

3.2.2.7 Choix des paramètres de synthèse

- Horizon minimal

Si le retard d est parfaitement connu, il n'est pas judicieux de choisir N_1 inférieur à d , car on ferait des calculs superflus, étant donné que les sorties correspondantes ne seront pas affectés par la première action $u(t)$. Par contre, si d est inconnu ou variable, N_1 prend la valeur 1 et on augmentera l'ordre de $B(q^{-1})$ pour incorporer toutes les valeurs possibles du retard d [SAN 89].

- Horizon maximal ou de prédiction

Une valeur plus grande de N_2 est suggérée correspond au temps de montée du procédé. Il doit donc comprendre les éventuels retards ainsi que les comportements du type non minimum de phase [BEN 09].

- Horizon de commande

C'est un paramètre de conception et de réglage important, une variable de $N_u=1$ donne un contrôle généralement acceptable pour les processus simple et stable en boucle ouverte.

L'augmentation de N_u rend le control et la sortie correspondante plus active jusqu'à ce qu'une étape soit atteinte ou toute augmentation supplémentaire de N_u n'a aucune influence.

Pour un système instable, le bon control est réaliser quand N_u est ou moins égal au nombre des pôles instables. Pour les hautes performances, une valeur plus grande de N_u est souhaitable.

L'utilisation de $N_u < N_2$ est plus significative, permet de réduire la taille de la matrice $(G^T G + \lambda I)$ qui sera de taille $N_u \times N_u$ au lieu de $N_2 \times N_2$ qui conduit à minimiser la puissance nécessaire pour la procédure de calcul des prédictions et des commandes [BEN 09].

- Facteur de pondération λ

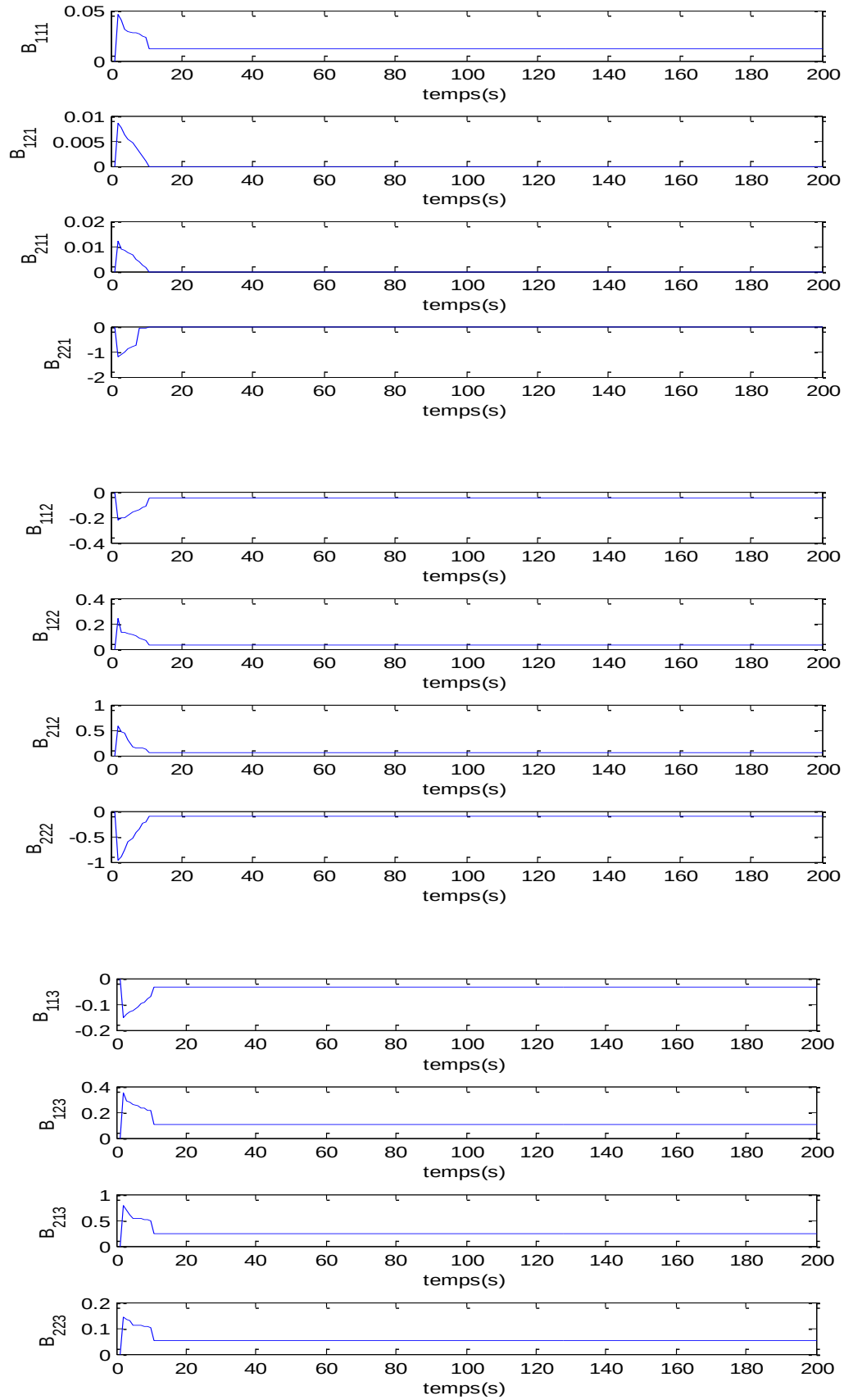


Fig.4.5 : paramètres estimés : LQG Adaptive sans perturbations

A. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose, en fonctionnement, normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- les machines synchrone à rotor bobiné
- les machines synchrone à réluctance
- les machines synchrone à aimants permanents.

Notre intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé).

La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance [BEN 09].

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de $2\pi/3$.

Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer [BEN 09].

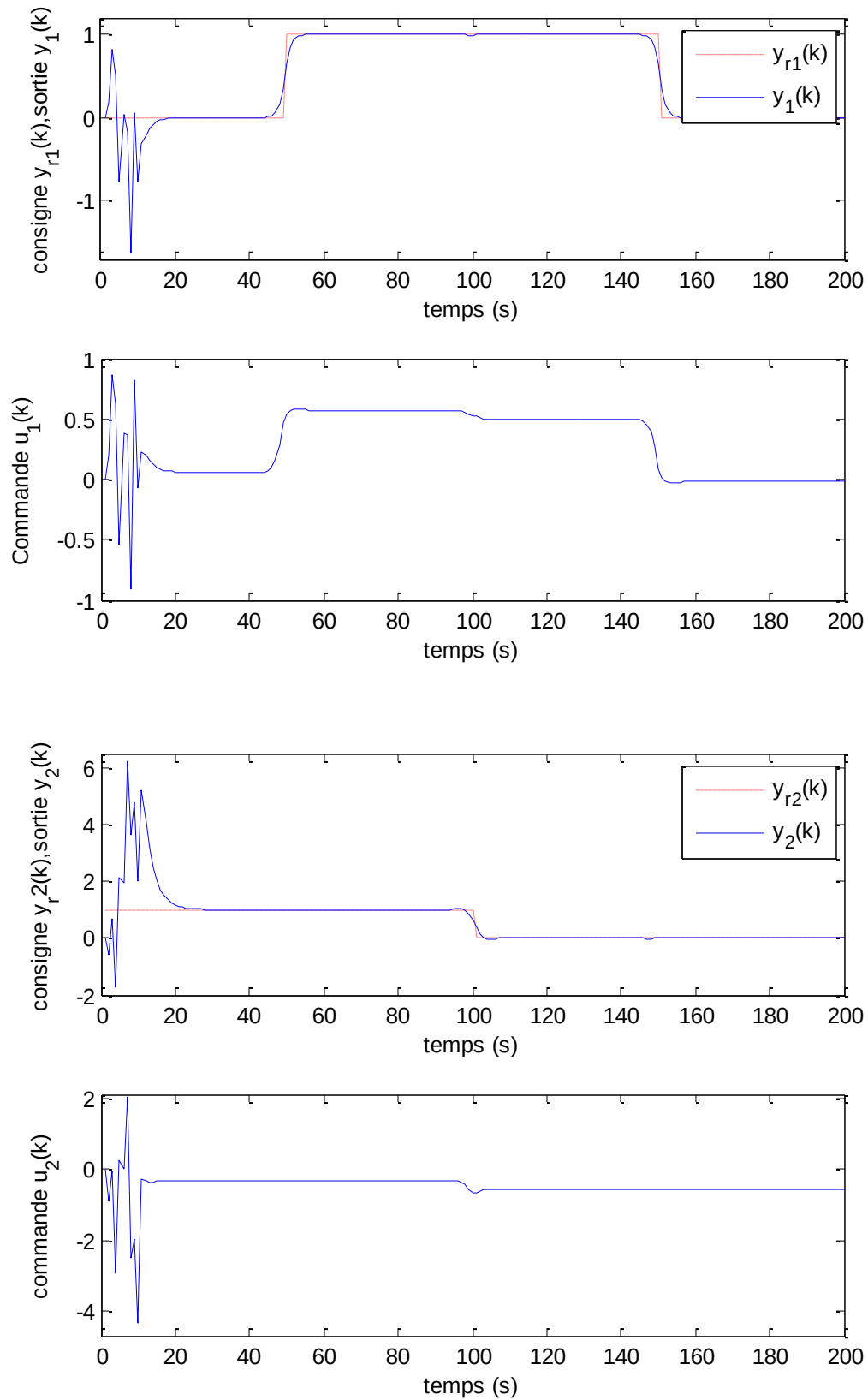


Fig. 6.4: la variation des sorties (P_t, V_t) et des commandes (U_e, U_g) avec la LQG adaptative, en absence de perturbations

Elle permet d'établir un compromis entre les performances atteintes par la sortie et l'énergie utilisée pour les atteindre. Ce paramètre permet de pénaliser de brusques changements de la commande $u(t)$.

On peut dire que pour des procédés ne présentent pas de difficultés particulières, les valeurs par défaut suivantes donnent en général de bonne performance : $N_1 = 1$; $N_u = 1$; $N_2 = \text{temps de montée}$; $\lambda = 0$

3.3 Synthèse des lois de commandes adaptatives

Lorsque les processus à commander possèdent des paramètres inconnus ou variant dans le temps, un régulateur fixe ne pouvait pas toujours fournir un comportement acceptable du système pour toute situation. La version adaptative des algorithmes de commande LQG et GPC présentés ci-dessus va consister à ajuster en ligne les coefficients des polynômes du modèle. L'estimation paramétrique est, de ce fait, très importante, en ce sens qu'elle conditionne souvent le bon fonctionnement du système de commande adaptatif.

Nous avons retenu l'algorithme de moindres carrés récursifs, décrit notamment dans le chapitre 2, soit

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (3.79)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} [P(k-1) - K(k)\varphi^T(k)P(k-1)] \quad (3.80)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (3.81)$$

3.4 Résultats de simulations

La méthodologie de la commande LQG et la commande GPC développée dans ce chapitre est appliquée en simulation sur un modèle d'un procédé monovariante tiré de la pratique, afin d'illustrer son potentiel.

Application à la commande d'un moteur à courant continu à excitation séparée

La fonction de transfert tension-vitesse issue des équations mécanique et électrique peut être représentée dans le plan continu par la fonction de transfert suivante [ZID 08] [ZID 11a] [ZID 11b]:

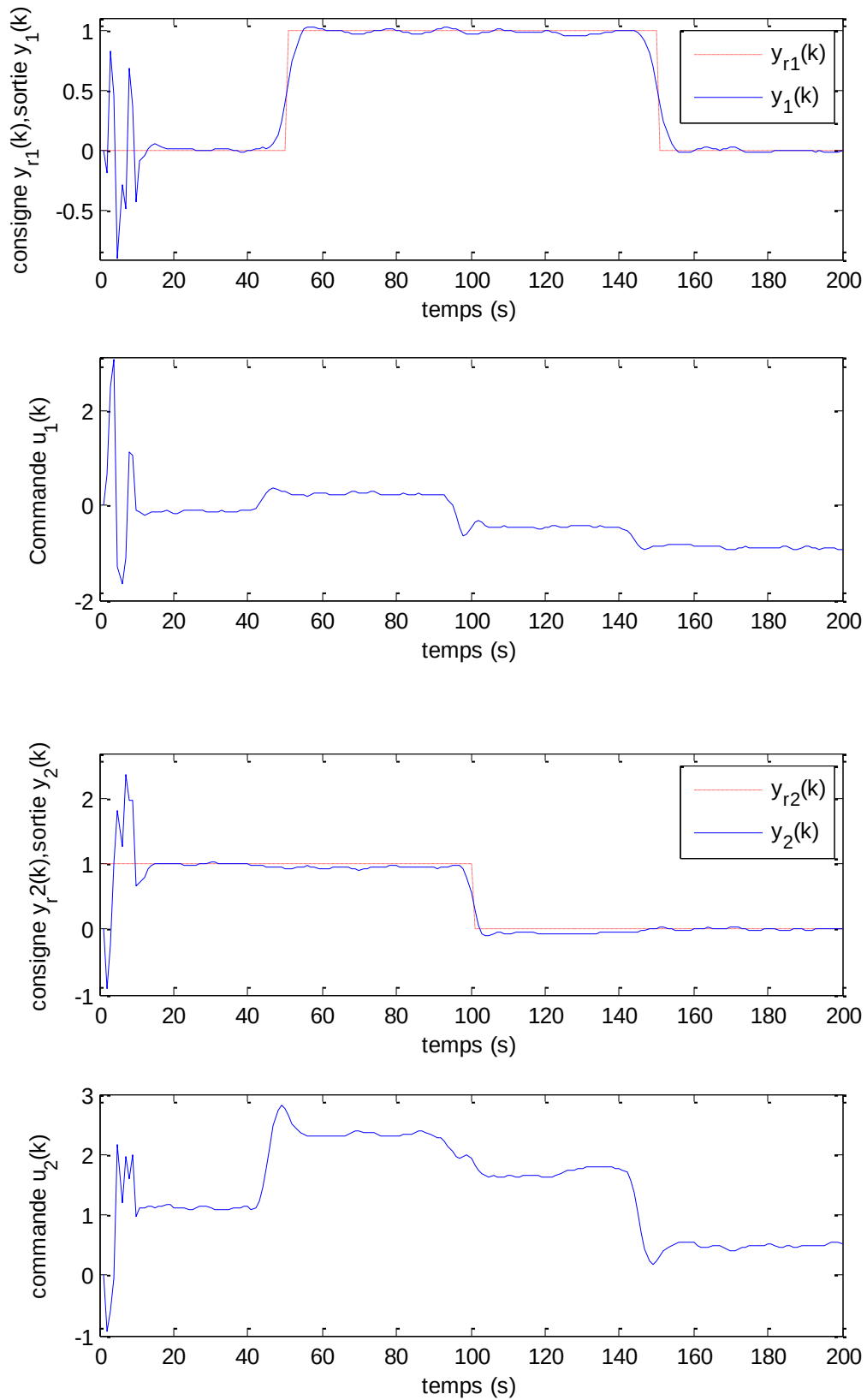


Fig.4.6 : performances en rejet de perturbations du LQG adaptative

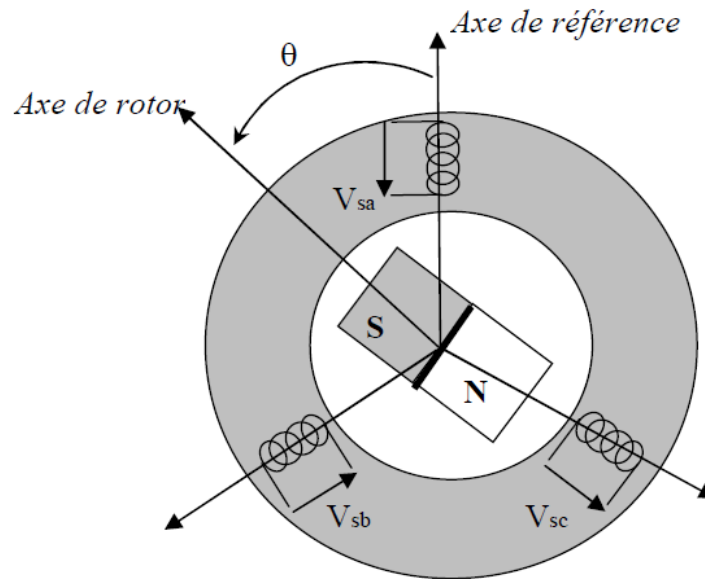


Fig. 5.8 : Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent [KHA 06]

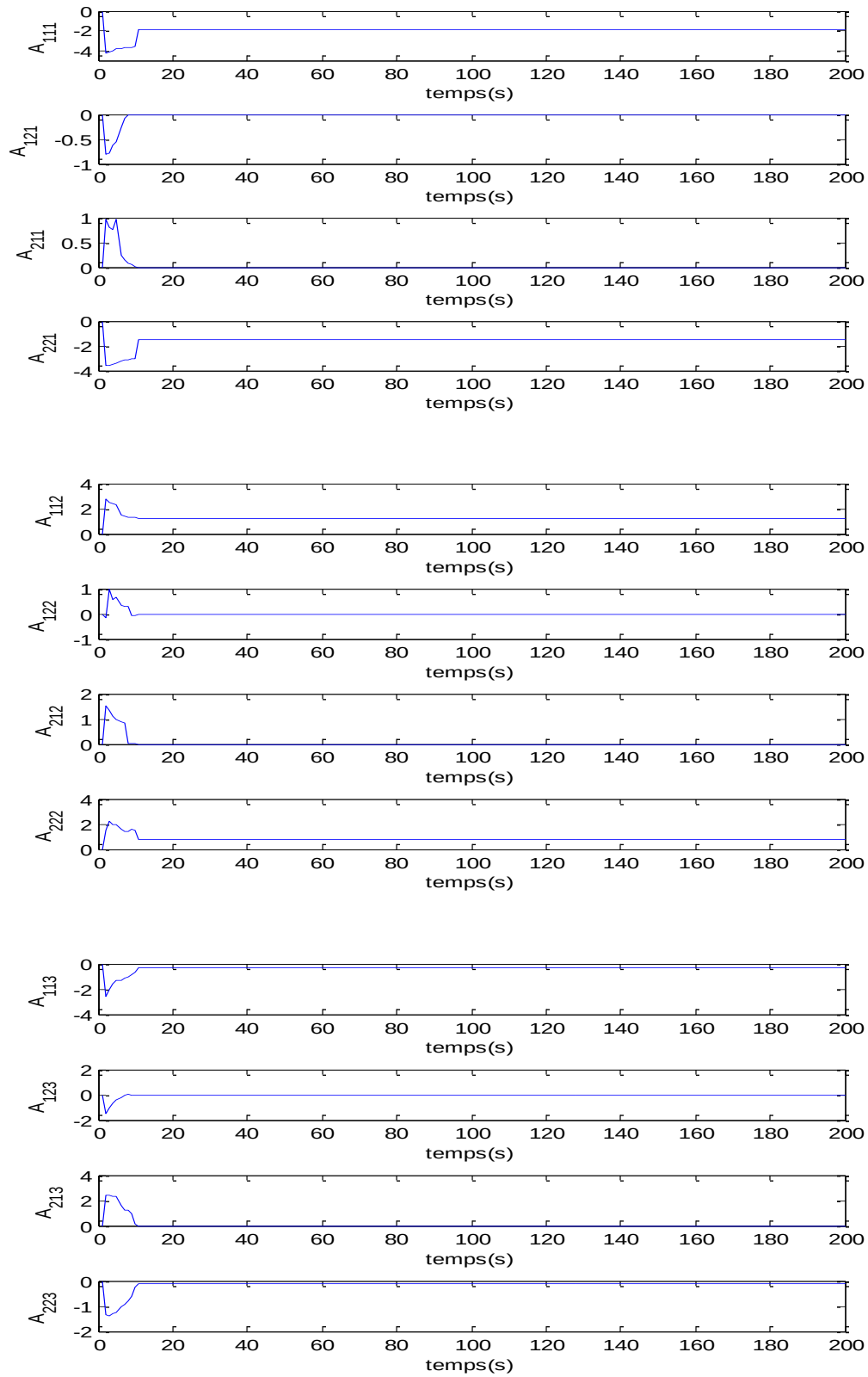
B. Modélisation mathématique de la machine synchrone à aimants permanents

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement. Les lois modernes de commande de plus en plus performantes permettent un meilleur contrôle des régimes transitoires tout en assurant, dans une grande plage de fonctionnement, un asservissement précis de la vitesse. Tous ces perfectionnements demandent une bonne connaissance de la machine et de son convertisseur, notamment en régime transitoire. Dans notre cas, nous en déduirons des lois de conception adaptées aux machines synchrones à aimants permanents [AIS 05].

B.1 Hypothèses Simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation de la machine, les hypothèses suivantes sont faites [PWG 88]:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la F.M.M créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température



$$\Omega(k) = \frac{K}{(f+Jp)(R+Lp)+K^2} U(p) - \frac{(R+Lp)}{(f+Jp)(R+Lp)+K^2} C_r(p) \quad (3.82)$$

Si le couple résistant C_r est faible. On aura la fonction de transfert simplifiée suivante :

$$\Omega(k) = \frac{K}{(f+Jp)(R+Lp)+K^2} U(p) \quad (3.83)$$

La discrétisation de la fonction de transfert donne :

$$\frac{\Omega(k)}{U(k)} = q^{-1} \frac{b_0 + b_1 q^{-1}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}} \quad (3.84)$$

Le modèle du moteur à courant continu à excitation séparée [ZID 08] a été identifié en excitant le processus avec une séquence binaire pseudo aléatoire, pour une période d'échantillonnage de 0.2s.

On a utilisé le toolbox de Matlab, le modèle du moteur à courant continu à excitation séparée obtenu est le suivant :

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{\Omega(k)}{U(k)} = q^{-1} \frac{0.01754 + 0.01718 q^{-1}}{1 + 1.099 q^{-1} - 0.1778 q^{-2}} \quad (3.85)$$

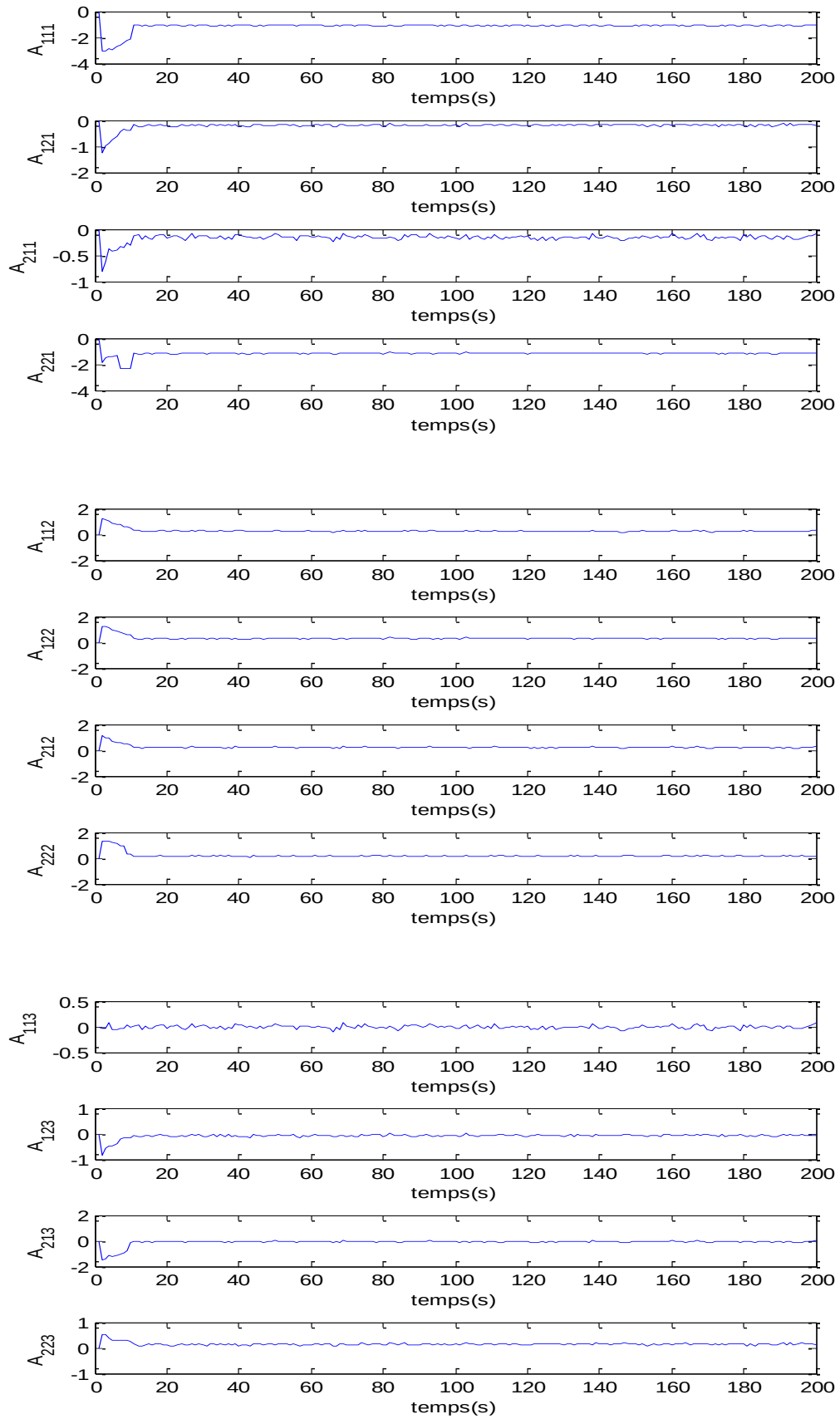
Cette fonction correspond à une entrée en tension, exprimée en volts, et à une sortie en vitesse exprimée en radians par seconde.

Pour illustrer les performances des algorithmes de la commande LQG et de la commande GPC développés ci-dessus, appliqués au réglage en vitesse du moteur à courant continu à excitation séparée, on a simulé le processus en absence et en présence des perturbations.

Le problème de commande est donc de réaliser la poursuite d'une trajectoire de référence varie entre -300 et 300 rad/s .

3.4.1 Résultats de simulations de la commande LQG monovariante à paramètres fixes, avec et sans perturbations

Les résultats de simulation obtenus avec les paramètres de réglage suivants : $\Lambda = 0.019$; $Q = 0.69$;



Un point de départ pour le modèle électrique est le contour des enroulements de phase comme vu dans la figure ci-dessous. Cette figure définit également les tensions de phase v_a, v_b, v_c et les courants de phase i_a, i_b, i_c

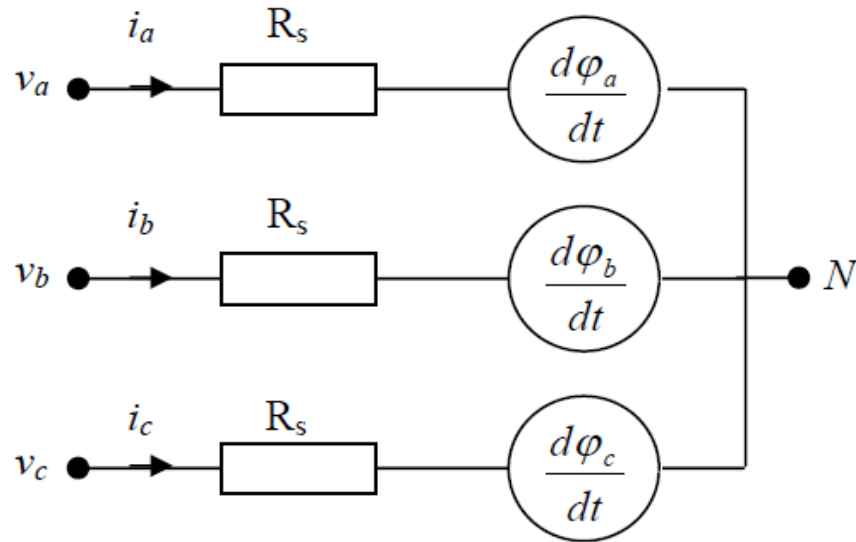


Fig.5.9 : Une disposition électrique triphasé connectée en Y pour un MSAP

B.2 Mise en équations de la machine

B.2.1 Equations électriques

▪ du stator

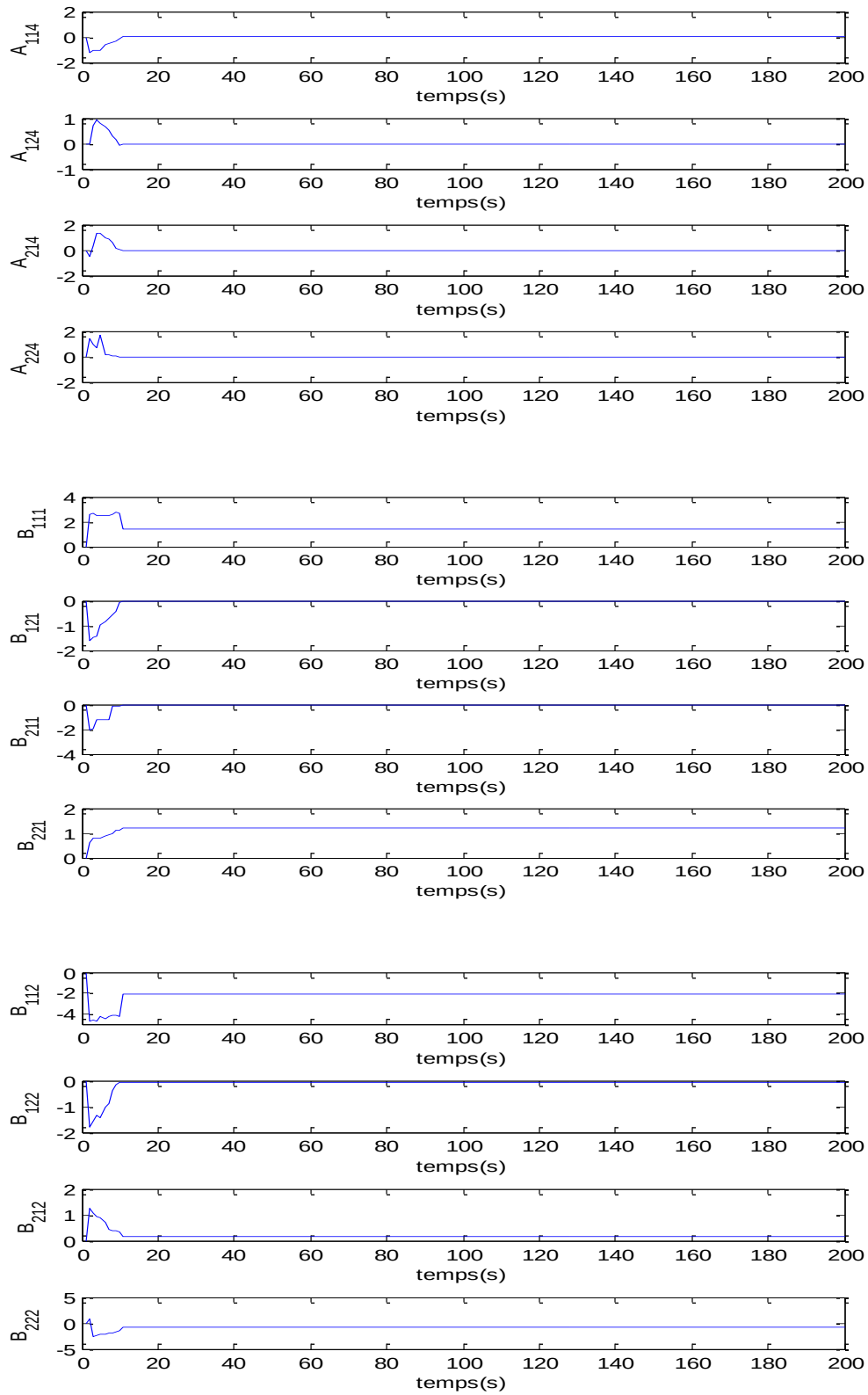
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

- R_s : La résistance des phases statoriques ;
 $[v_a \ v_b \ v_c]^T$: Les tensions des phases statoriques ;
 $[i_a \ i_b \ i_c]^T$: Les courants des phases statoriques ;
 $[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$: Les flux totaux à travers les bobines statoriques ;

▪ du rotor

$$[V_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}[\varphi_f] \quad (5.4)$$

V_f : Tension aux bornes du rotor



Ces paramètres ont une influence déterminante sur le comportement du système. Mais il n'est pas toujours facile de trouver des valeurs optimales pour ces paramètres. Ils ont été cherchés afin de satisfaire les performances souhaités

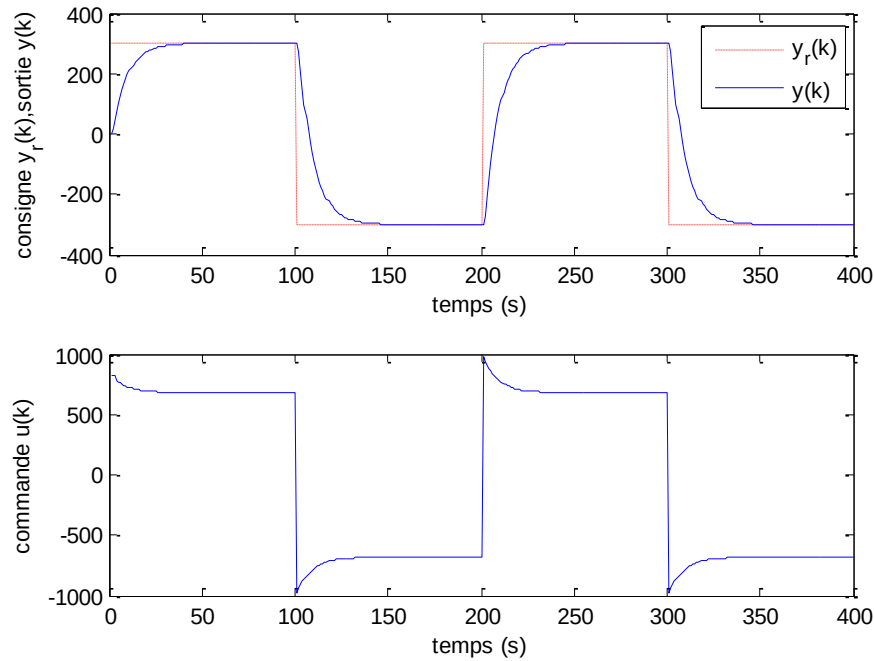


Fig. 3.3 : Sortie du MCC (vitesse angulaire en rad/s) ; commande (tension de l'induit en V) en absence de perturbation : commande LQG standard

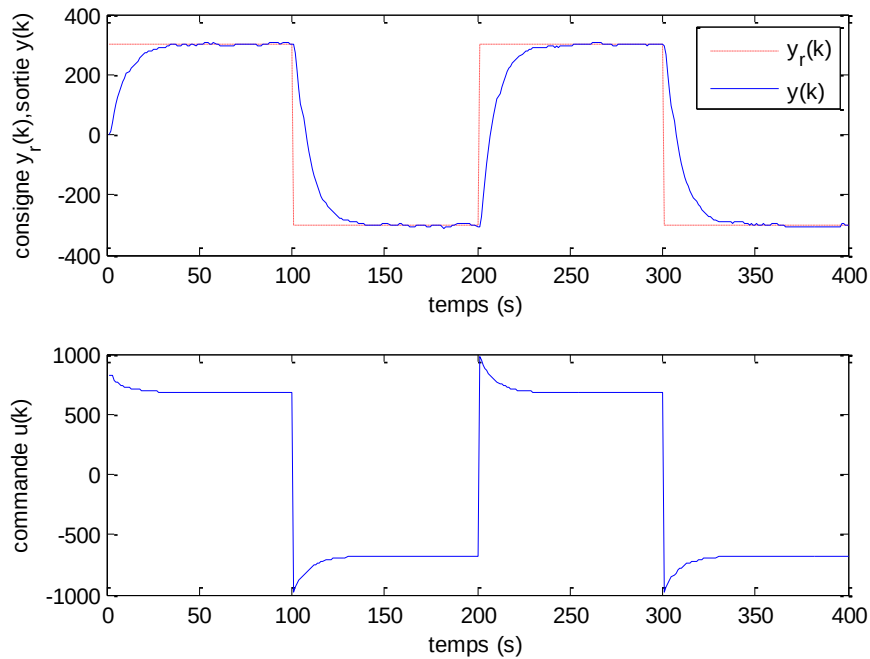


Fig. 3.4: Sortie du MCC (vitesse angulaire en rad/s) ; commande (tension de l'induit en V) en présence de perturbation : Commande LQG standard

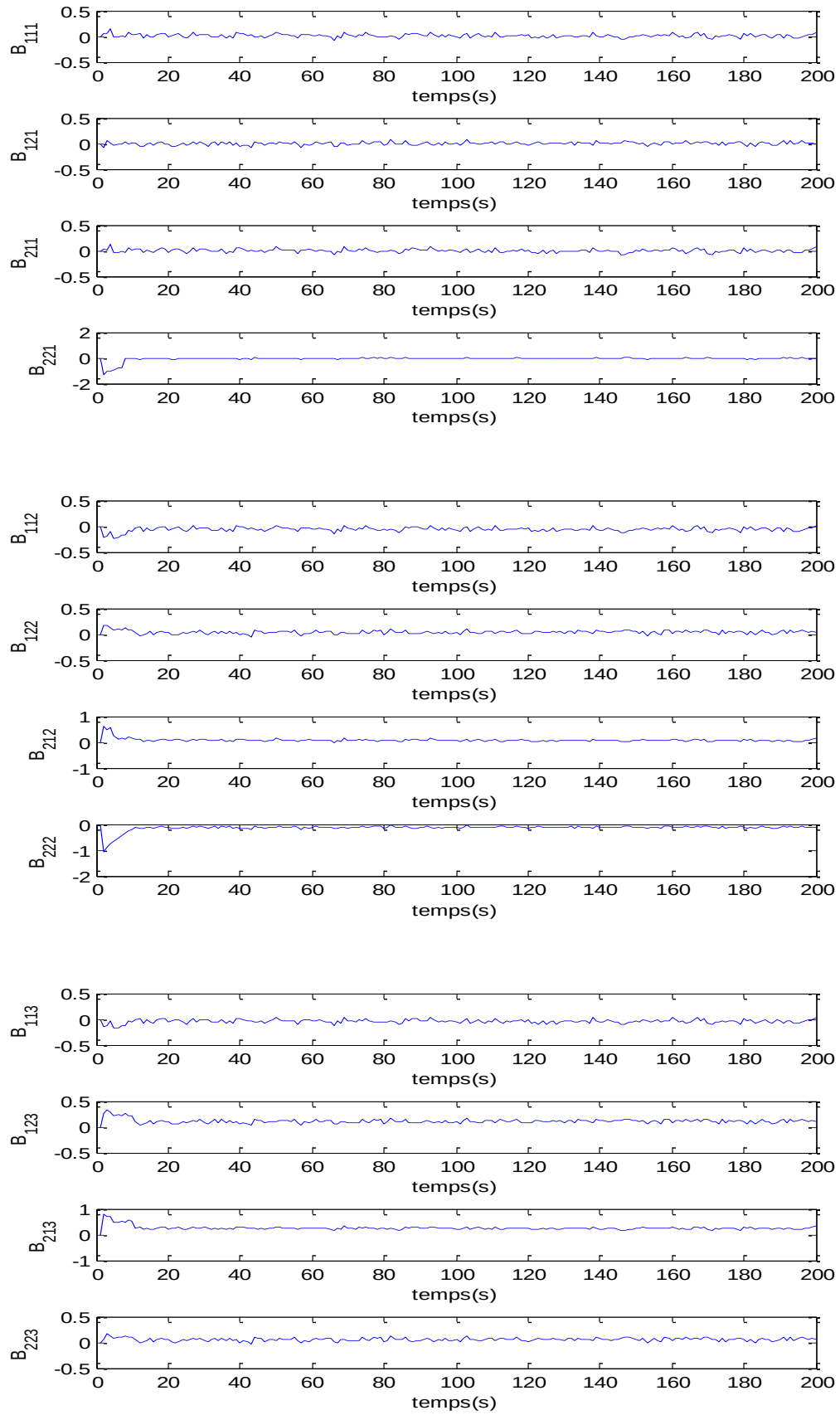


Fig.4.7 : paramètres estimés : LQG Adaptative avec perturbations

R_f : Résistance interne du rotor

I_f : Courant électrique dans le rotor

φ_f : Flux magnétique du rotor

Avec

$$[I_f] = \begin{bmatrix} I_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [R_f] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [V_f] = \begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

B.2.2 Equations magnétiques: [BEN 98]

▪ flux statorique:

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sf}][I_f] \quad (5.5)$$

φ_s : Flux statorique

L_s : Inductance statorique

I_s : Courant statorique

M_{sf} : Inductances mutuelles entre le stator et le rotor

▪ flux rotorique :

$$[\varphi_f] = [L_f][I_f] + [M_{sf}][I_s] \quad (5.6)$$

L_f : Inductance du rotor

Avec

$$[L_f] = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

La matrice $[L_s]$ est une matrice carrée et d'ordre 3, elle contient des termes constants que nous regroupons dans $[L_{s_0}]$ et les termes variables dépendent de θ , que nous regroupons dans $[L_{s_2}(\theta)]$

Posons :

$$[L_s] = [L_{s_0}] + [L_{s_2}] \quad (5.8)$$

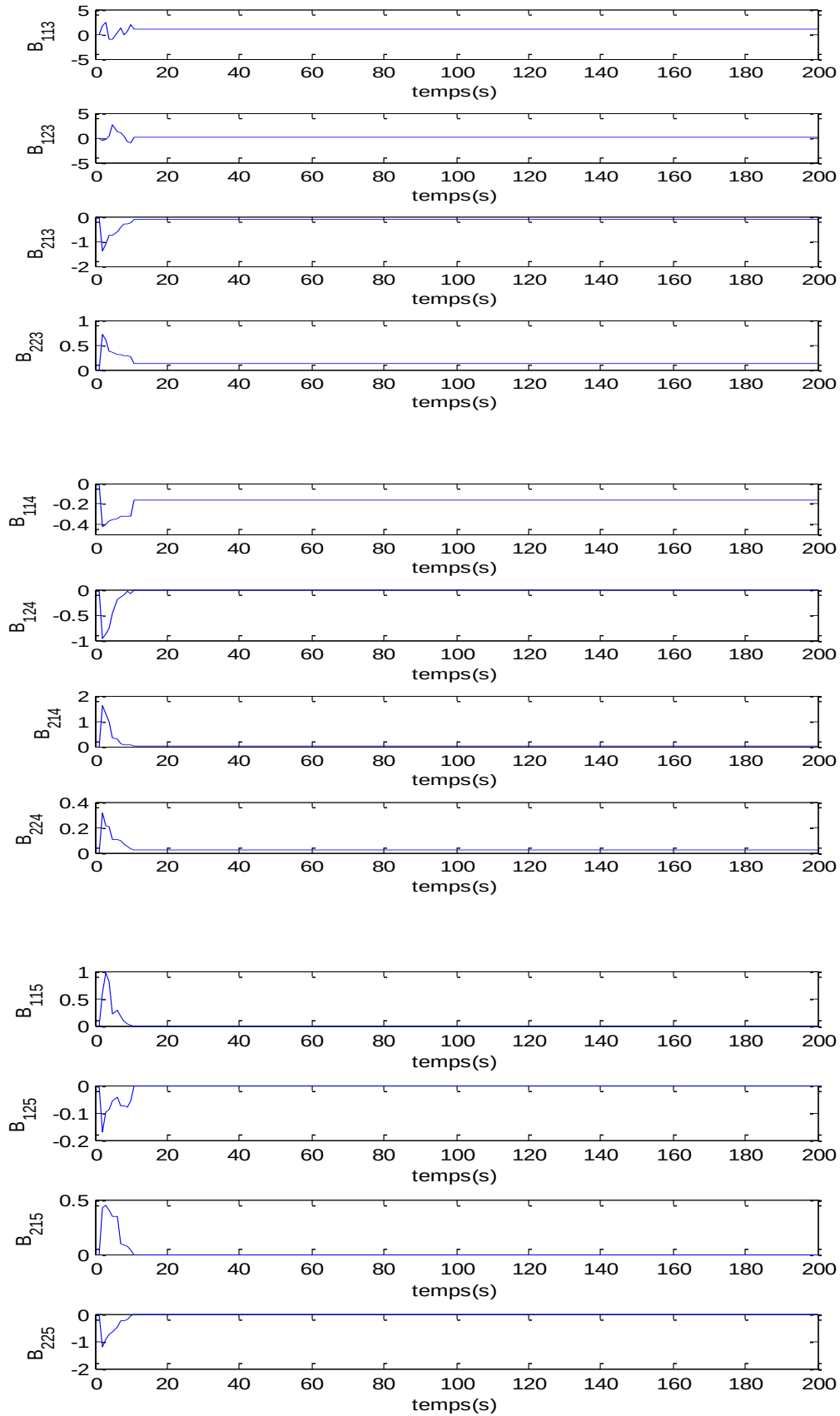


Fig. 6.5 : Paramètres estimés : LQG adaptative sans perturbations

3.4.2 Résultats de simulations de la commande LQG adaptative monovariante, avec et sans perturbations

On utilise les mêmes paramètres de synthèse qu'avec la LQG à paramètres connus ($\Lambda = 0.019$; $Q = 0.69$).

Les valeurs d'initialisation de l'algorithme d'adaptation sont :

$$\hat{A}_0 = 1 + 0.001q^{-1} + 0.001q^{-2}$$

$$\hat{B}_0 = 0.001 + 0.001q^{-1}$$

Le gain d'adaptation initial est de $P(0) = 10^6$

Facteur d'oubli égal à 1

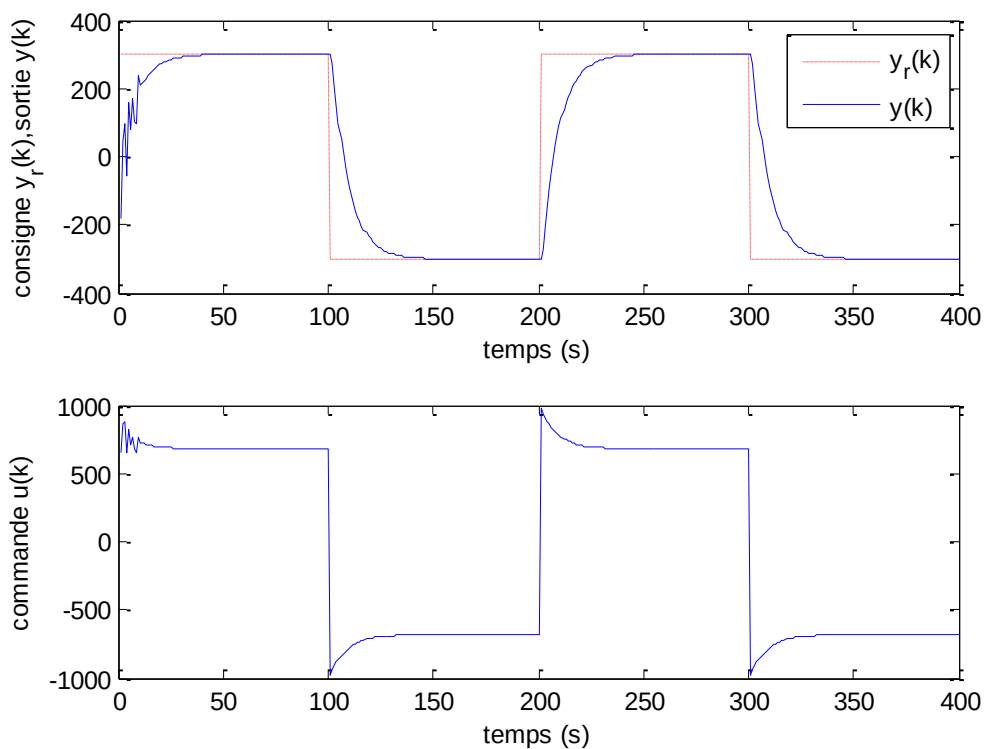


Fig. 3.5 : Sortie du MCC (vitesse angulaire en rad/s) ; commande (tension de l'induit en V) en absence de perturbation : Commande LQG adaptative

4.4.3 Résultats de simulations de la commande GPC multivariable à paramètres fixes, avec et sans perturbations

Les résultats de simulation obtenus avec les paramètres de réglage suivants : $Q = 5 I_{2 \times 2}$; $R = I_{2 \times 2}$; $N_i = d$; $N_p = 10$; $N_u = 5$

Ces paramètres ont été choisis afin de satisfaire les performances souhaitées

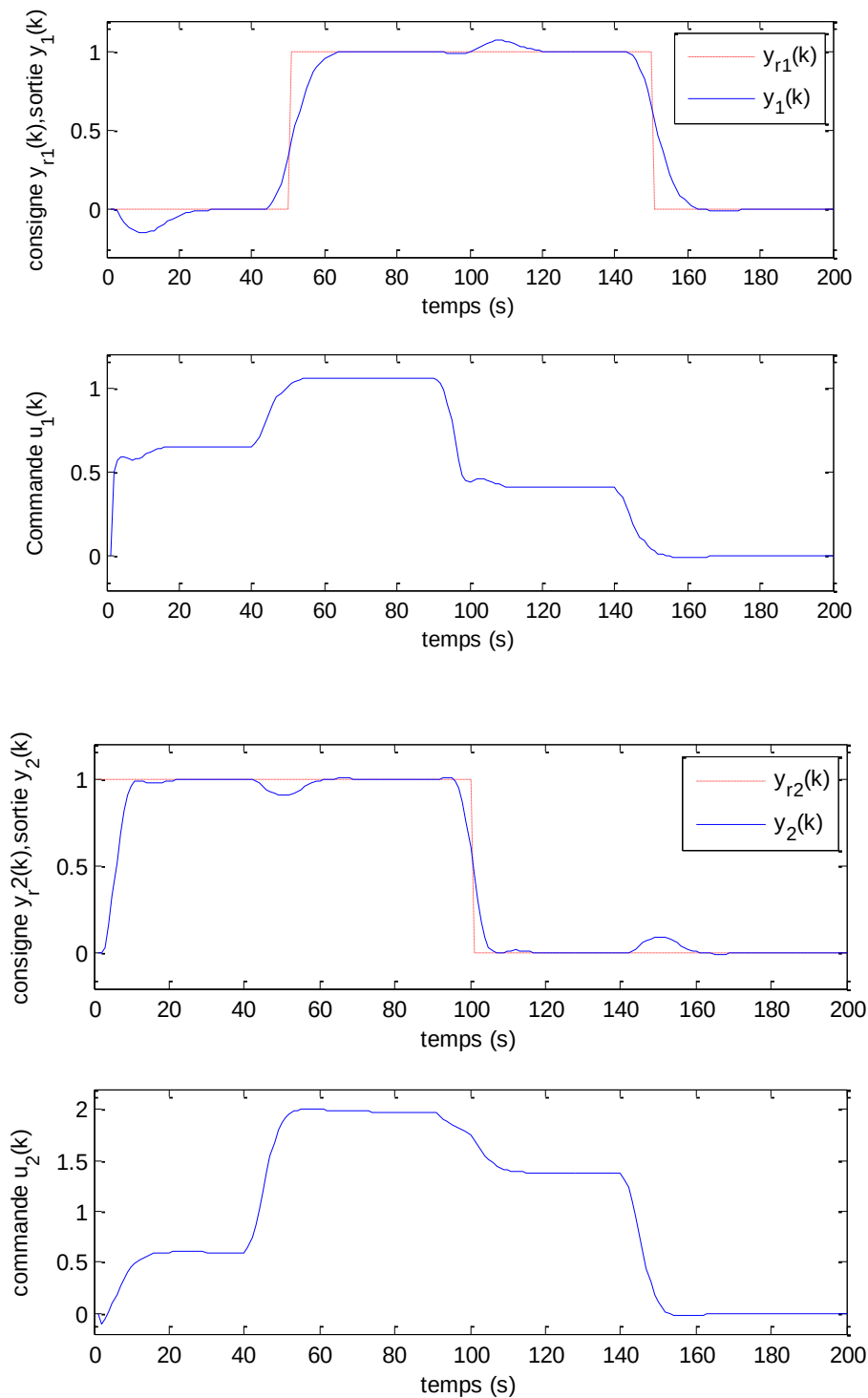


Fig.4.8 : Performances en poursuite du GPC

Avec

$$[L_{s_0}] = \begin{bmatrix} L_{s_0} & M_{s_0} & M_{s_0} \\ M_{s_0} & L_{s_0} & M_{s_0} \\ M_{s_0} & M_{s_0} & L_{s_0} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$[L_{s_2}] = L_{s_2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$[M_{sf}]$: La matrice inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

$$[M_{sf}] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \text{ et } [M_{sf}] = [M_{fs}]^T \quad (5.11)$$

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} ([L_s][I_s] + [M_{sf}][I_f]) \quad (5.12)$$

$$[V_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt} ([L_f][I_f] + [M_{sf}][I_s]) \quad (5.13)$$

B.2.3 Equation mécanique

La dernière relation importante complétant le modèle du MSAP, est l'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine :

$$\sum_i C_i = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (5.14)$$

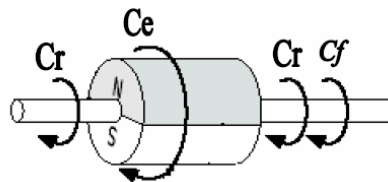


Fig. 5.10 : les Différents couples qui agissent sur le rotor

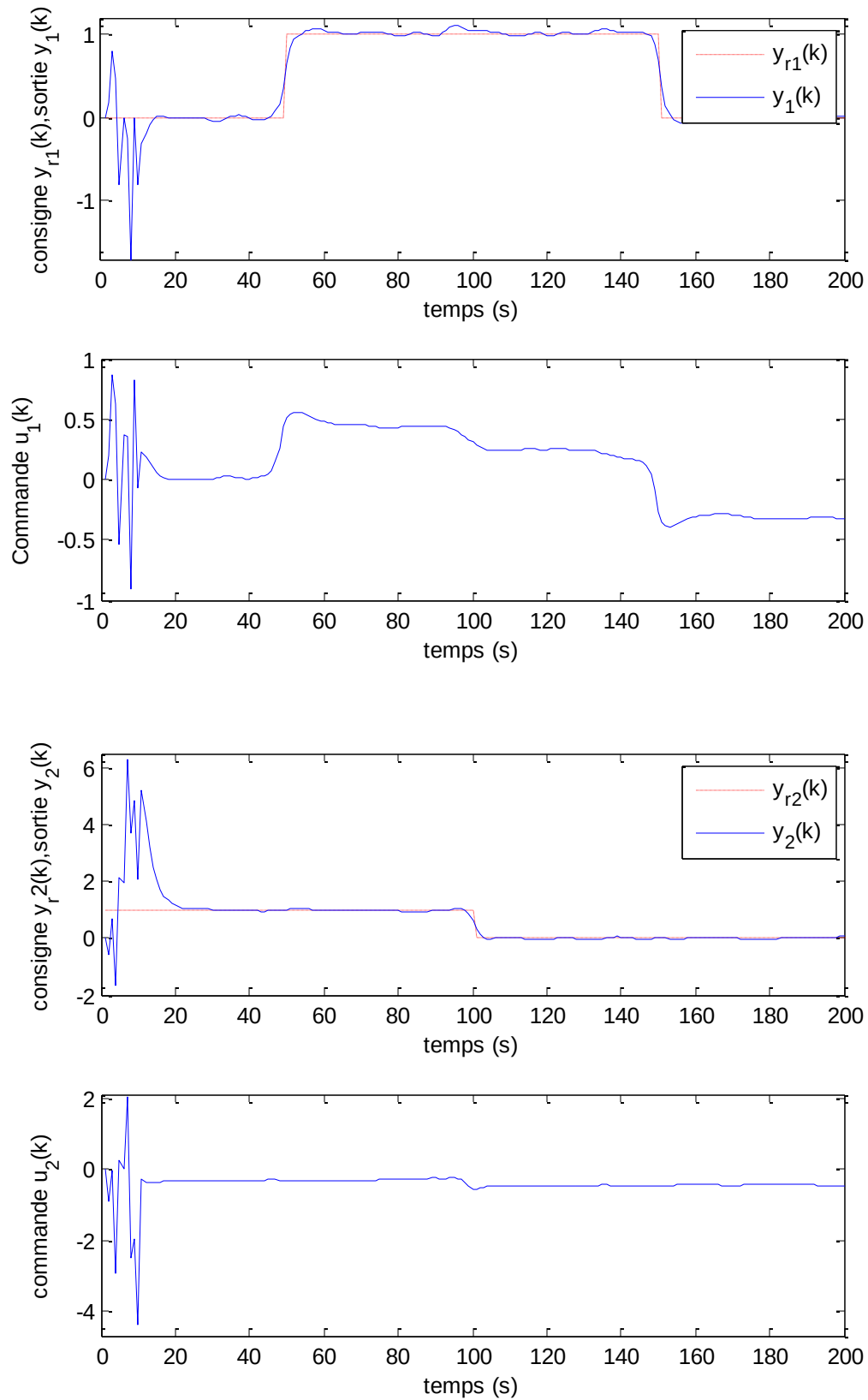


Fig. 6.6: la variation des sorties (P_t, V_t) et des commandes (U_e, U_g) avec la LQG adaptative, en présence de perturbations

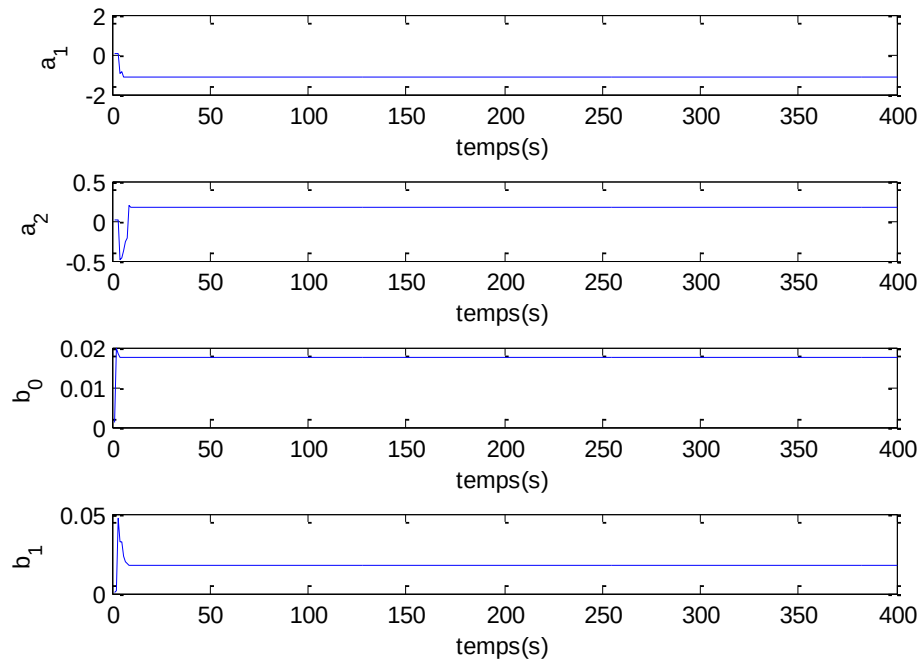


Fig. 3.6 : paramètres estimés en absence de perturbations : commande LQG adaptative

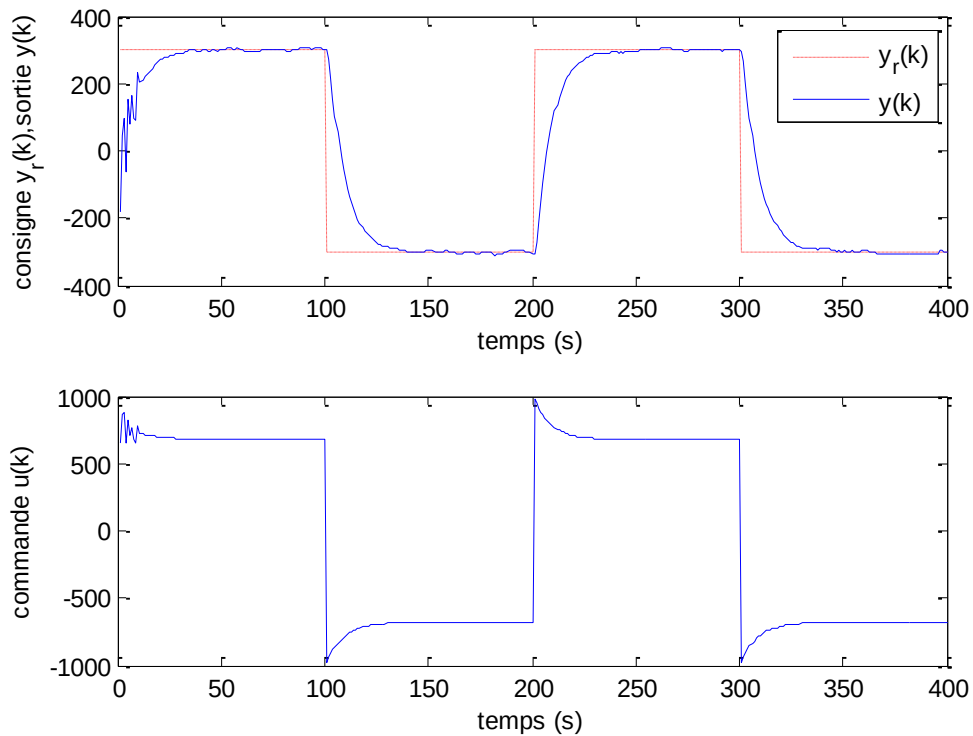


Fig. 3.7: Sortie du MCC (vitesse angulaire en rad/s) ; commande (tension de l'induit en V) en présence de perturbation : Commande LQG adaptative

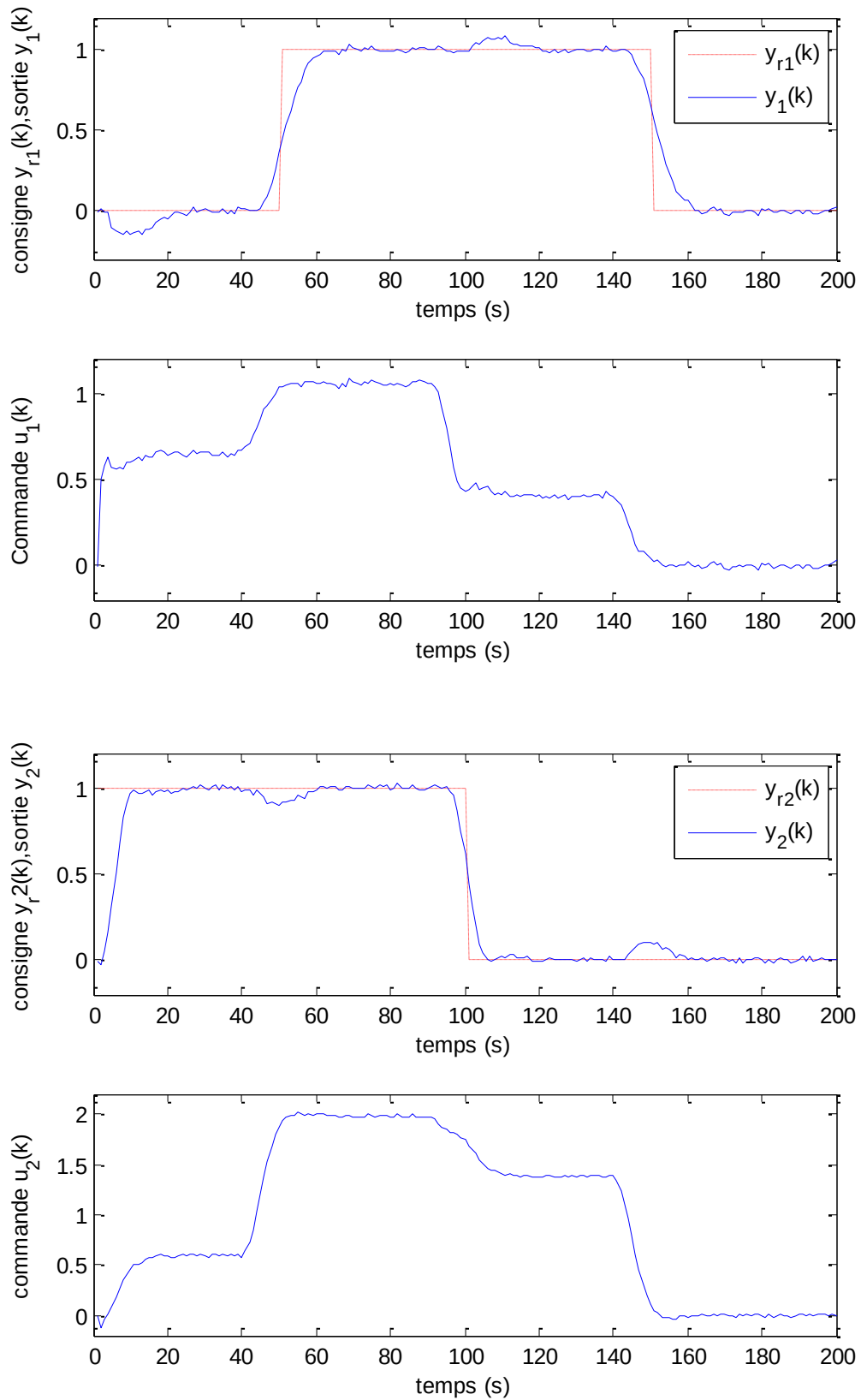


Fig.4.9 : performances en rejet de perturbations du GPC

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (5.15)$$

J : Le moment d'inertie du moteur

f : Le coefficient de frottement

C_e : Le couple électromagnétique délivré par le moteur

C_r : Le couple résistant, ou de charge

C_f : Le couple de frottement

Ω : Vitesse de rotation mécanique du rotor.

B.3 Transformation triphasé – diphasé [ABD 97] [KIY 04]

B.3.1 Principe de la transformation de Park

La transformation de Park est définie par la matrice P , aux vecteurs originaux $[V_{abc}]$, $[i_{abc}]$ et $[\varphi_{abc}]$. Elle correspond aux vecteurs $[V_{dqo}]$, $[i_{dqo}]$ et $[\varphi_{dqo}]$.

$[V_{dqo}]$: sont les composantes direct, en quadrature et homopolaire de la tension.

$[i_{dqo}]$: sont les composantes direct, en quadrature et homopolaire du courant.

$[\varphi_{dqo}]$: sont les composantes direct, en quadrature et homopolaire du flux.

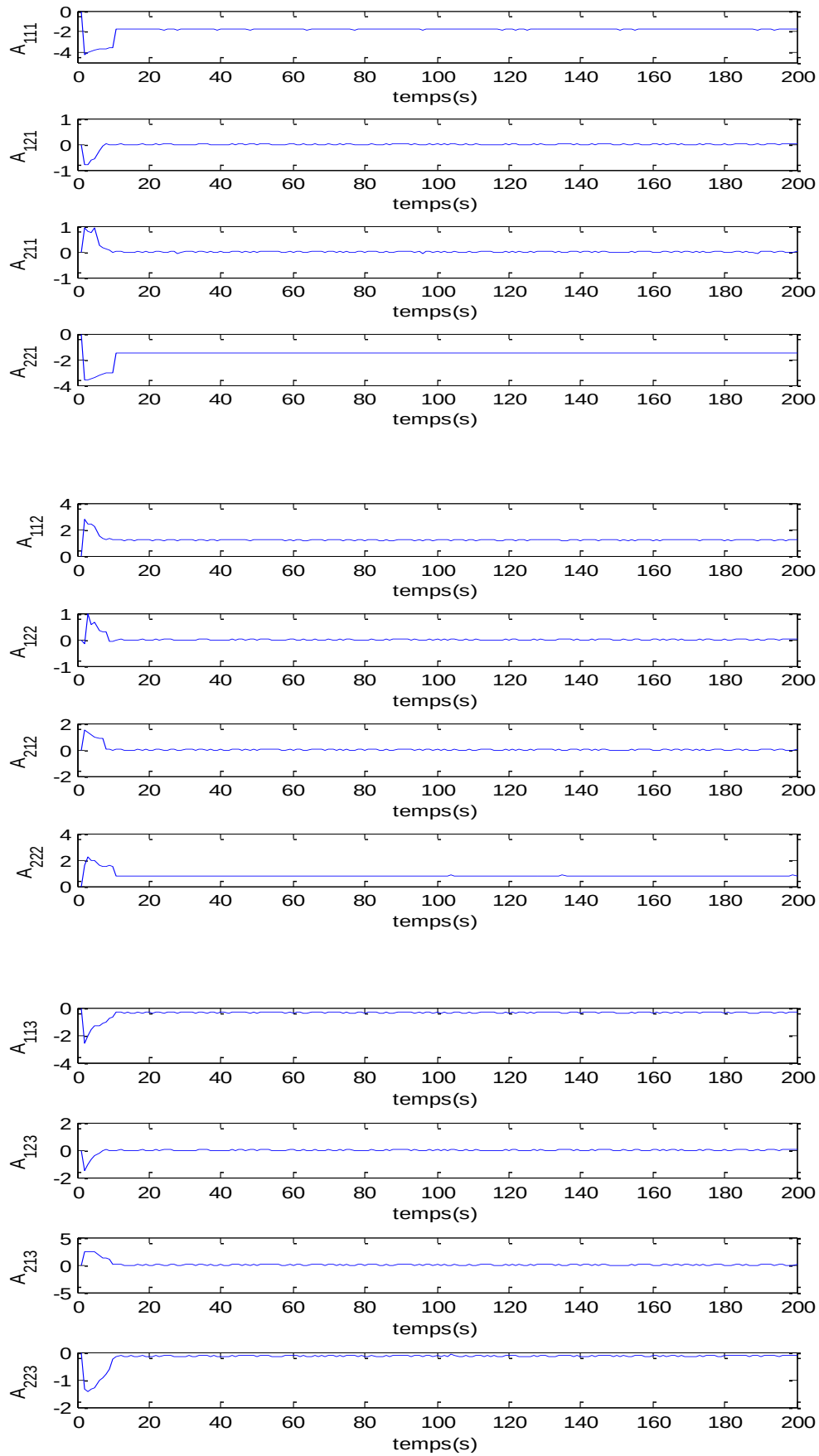
$$[V_{abc}] = [P][V_{dqo}] \quad (5.16)$$

$$[V_{dqo}] = [P]^{-1}[V_{abc}] \quad (5.17)$$

Où $[P]$ et $[P]^{-1}$ sont la matrice de passage directe et inverse, elles sont données par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$



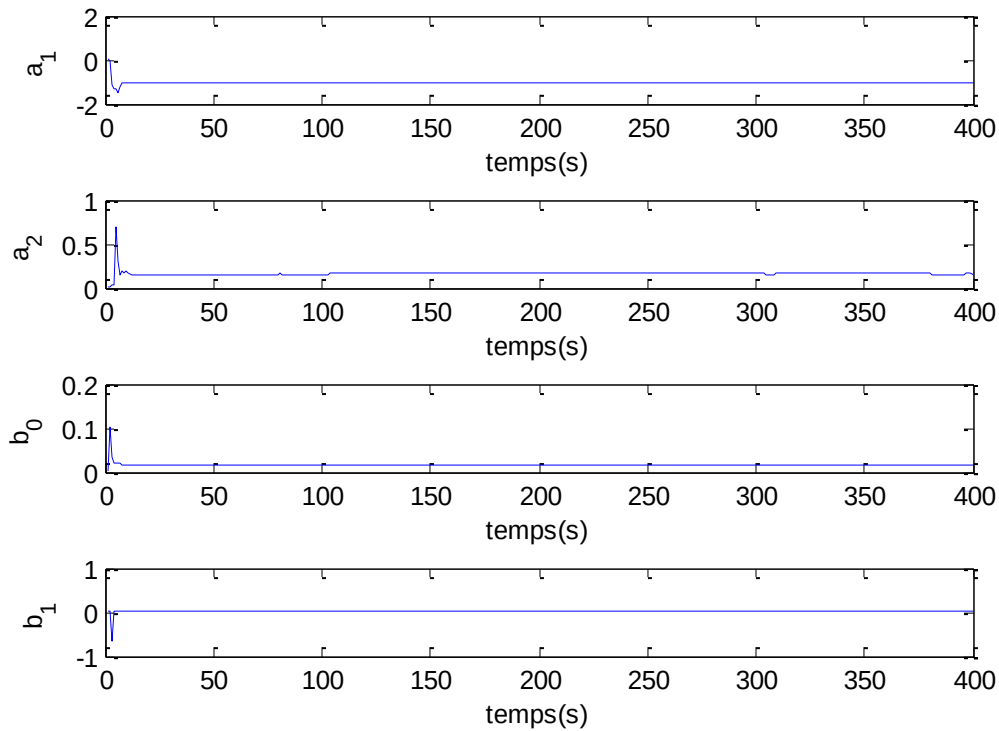


Fig. 3.8: paramètres estimés en présence de perturbations : commande LQG adaptative

3.4.3 Résultats de simulations de la commande GPC monovariante à paramètres fixes, avec et sans perturbations

Les résultats de simulation obtenus avec les paramètres de réglage suivants :

$$N_i = d ; N_p = 15 ; N_u = 2 ; \lambda = 0.98 ; \quad (3.85)$$

Ces paramètres ont été choisis afin de satisfaire les performances souhaitées

3.4.4 Résultats de simulations de la commande GPC adaptative multivariable, avec et sans perturbations

On utilise les mêmes paramètres de synthèse ($Q = 5 I_{2 \times 2}$; $R = I_{2 \times 2}$; $N_i = d$; $N_p = 10$; $N_u = 5$) qu'avec la GPC à paramètres fixes et les mêmes valeurs d'initialisation de l'algorithme d'adaptation qu'avec la LQG

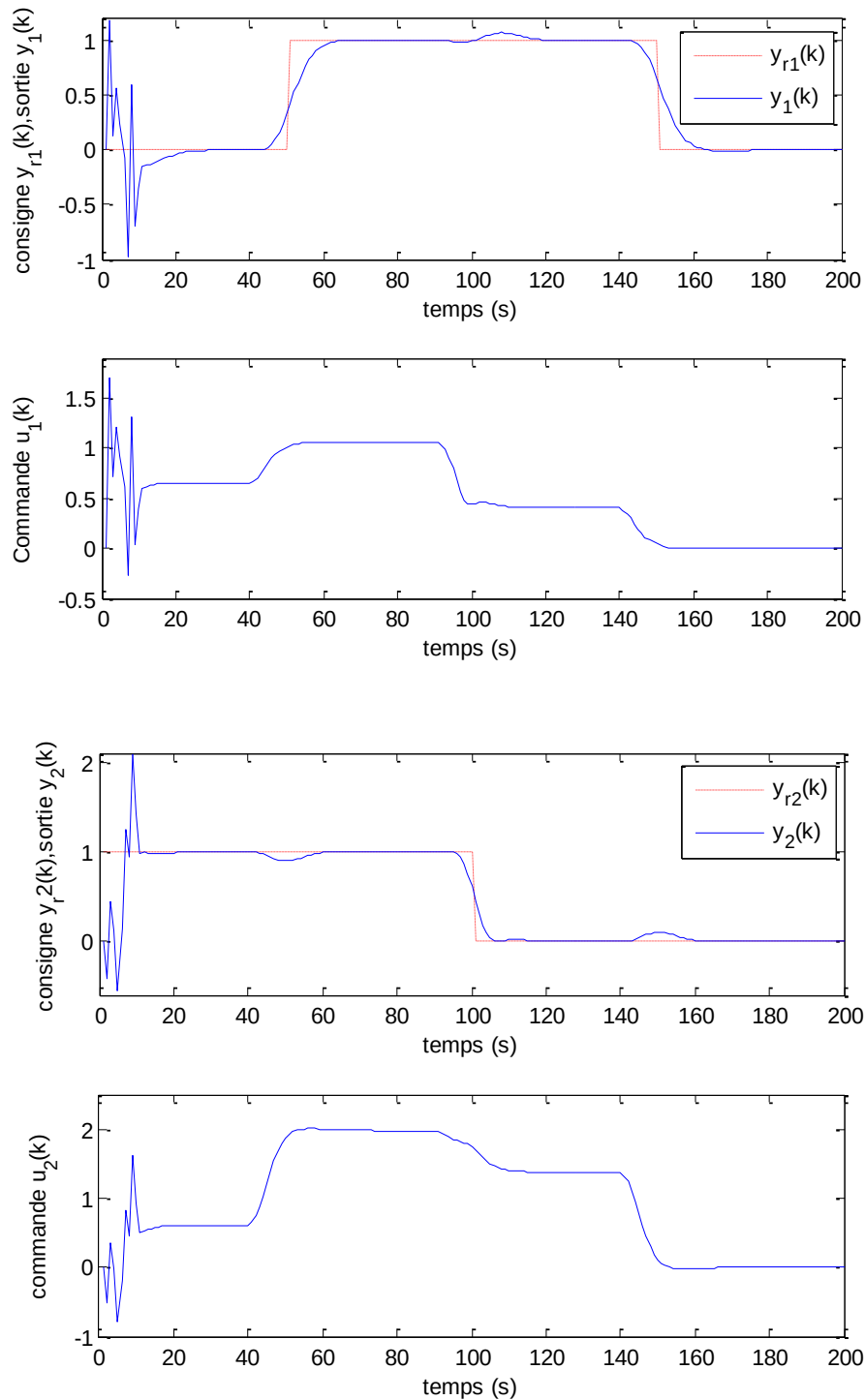


Fig.4.10 : Performances en poursuite du GPC adaptative

B.3.2 Transformation de (α, β) au $d - q$ et inversement

Les coordonnées dirigent vers l'arrière la commande vectorielle est exécutée entièrement dans le système de coordonnées de $(d - q)$ pour rendre la commande des moteurs synchrones, élégante et facile. Naturellement, ceci exige la transformation dans les deux directions et l'action de commande doit être transformée de nouveau au côté de moteur.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

La transformation inverse $d - q$ au (α, β) est:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

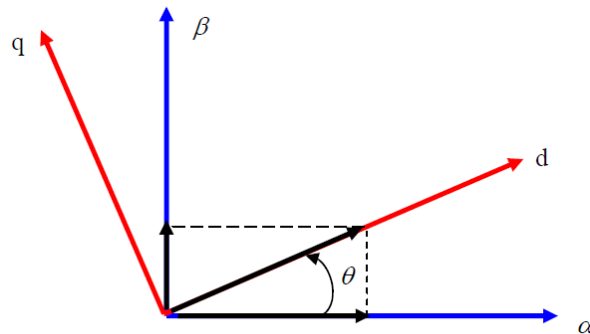
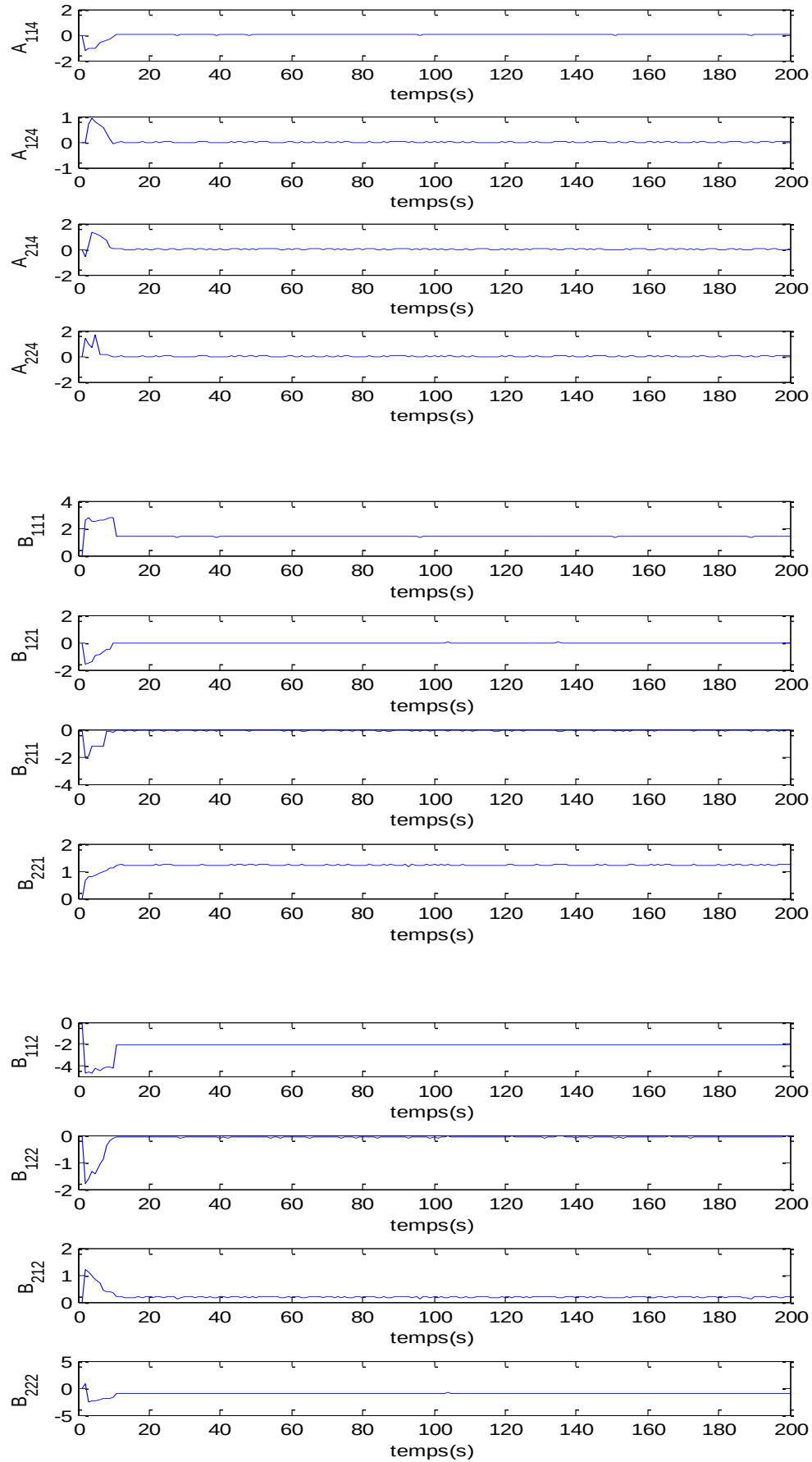


Fig. 5.11 : Le système de coordonnées de $d - q$

B.3.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents dans le plan de Park [BOU 05]

En appliquant la transformation de Park au système d'équations, on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor.



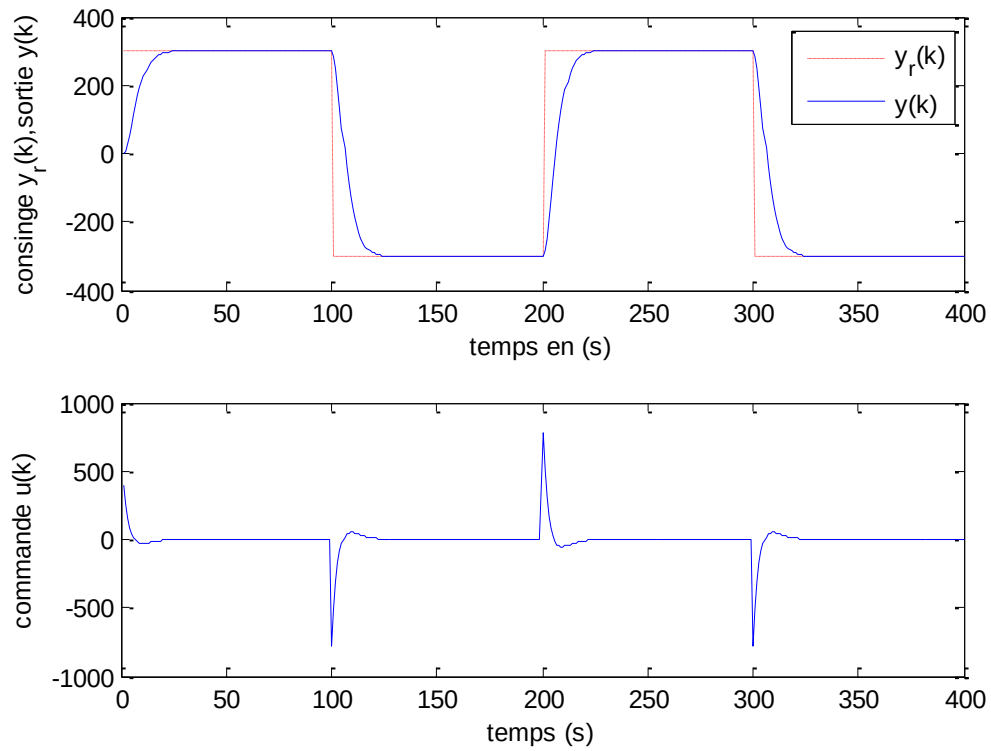


Fig. 3.9 : Sortie du MCC (vitesse angulaire en rad/s) ; commande (tension de l'induit en V)
en absence de perturbation : Commande GPC standard

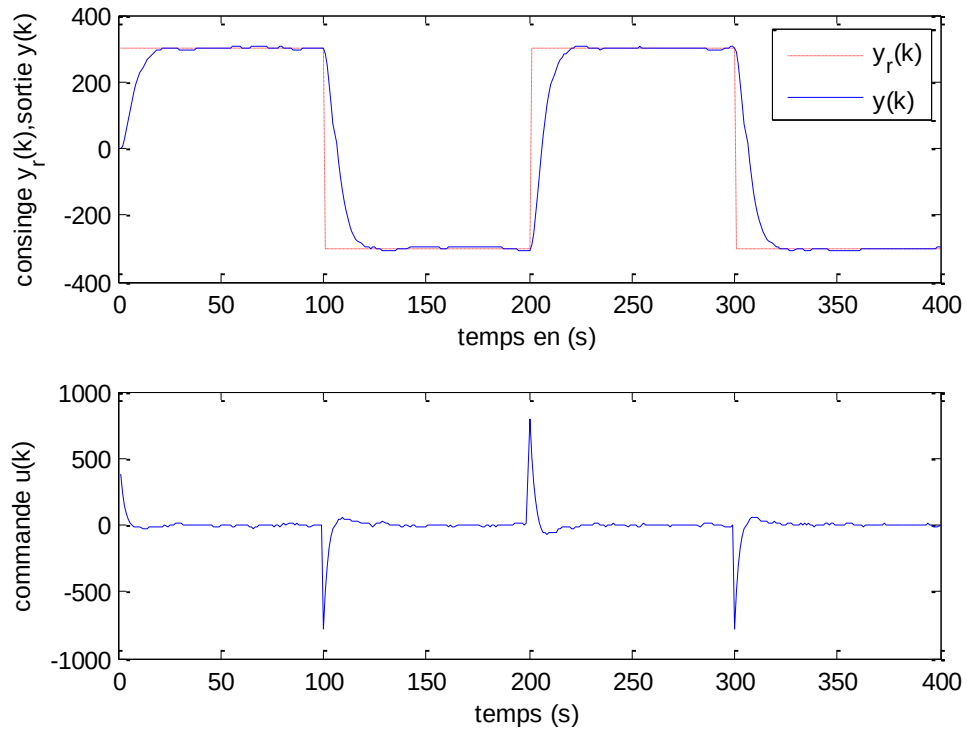
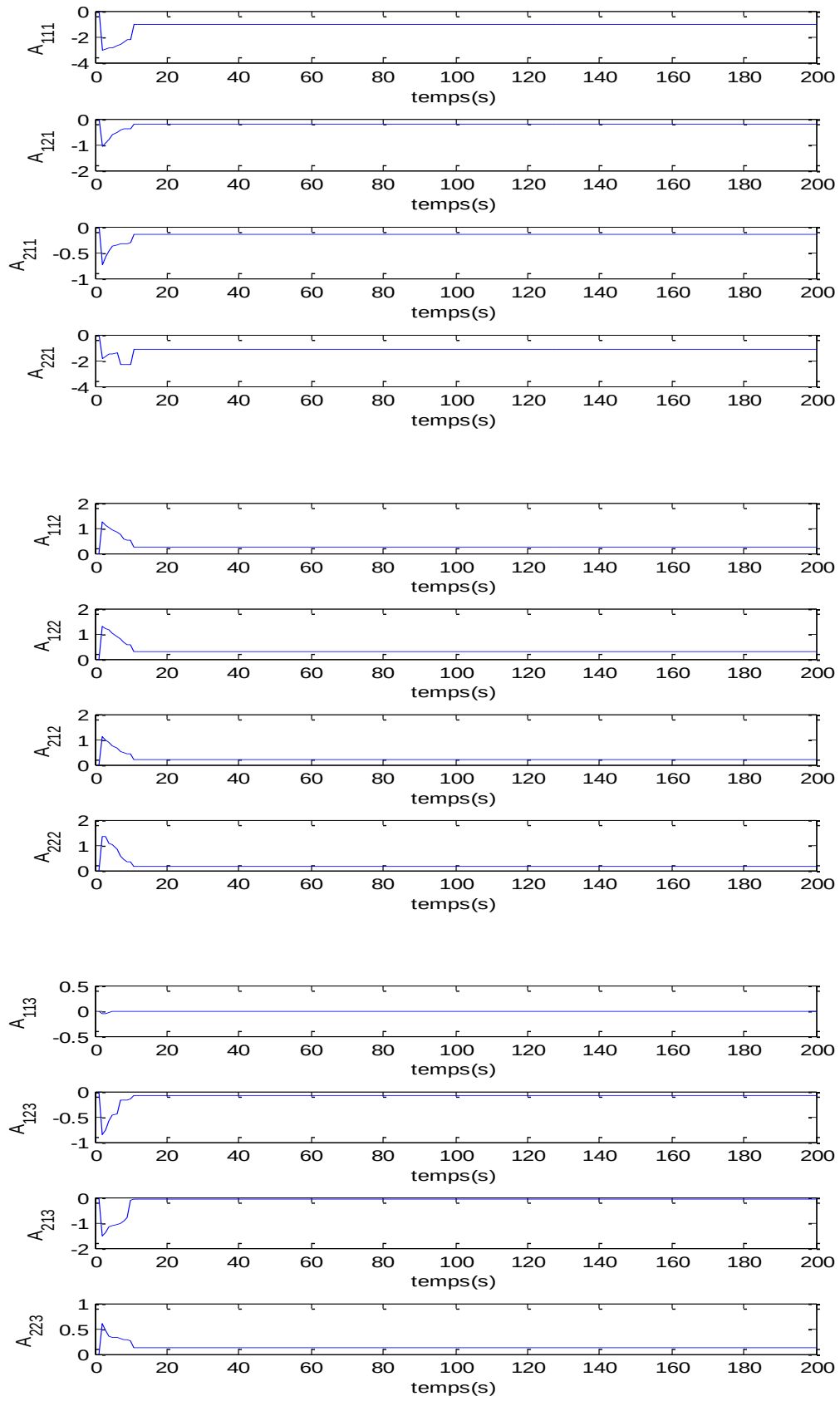


Fig. 3.10 : Sortie du MCC (vitesse angulaire en rad/s) ; commande (tension de l'induit en V)
en présence de perturbation : Commande GPC standard



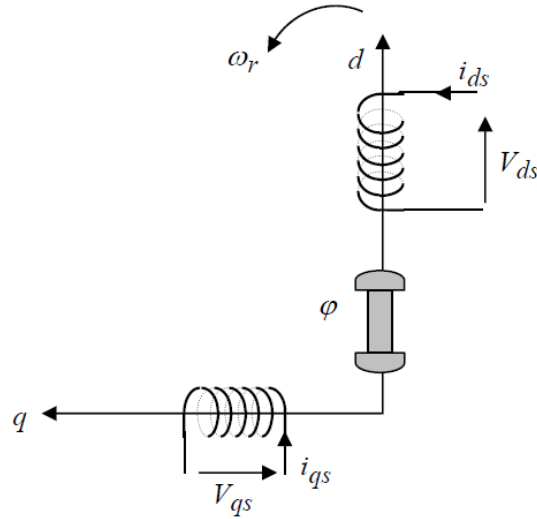


Fig. 5.12 : Schéma équivalent d'un MSAP dans le repère (d, q)

Après développement des équations, on obtient les équations suivantes :

▪ **Equations électriques :** [LAS 04] [BAB 01]

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_r \varphi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega_r \varphi_d \end{cases} \quad (5.22)$$

V_d, V_q : Tension statorique sur l'axe d et l'axe q

I_d, I_q : Courants statorique sur l'axe d et l'axe q

φ_d, φ_q : Flux statorique sur l'axe d et l'axe q

ω_r : Vitesse rotorique.

▪ **Equations magnétiques :**

Les flux peuvent être formulés par les équations suivantes :

Sur l'axe d :

$$\varphi_d = L_d I_d + \varphi_f \quad (5.23)$$

Sur l'axe q :

$$\varphi_q = L_q I_q \quad (5.24)$$

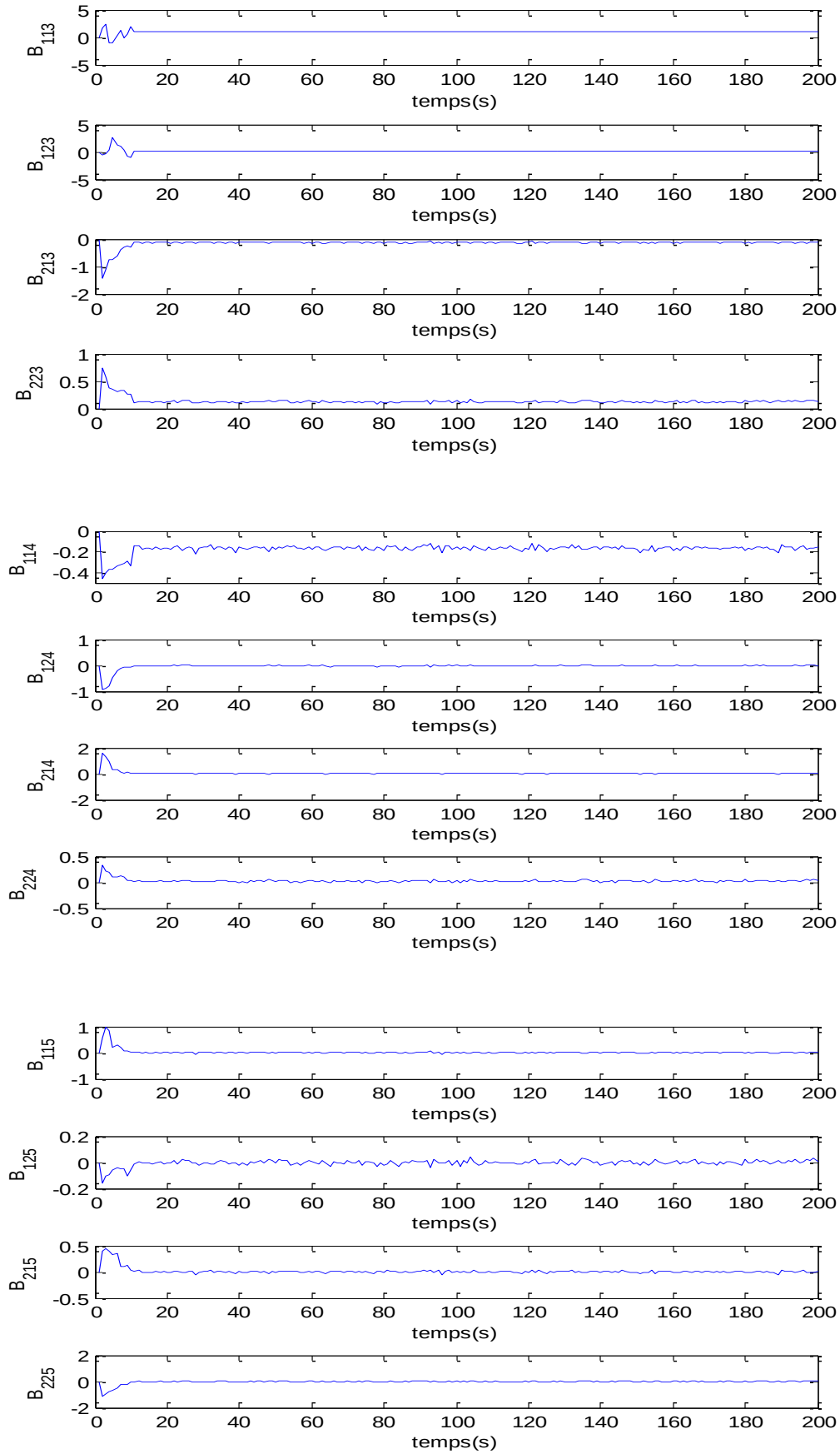


Fig. 6.7 : Paramètres estimés : LQG adaptative en présence de perturbations

3.4.4 Résultats de simulations de la commande GPC adaptative monovariante, avec et sans perturbations

On utilise les mêmes paramètres de synthèse ($N_i = d$; $N_p = 15$; $N_u = 2$; $\lambda = 0.98$) qu'avec la GPC à paramètres fixes et les mêmes valeurs d'initialisation de l'algorithme d'adaptation qu'avec la LQG

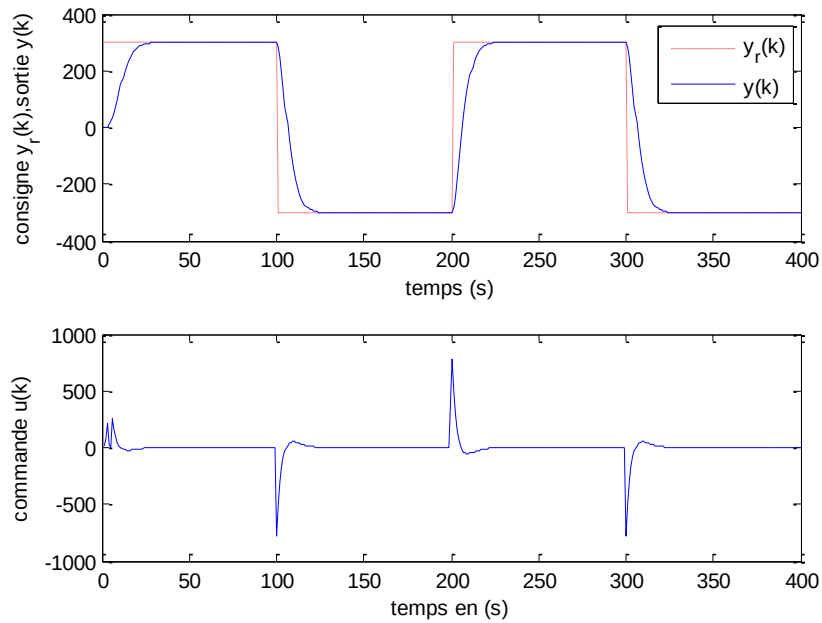


Fig. 3.11: Sortie du MCC (vitesse angulaire en rad/s) ; commande (tension de l'induit en V) en absence de perturbation : commande GPC adaptative

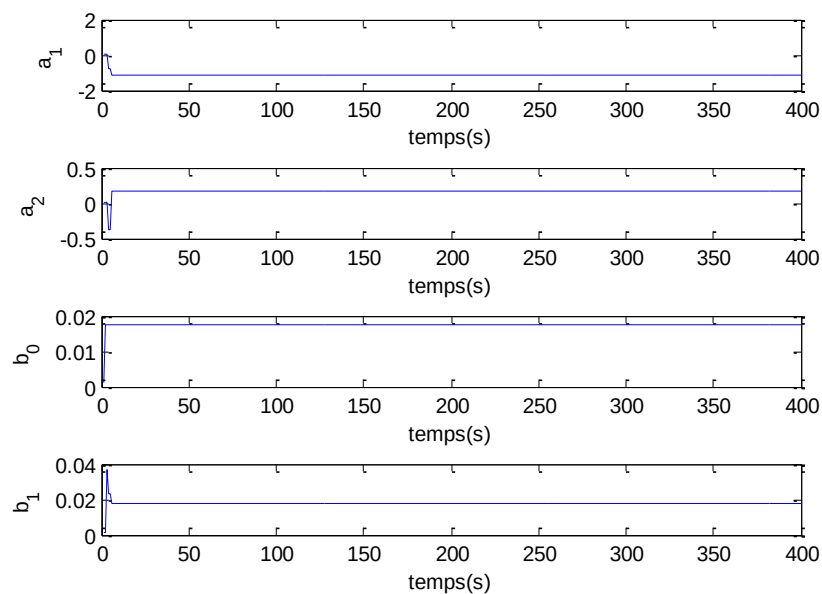


Fig. 3.12: paramètres estimés en absence de la perturbation : commande GPC adaptative

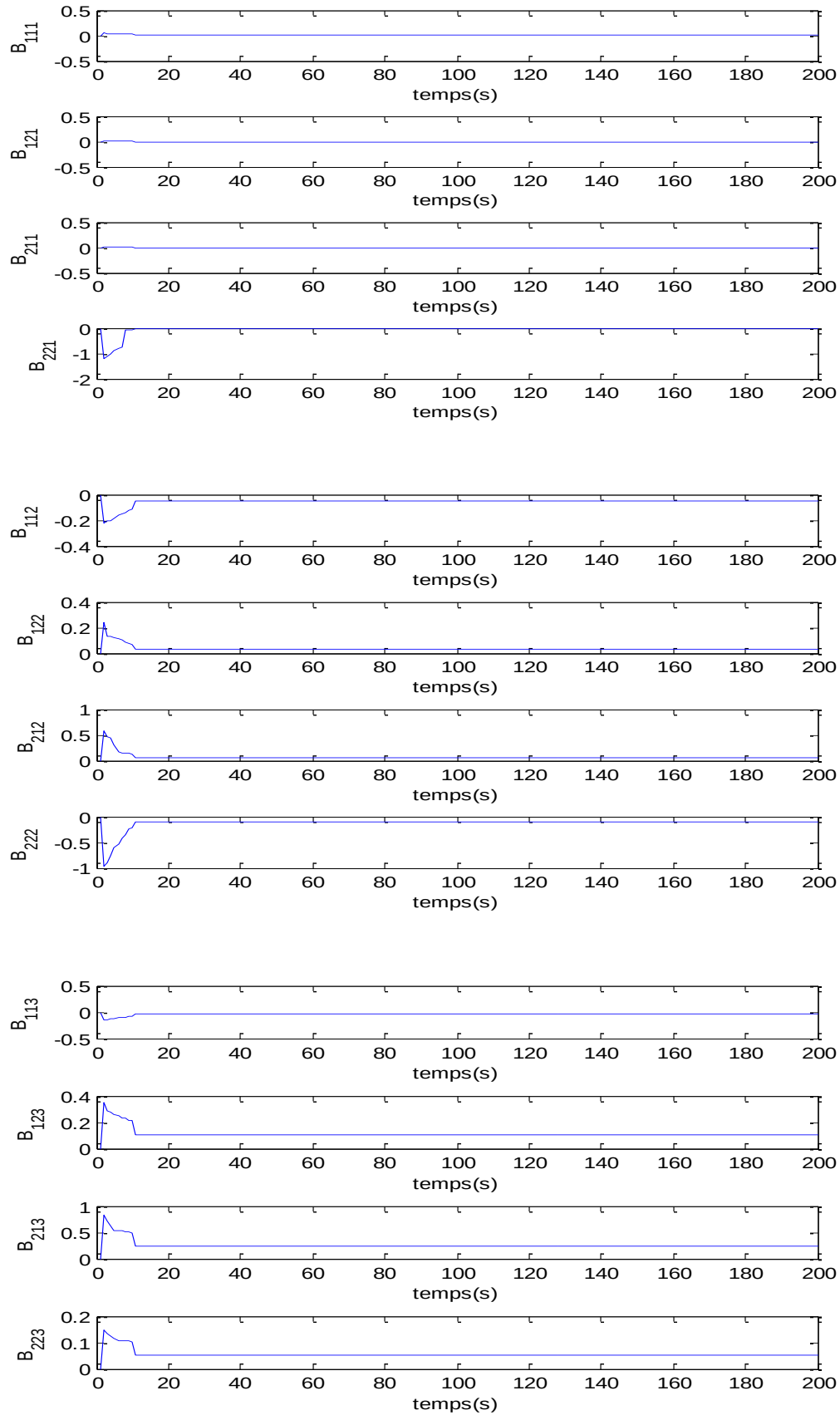


Fig.11 : Paramètres estimés : GPC adaptative sans perturbations

L_d, L_q : Inductances suivant les axes d, q successivement.

Le modèle de la MSAP peut s'écrire sous la forme suivante:

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - \omega_r L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{d}{dt} I_q + \omega_r (L_d I_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (5.25)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_d = -\frac{R_s}{L_d} I_d - \omega_r \frac{L_q}{L_d} I_q + \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{d}{dt} I_q = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \omega_r \frac{L_d}{L_q} I_d + \frac{1}{L_q} \varphi_f \omega_r + \frac{V_q}{L_q} \end{cases} \quad (5.26)$$

▪ Expressions du couple électromagnétique [ABD 97]

Le couple électromagnétique est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_e = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta_e} \quad (5.27)$$

W_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator)

P : Nombre de paires de pôles

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (5.28)$$

En remplaçant V_d, V_q par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[(R_s (I_d^2 + I_q^2)) + \left(I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d) \right] \quad (5.29)$$

- $\frac{3}{2} [(R_s (I_d^2 + I_q^2))]$: Représente la puissance dissipée en pertes Joules dans les enroulements du stator.
- $\frac{3}{2} \left[I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right]$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

6.2.4.3 Résultats de simulations de la commande GPC à paramètres fixes, avec et sans perturbations

Pour faire les simulations les valeurs paramètres de réglage suivantes sont retenues :

$$\mathbf{R} = \mathbf{I}_{2 \times 2}; \quad \mathbf{Q} = 5 \mathbf{I}_{2 \times 2}; \quad \mathbf{h}_p = 10; \quad \mathbf{h}_c = 5$$

Là aussi, on peut faire les mêmes remarques que précédemment (cf. 6.2.4.1).

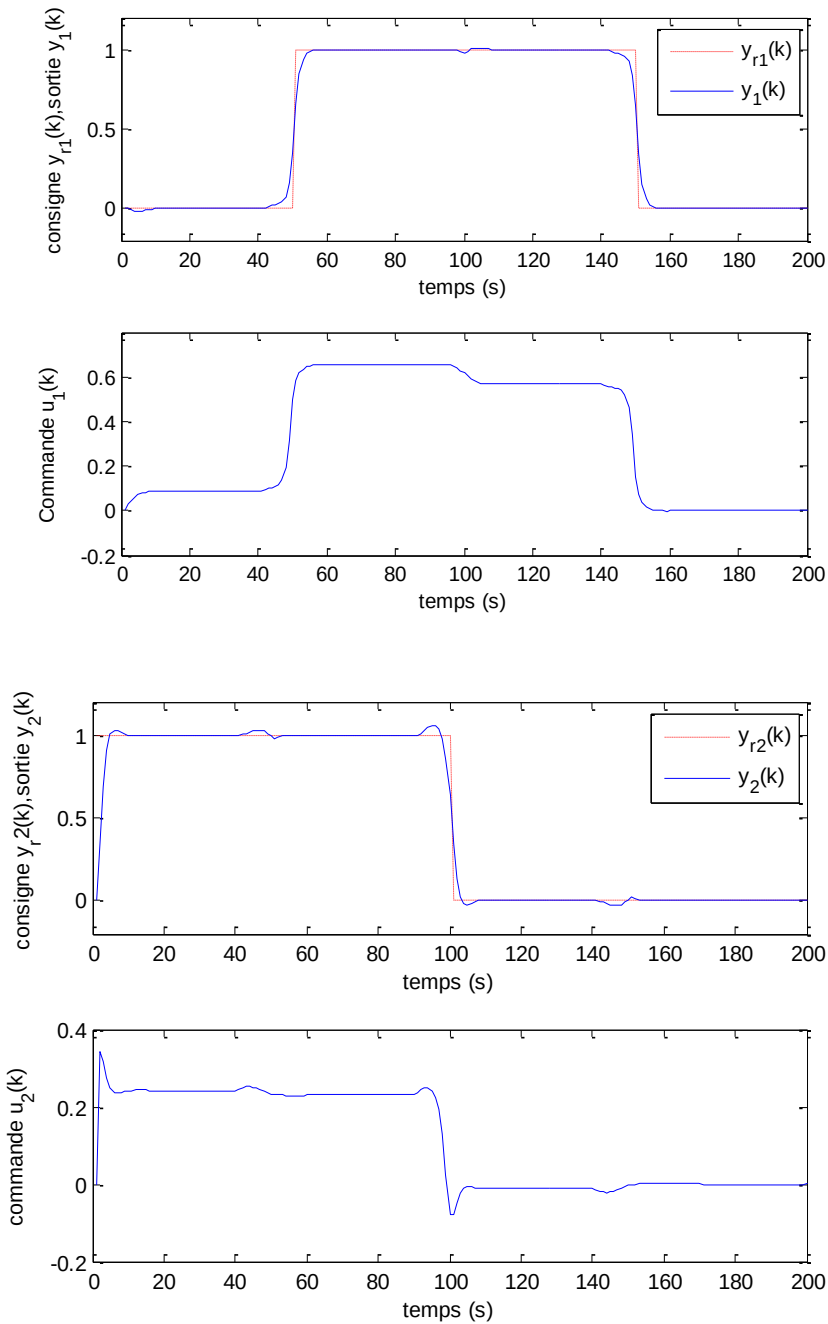


Fig. 6.8: la variation des sorties (P_t, V_t) et des commandes (U_e, U_g) avec la GPC à paramètres connus, en absence de perturbations

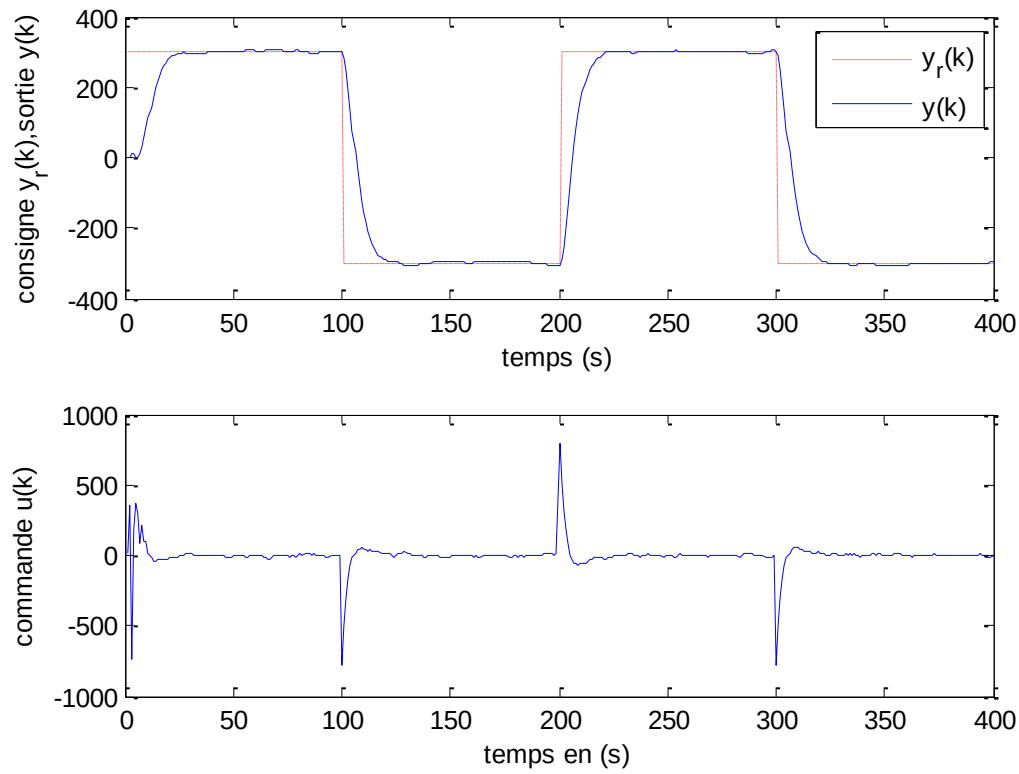


Fig. 3.13 : Sortie du MCC (vitesse angulaire en rad/s) ; commande (tension de l'induit en V) en présence de perturbation : commande GPC adaptative

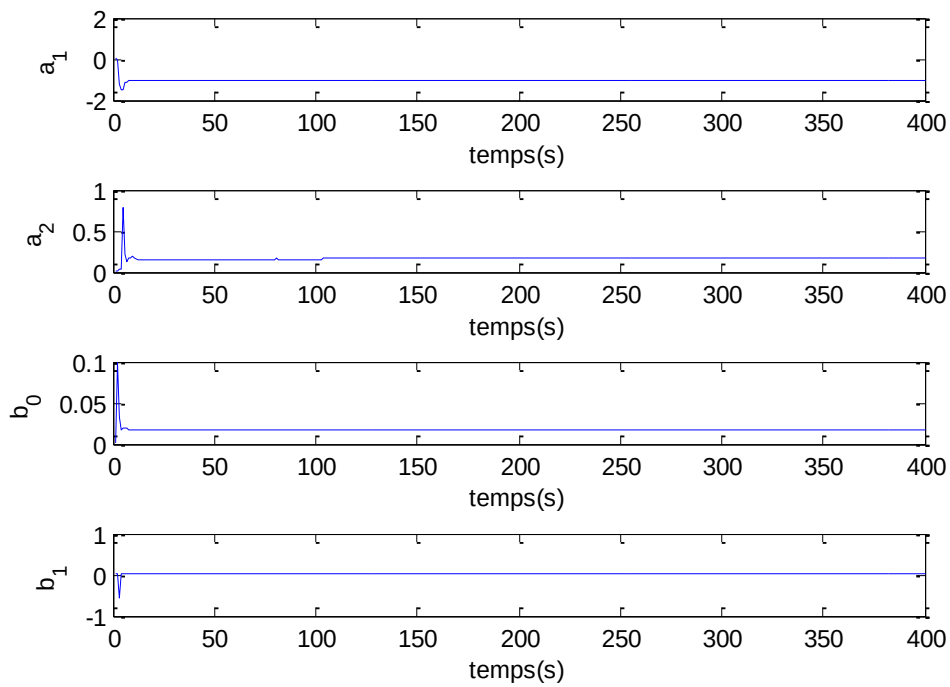


Fig. 3.14: paramètres estimés en présence de la perturbation : commande GPC adaptative

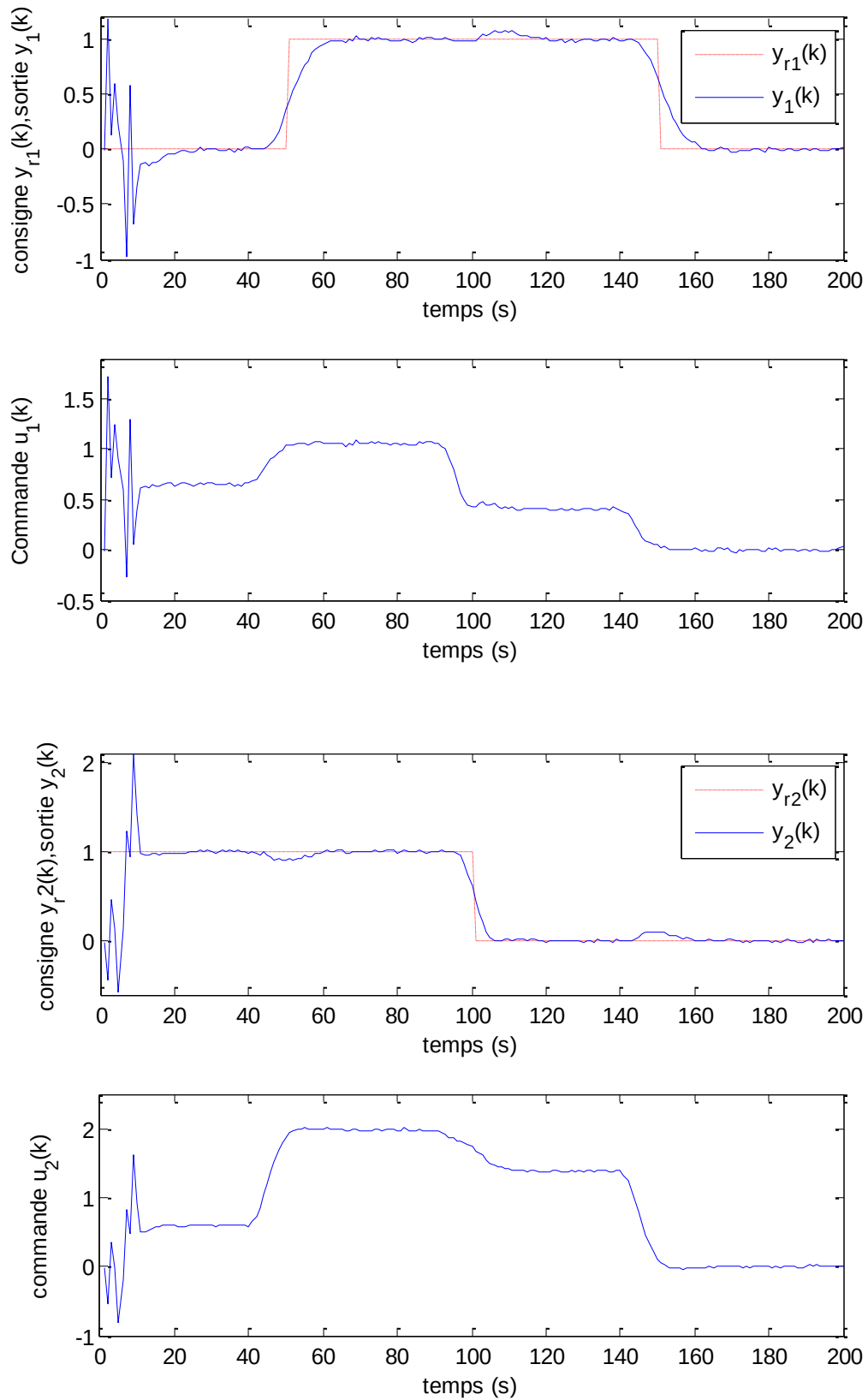


Fig.4.12 : Performances en rejet de perturbations du GPC adaptative

- $\frac{3}{2} \left[\frac{d\theta}{dt} (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d) \right]$: Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P\Omega = \omega \text{ et } P_e = C_e \quad (5.30)$$

$$C_e = \frac{3}{2} P [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] \quad (5.31)$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire : [CHI 08] [WAL 78]

$$C_e = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + I_q \varphi_f] \quad (5.32)$$

Si le rotor est lisse ($L_d = L_q$), cette équation se simplifie en :

$$C_e = \frac{3}{2} P I_q \varphi_f \quad (5.34)$$

▪ Equations mécaniques :

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (5.35)$$

La représentation fonctionnelle du modèle de Park du MSAP est illustrée sur la Figure ci-dessous [WAL 78] :

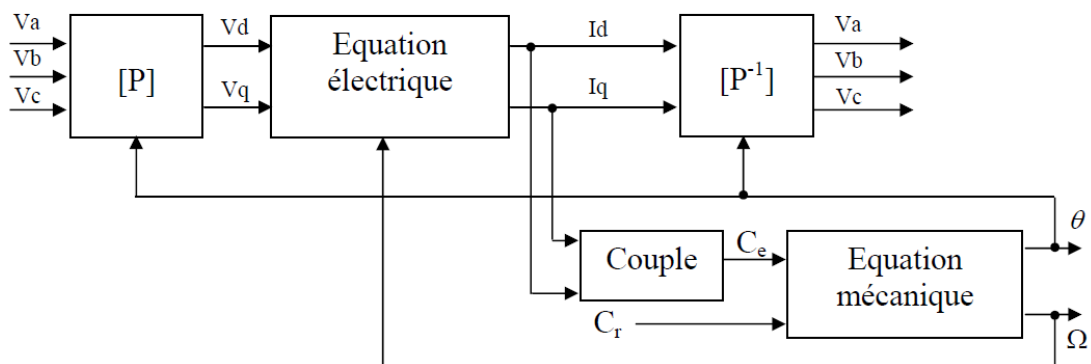


Fig. 5.13 : Schéma fonctionnel du modèle de Park

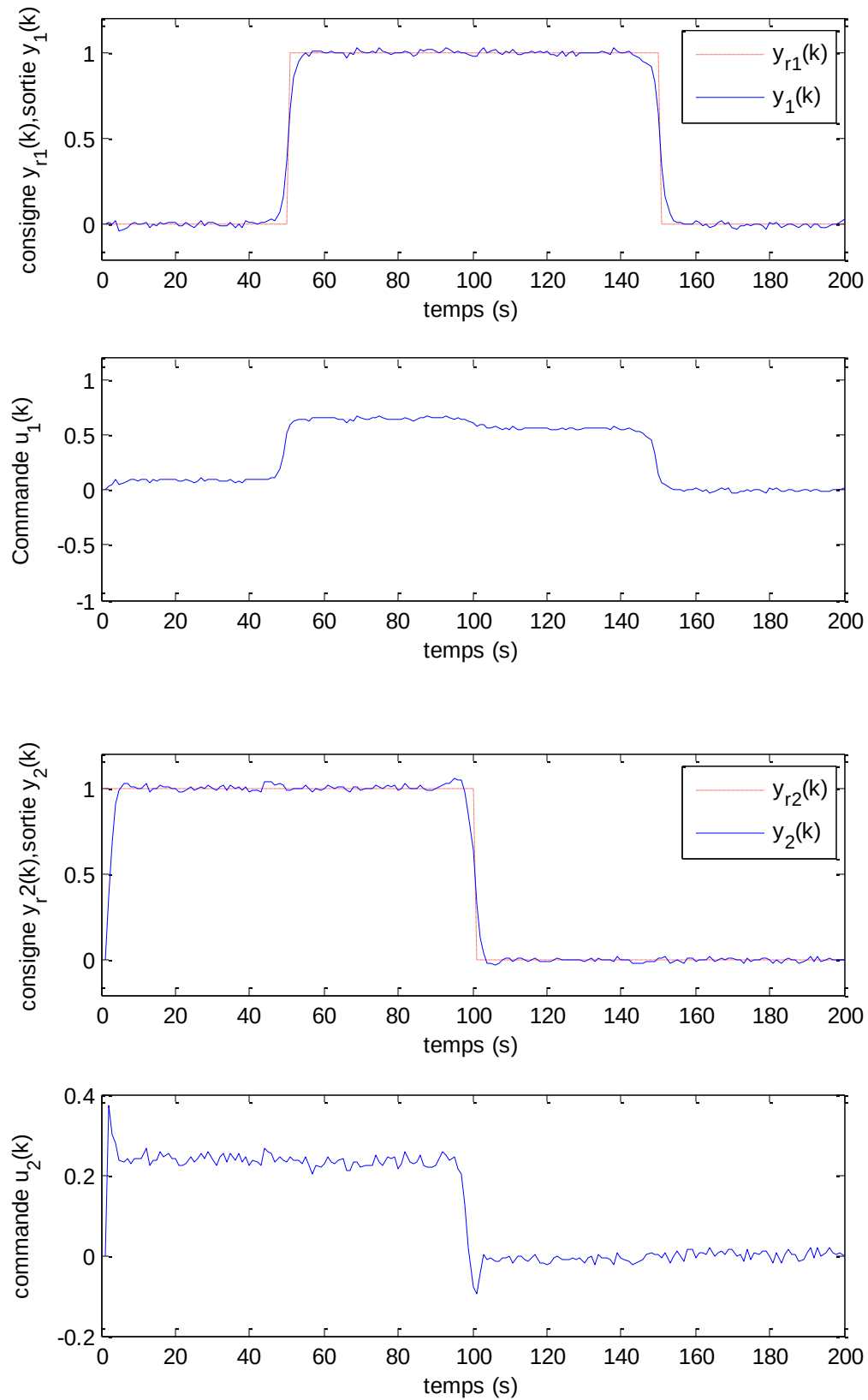


Fig. 6.9 : la variation des sorties (P_t, V_t) et des commandes (U_e, U_g) avec la GPC à paramètres connus, en présence de perturbations

3.4.5 Interprétation des résultats de simulations

Les figures (3.3) et (3.4) montrent la variation de la sortie et de la commande du moteur à courant continu, obtenue avec le correcteur LQG à paramètres fixes, respectivement en absence et en présence de perturbations. Le système répond sans dépassement. On remarque une poursuite de la vitesse angulaire du moteur à courant continu à sa consigne et l'effet de perturbations est rejeté.

Les figures (3.5) et (3.7) montrent l'évolution de la vitesse angulaire du moteur, obtenue avec le correcteur LQG adaptatif, respectivement en absence et en présence de perturbations. Au vue de cette figure on constate l'adaptation est rapide et donne des résultats identiques à ceux obtenus avec la commande LQG à paramètres fixes après la période d'adaptation où le modèle est suffisamment bien estimé et présente bien le procédé et l'effet de la perturbation est rejeté.

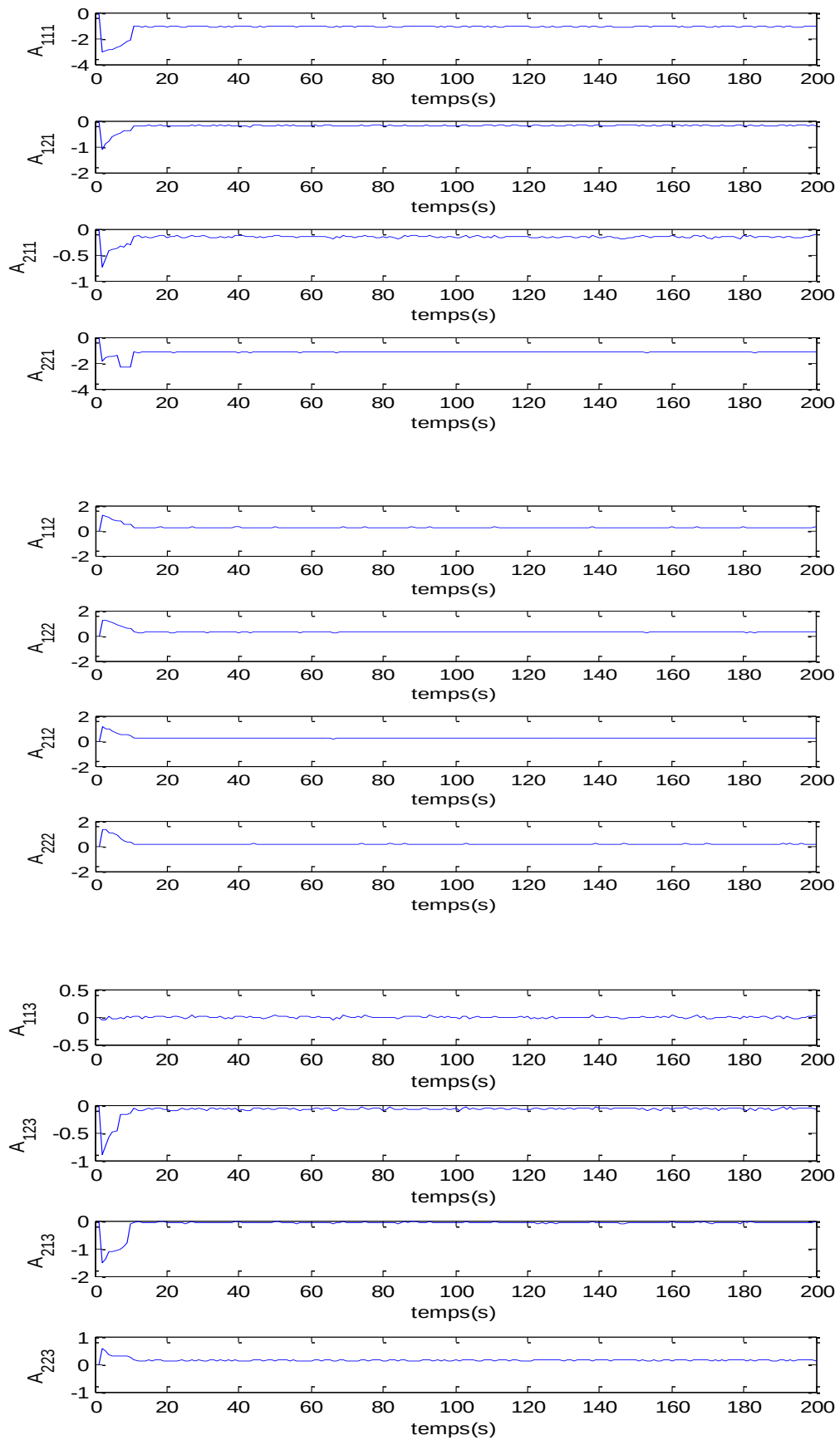
Les figures (3.6) et (3.8) montrent les paramètres estimés respectivement en absence et en présence de perturbations, dans le cas de la LQG adaptative. On remarque les paramètres estimés convergent rapidement leurs vraies valeurs

Les résultats de simulation de la GPC à paramètres connus en absence et en présence de perturbations, sont présentés respectivement par les figures (3.9) et (3.10), ces résultats sont obtenus dans les conditions suivantes :

L'horizon de prédiction est $N_p = 15$, l'horizon de commande $N_u = 2$, l'horizon initial $N_i = d$ pour un facteur de pondération sur la commande $\lambda = 0.98$. On remarque que les performances (suivi de la trajectoire de référence) sont très bien maintien avec un temps de réponse inférieur à celui obtenu lors de l'application de la commande LQG, toutefois, le rejet de perturbation reste effectif.

Les figures (3.11) et (3.13) présentent des résultats de simulation par la commande GPC dans le cas adaptatif respectivement en absence et en présence de perturbations. On remarque que l'adaptation est très rapide et donne des résultats identiques à ceux obtenus avec la commande GPC à paramètres fixes après la période d'adaptation.

Les figures (3.12) et (3.14) montrent les paramètres estimés respectivement en absence et en présence de perturbations. On remarque les paramètres estimés convergent rapidement vers leurs vraies valeurs.



5.2.7.9 Réseau de distribution

Le réseau électrique est composé de la ligne de transport électrique et la ligne de distribution. Eventuellement, un transformateur de tension peut être une partie composante de la ligne de transport si la distance qui sépare le lieu de la production électrique et les consommateurs, est importante (supérieure à 4 Km). Le réseau électrique est dimensionné de telle façon à garantir les conditions normales de fonctionnement de la microcentrale hydraulique. En effet, le facteur de puissance dans le réseau ne doit pas être moins que 0,8 et la section du câble doit être suffisante pour ne pas engendrer des pertes de tension.

Dans le cas où la production électrique est suffisante, des points lumineux de l'éclairage public fait aussi partie de configuration du service électrique des microcentrales hydrauliques. Le service électrique d'une microcentrale hydraulique consiste essentiellement on l'éclairage et l'audio-visuel des ménages ruraux, de toute l'infrastructure du village (école, dispensaire, mosquée, boutique, écoule coranique ...) et l'éclairage public. Eventuellement, la desserte en électricité des petites unités artisanales ou industrielles (moulin à grain, scierie, huilerie ...), peut être assurée par l'installation des microcentrales hydrauliques, et ce suivant la montagne organisationnel de l'exploitation adopté. Il est nécessaire que les points de consommation est assurée avec des limiteurs électriques (disjoncteurs ou fusibles) ou par un système de tarification.

Généralement, un projet de microcentrale hydraulique adopte, dans sa configuration technique, les lampes ou équipements inductifs, est accompagnée des problèmes de facteur de puissance dans le réseau électrique ; la solution de récompensation (mise en place de condensateurs correspondants) doit être conduite avec une attention particulière.

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes manières de production de l'électricité les plus dominantes dans le monde. La politique énergétique de chaque pays dépend de la source primaire disponible dans ce pays. Les enjeux de développement des énergies renouvelables sont mondiaux. A fin de lutter contre l'effet de serre et conformément aux engagements de Kyoto.

Le Maroc, a une grande variété des sources énergétiques que ce soit fossile (pétrole, gaz, charbon) ou renouvelable (solaire, éolienne, hydraulique). La politique énergétique actuelle dans le Maroc est basée sur l'exploitation des énergies renouvelables pour produire

6.2.4.4 Résultats de simulations de la commande GPC adaptative, avec et sans perturbations

On utilise les mêmes paramètres de synthèse ($\mathbf{R} = \mathbf{I}_{2 \times 2}$; $\mathbf{Q} = 5 \mathbf{I}_{2 \times 2}$; $\mathbf{h}_p = 10$; $\mathbf{h}_c = 5$) qu'avec la GPC à paramètres fixes et les mêmes valeurs d'initialisation de l'algorithme d'adaptation qu'avec la LQG

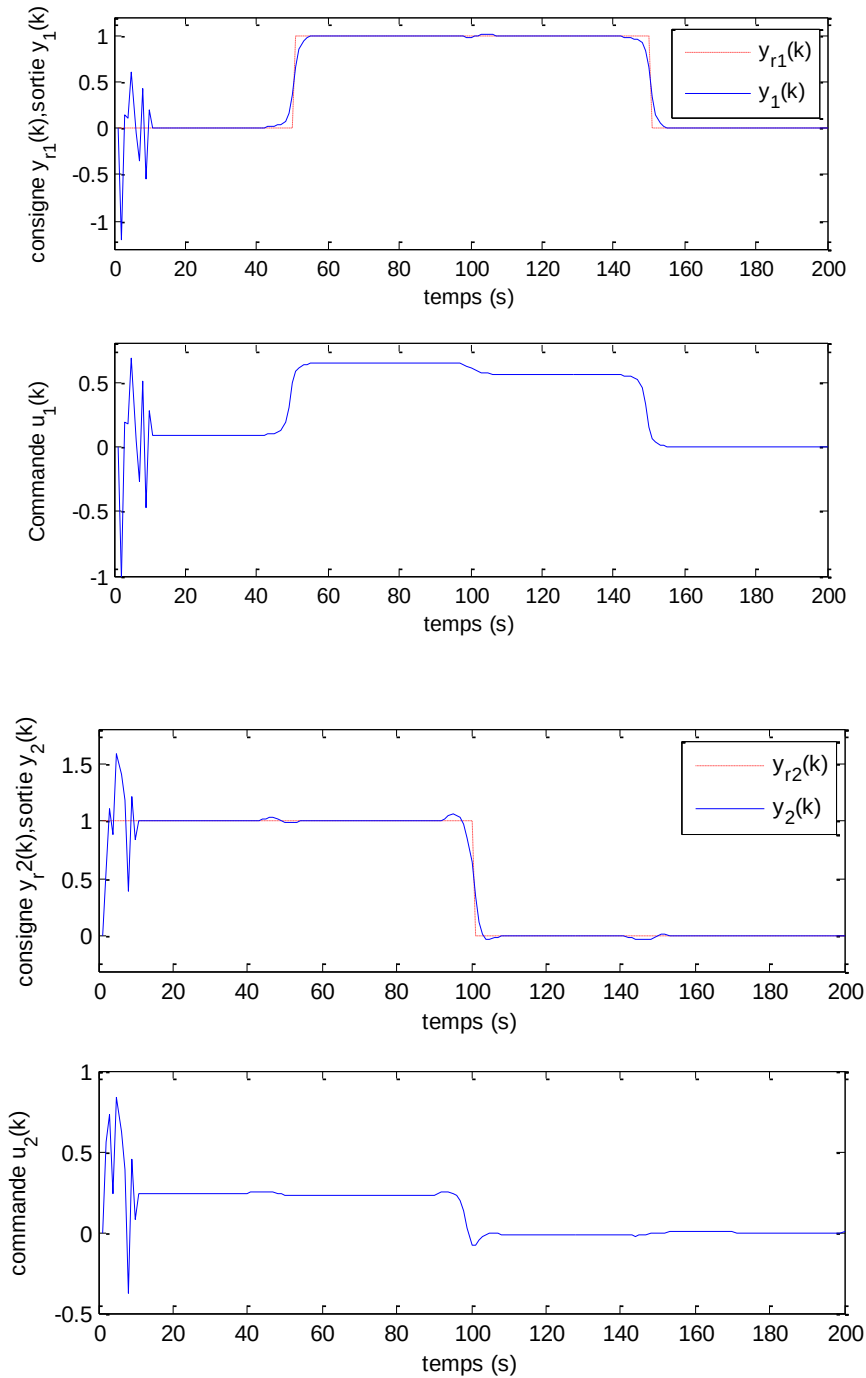


Fig. 6.10 : la variation des sorties (P_t, V_t) et des commandes (U_e, U_g) avec la GPC adaptative, en absence de perturbations

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthodologie de synthèse de la loi de la commande LQG et de la commande GPC. Cette dernière représente une généralisation des différents types de commande prédictive et est une combinaison entre la prédiction du comportement futur du procédé avec la commande rétroaction.

Ces lois de commande sont appliquées à la commande d'une vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée, pour permettre de mieux comprendre la stratégie de la GPC et la LQG développée ci dessus et de se familiariser avec l'utilisation de ces algorithmes de commande afin de préparer à faire l'extension de cette procédure dans le cas multivariable.

Les résultats de simulation obtenus montrent que la GPC dans le cas non adaptatif et adaptatif apporte des performances remarquable, notamment, en ce concerne la poursuite de la vitesse angulaire à sa consigne et le rejet de la perturbation. De même pour la commande LQG donne aussi des résultats satisfaisants mais avec un temps de réponse un peu supérieur à celui obtenu par la GPC.

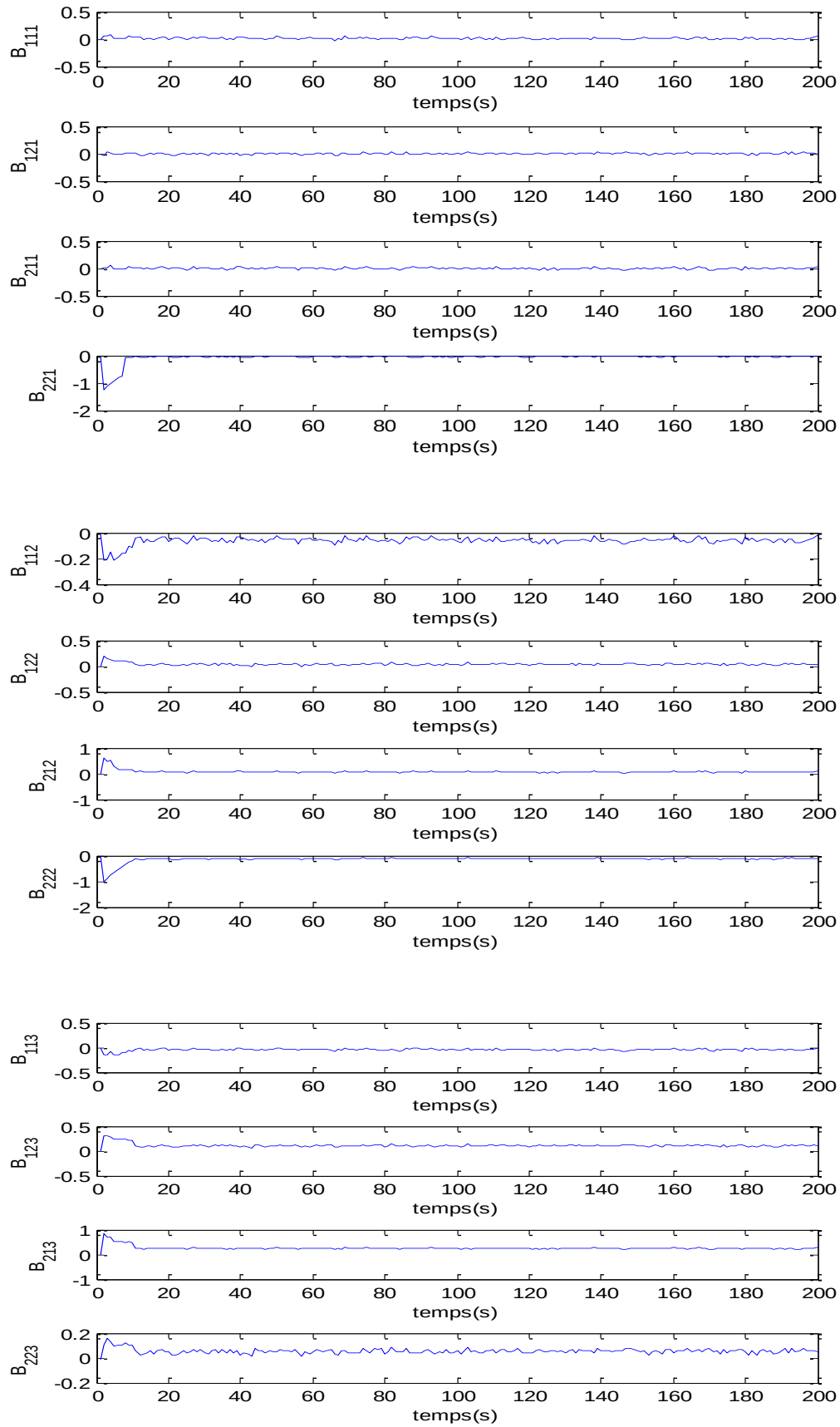
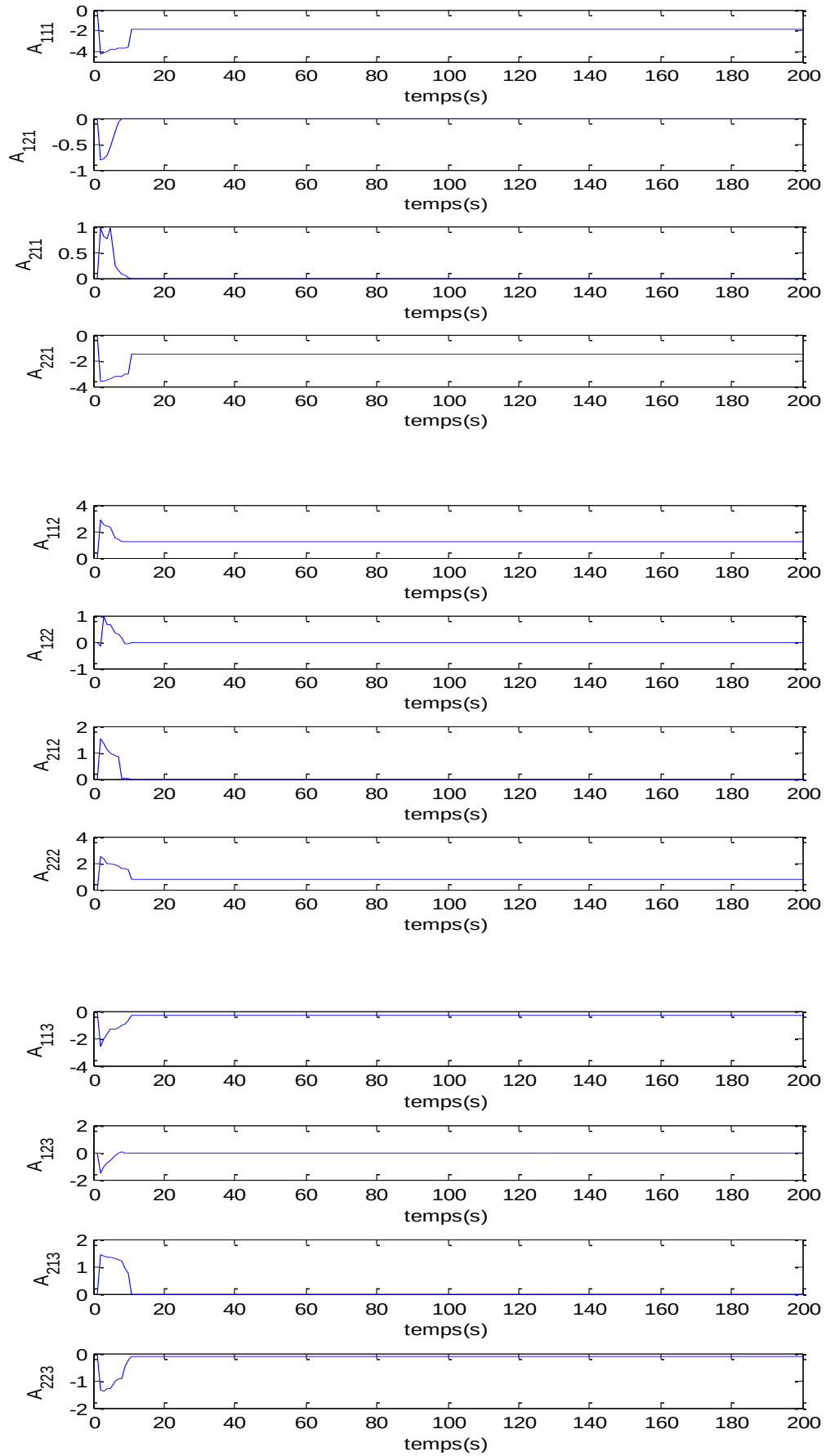


Fig.4.13 : Paramètres estimés : GPC adaptative avec perturbations

de l'électricité. A cet égard, les micro-centrales hydroélectriques constituent une source formidable pour le développement durable.

Nous avons aussi donné un aperçu sur l'histoire de l'énergie hydraulique, puis la technique des micro-centrales hydrauliques est détaillée, tout en insistant sur les éléments qui constituent une centrale hydroélectrique, à savoir la turbine et le générateur



4.4.5 Interprétation des résultats de simulations

Les figures (4.2) et (4.3) montrent, respectivement, les réponses temporelles du système bouclé avec le correcteur LQG à paramètres connus, en absence et en présence de perturbations. Les commandes appliquées dans chaque cas sont également illustrées. Force est de constater que la LQG à paramètres connus apporte des performances remarquables, notamment, en ce concerne la poursuite des sorties du système à ses consignes et le rejet de la perturbation, mais avec tout de même une légère perte de la poursuite qui est vite rétablie, due à l'influence du couplage multivariable donné par les transferts de e_1 à y_2 et de e_2 à y_1 . A noter que le système répond aussi avec un dépassement.

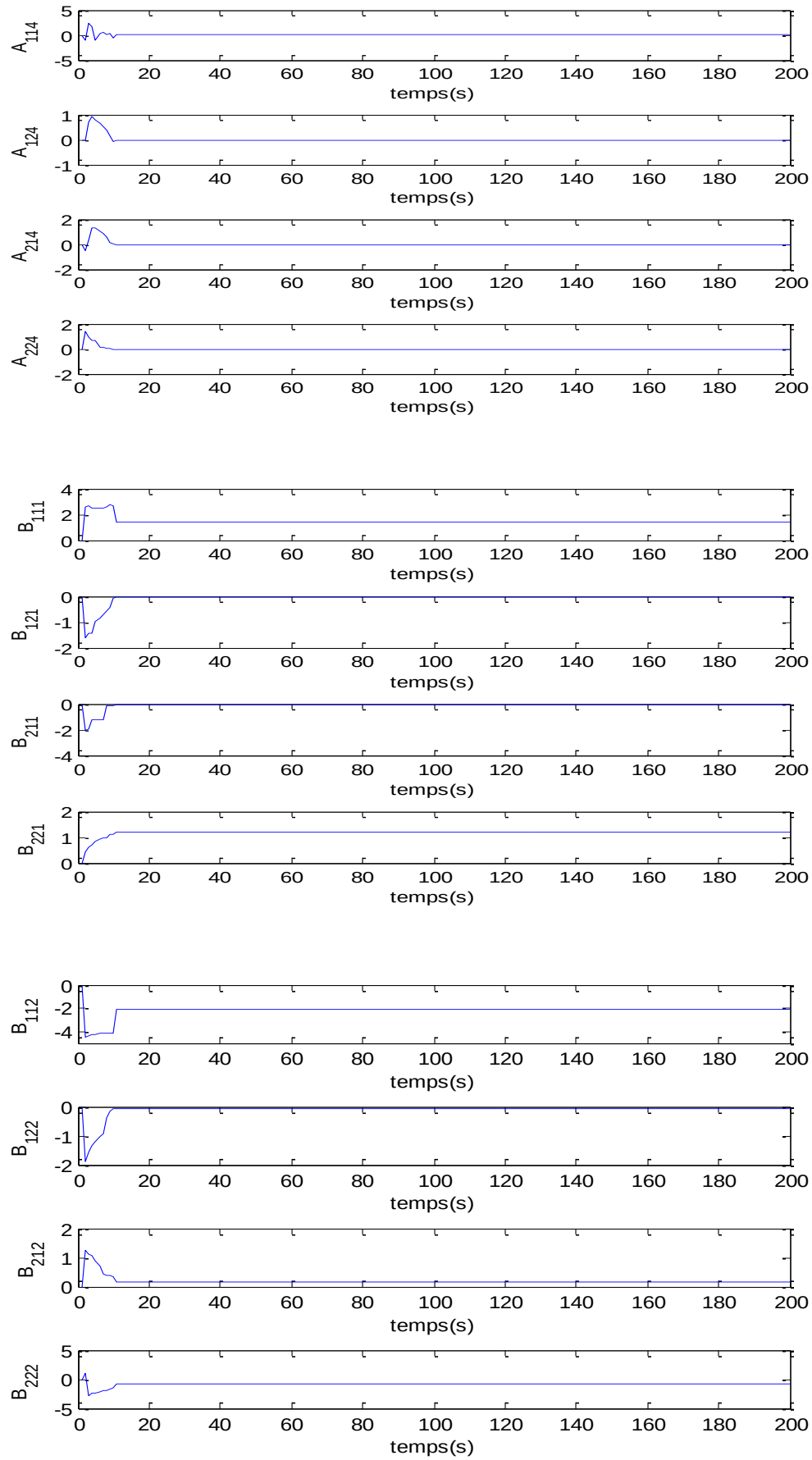
Les figures (4.4) et (4.6) représentent, respectivement, le comportement de la loi de commande adaptative LQG, en absence et en présence de perturbations et ce, pour les mêmes paramètres de synthèse qu'avec LQG non adaptative. On remarque qu'après la période d'adaptation, où le modèle est suffisamment bien estimé et représente bien le procédé, le comportement de la LQG adaptative est identique à celui obtenu dans le cas des paramètres connus.

Les figures (4.5) et (4.7) montrent les paramètres estimés respectivement en absence et en présence de perturbations, dans le cas de la LQG adaptative. On remarque les paramètres estimés convergent vers leurs vraies valeurs

Les figures (4.8) et (4.9) montrent, respectivement, les réponses temporelles du système et les commandes appliquées, avec le correcteur non adaptatif GPC, en absence et en présence de perturbations. Les résultats de cette commande présentent de très bonnes performances en ce concerne la poursuite des sorties du système à ses consignes et le rejet de la perturbation. Il convient de remarquer aussi que le système répond sans dépassement (les paramètres de réglage et de conception du régulateur sont bien choisis), mais avec une légère perte de la poursuite qui est vite rétablie, en raison de l'influence du couplage multivariable donné par les transferts de e_1 à y_2 et de e_2 à y_1 .

Les figures (4.10) et (4.12) représentent, respectivement, le comportement de la loi de commande adaptative GPC, en absence et en présence des perturbations. A retenir, ici, que les mêmes paramètres de synthèse que ceux relatifs au GPC non adaptatif et les mêmes valeurs d'initialisation de l'algorithme d'adaptation qu'avec LQG adaptative sont utilisés.

A travers ces figures on peut constater qu'après la période d'adaptation, le comportement est identique à celui obtenu dans le cas GPC non adaptatif et l'effet de perturbations est bien rejeté.



Les figures (4.11) et (4.13) montrent les paramètres estimés respectivement en absence et en présence de perturbations, dans le cas de la GPC adaptative. On remarque les paramètres estimés convergent vers leurs vraies valeurs

4.5 Conclusion

Ce chapitre concerne l'extension au cas multivariable des lois de commandes linéaire quadratique gaussienne LQG et commande prédictive généralisée GPC.

La faisabilité et le comportement des méthodes de commande développées, sont testées sur la colonne à distiller ; un procédé assez difficile à commander (stable et à non minimum de phase, très couplé et non découplable avec stabilité par retour d'état statique).

Les résultats de simulation obtenus illustrent le comportement des schémas de commande LQG et GPC dans le cas non adaptatif et adaptatif. Ceux-ci montrent que la GPC donne des résultats très satisfaisants aussi bien en absence qu'en présence de perturbations. Il est clair que la GPC présente plus d'intérêt, de par ses meilleures performances, que la LQG. En revanche le système répond sans dépassement et les sorties suivent bien ses consignes dans le cas de la GPC.

Pour les schémas de commandes adaptatives LQG et GPC, on constate qu'après la période d'adaptation le comportement du système est identiques à celui obtenu dans le cas à paramètres connus.

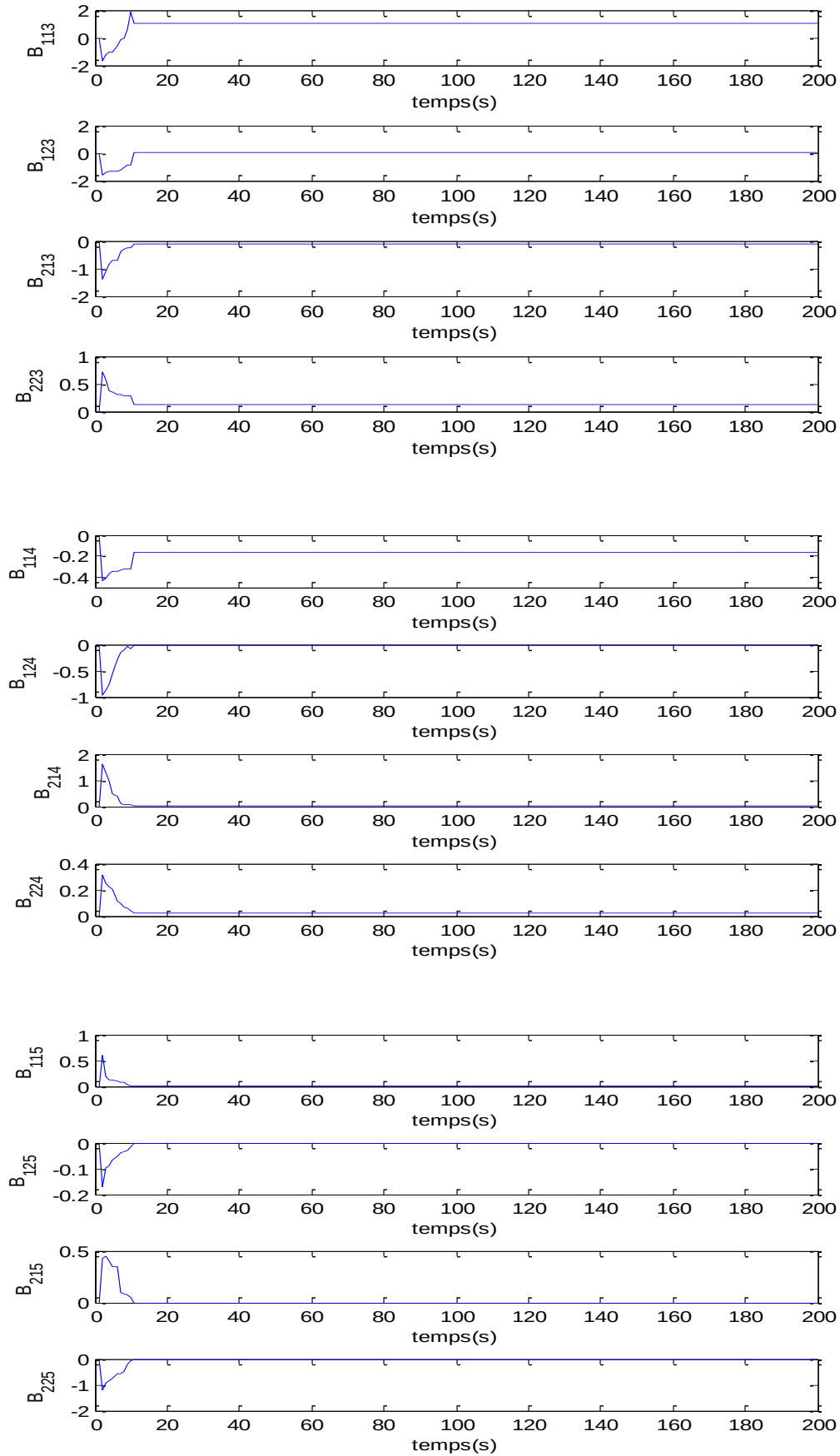


Fig. 6.11 : Paramètres estimés : GPC adaptative sans perturbations

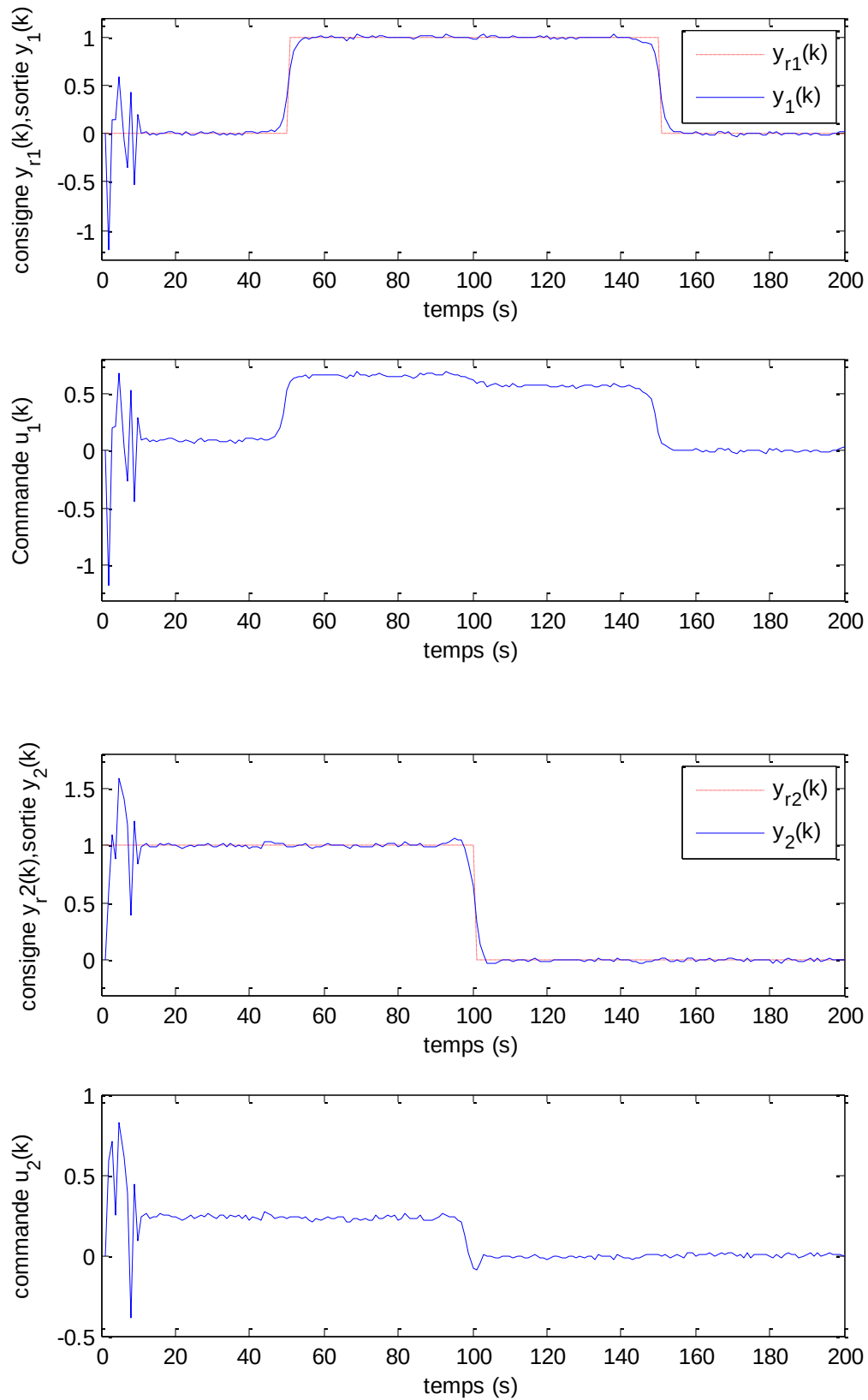
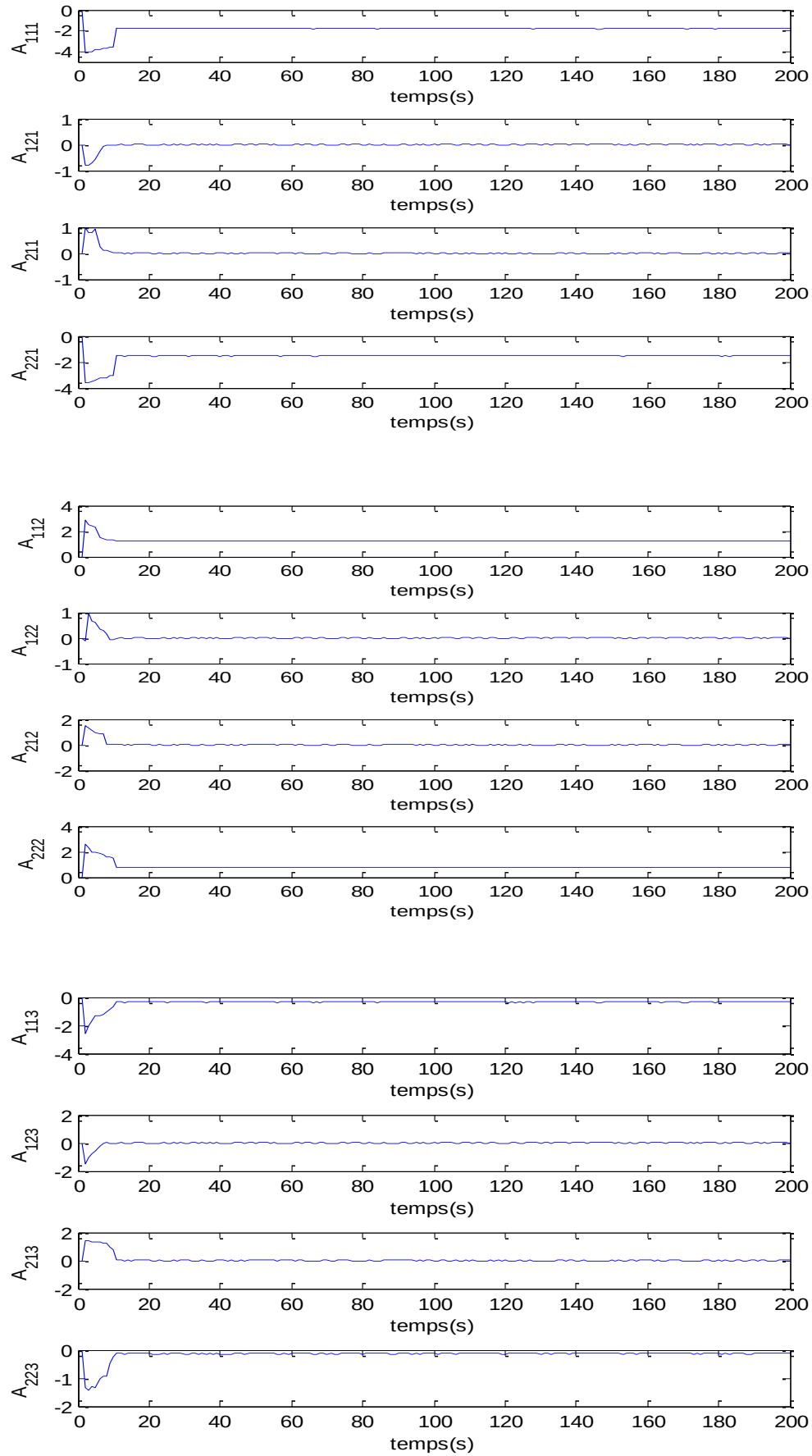
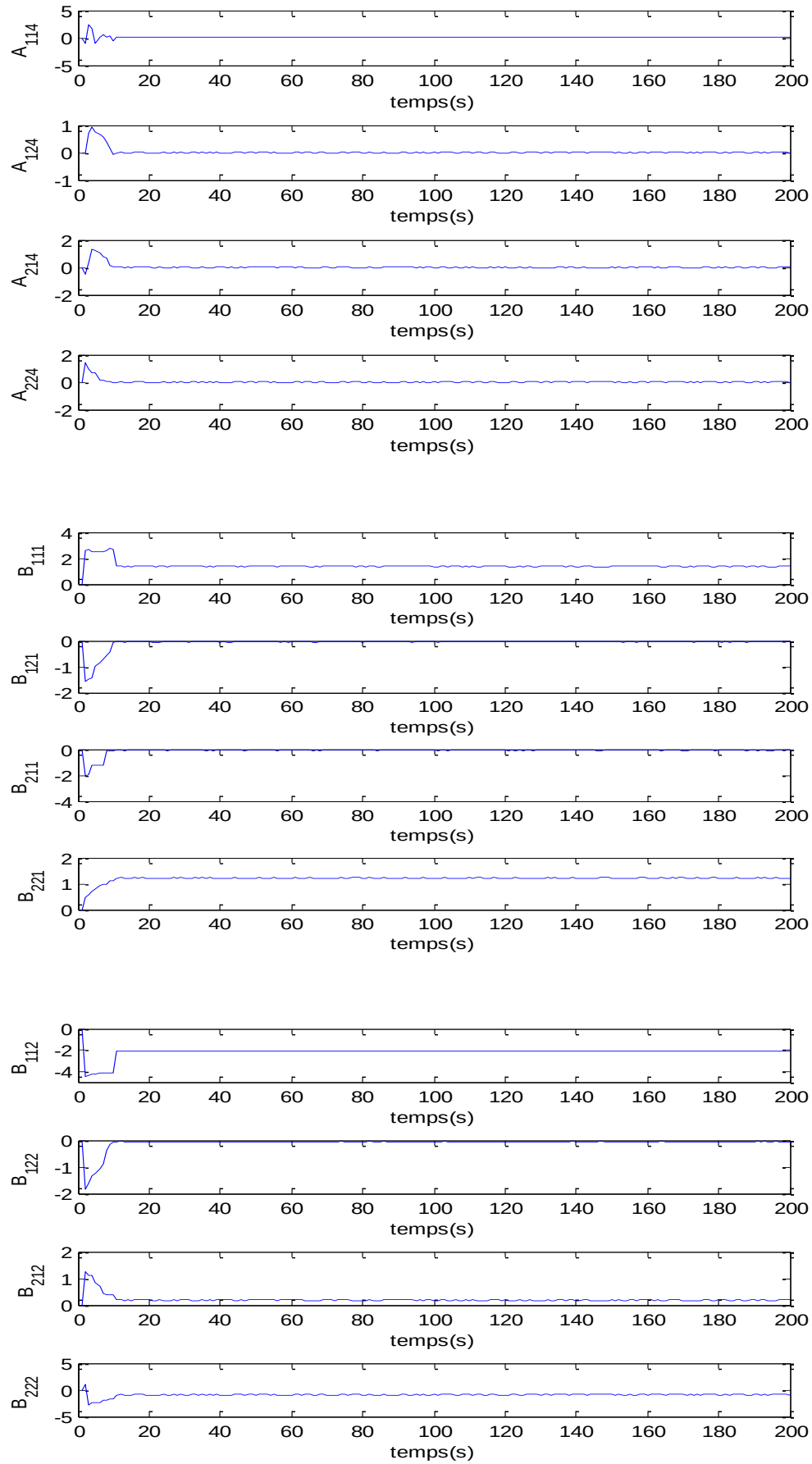


Fig. 6.9 : la variation des sorties (P_t, V_t) et des commandes (U_e, U_g) avec la GPC adaptative, en présence de perturbations





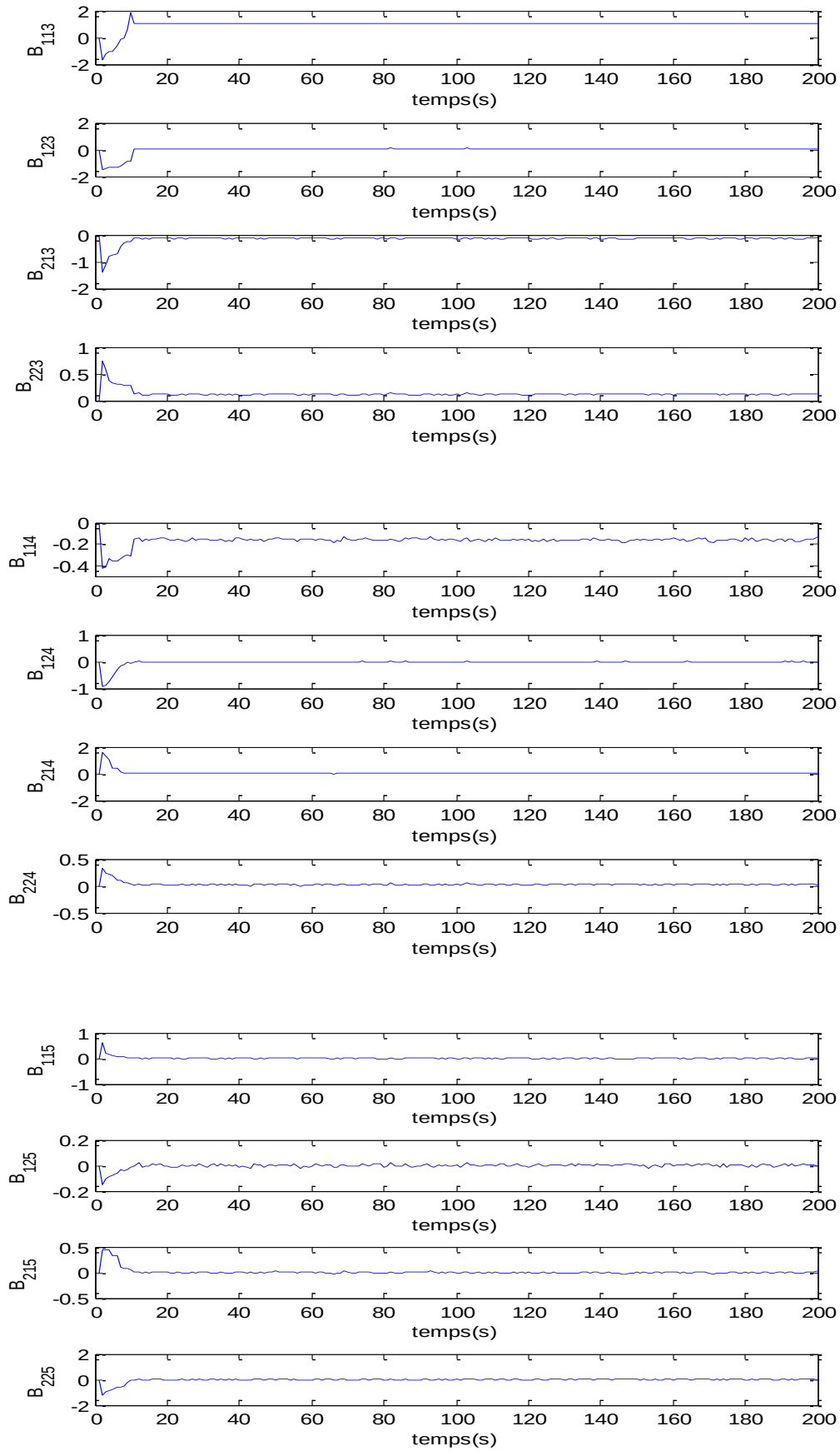


Fig. 6.13 : Paramètres estimés : GPC adaptative en présence de perturbations

6.2.5 Interprétation des résultats de simulations

Les figures (6.2) et (6.3) montrent, respectivement, les allures des variations des sorties (P_t, V_t) et des signaux de commande (U_e, U_g) appliquées, obtenus avec la commande LQG à paramètres connus, respectivement, en absence et en présence de perturbations. Il convient de remarquer que, comme au chapitre 4, la LQG maintient un certain niveau de performances, en permettant une poursuite des sorties du système à ses consignes. Ainsi l'effet de perturbation est rejeté, mais une légère perte de la poursuite est vite rétablie, en raison de l'influence du couplage multivariable donné par les transferts de e_1 à y_2 et de e_2 à y_1 . Aussi, la réponse du système se fait avec un dépassement qui apparaît élevé, notamment pour la sortie y_2 .

Les figures (6.4) et (6.6) représentent, respectivement, les variations des mêmes grandeurs, obtenus avec la LQG dans le cas adaptatif, en absence et en présence de perturbations, mais avec les paramètres de synthèse utilisés dans le cas de la LQG à paramètres connus. On remarque qu'après la période d'adaptation, où le modèle est suffisamment bien estimé et approche avec satisfaction le procédé, le comportement de la LQG adaptative ressemble entièrement à celui obtenu avec des paramètres connus.

Les figures (6.5) et (6.7) montrent les paramètres estimés respectivement en absence et en présence de perturbations, dans le cas de la LQG adaptative. On remarque les paramètres estimés convergent vers leurs vraies valeurs

Les figures (6.8) et (6.9) illustrent, respectivement, les réponses temporelles du système et les commandes appliquées, avec le correcteur non adaptatif GPC, en absence et en présence de perturbations, obtenus avec $N_p = 10$, $N_u = 5$, $N_i = d$, $R = I_{2 \times 2}$ et $Q = 5 I_{2 \times 2}$. Il apparaît qu'avec le correcteur GPC à paramètres connus on peut assurer des performances remarquables en termes de poursuite, rejet de perturbations, et dépassement. En effet, le comportement du système est très proche de celui souhaité et le système répond sans dépassement (les paramètres de réglage et de conception du régulateur sont été bien choisis). Toutefois, comme auparavant, la poursuite accuse une légère perte, qui est vite rétablie, à cause de l'influence du fameux couplage multivariable donné par les transferts de e_1 à y_2 et de e_2 à y_1 .

Les figures (6.10) et (6.12) donnent les allures des variations des sorties (P_t, V_t) et des signaux de commande (U_e, U_g) appliquées obtenus, respectivement, avec la loi de commande adaptative GPC en absence et en présence des perturbations. Là aussi, de tels résultats sont obtenus avec les mêmes paramètres de synthèse qu'avec la GPC à paramètres connus et les

mêmes valeurs d'initialisation de l'algorithme d'adaptation qu'avec LQG adaptative. Il convient de faire le même constat, que ci-dessus, quant au comportement du système après la période d'adaptation.

En dernier, les figures (6.11) et (6.13) montrent les paramètres estimés respectivement en absence et en présence de perturbations, dans le cas de la GPC adaptative. On remarque les paramètres estimés convergent vers leurs vraies valeurs

6.3 Conclusion

Dans ce chapitre sont appliquées les lois de commandes linéaire quadratique gaussienne, LQG, et commande prédictive généralisée, GPC, à la partie maitresse d'une microcentrale hydraulique, qui est la turbine-alternateur, laquelle est considérée comme un système à deux entrées et deux sorties.

Les simulations effectuées illustrent le comportement des schémas de commande LQG et GPC dans les cas non et adaptatifs. Ces simulations montrent également que la GPC donne des résultats très satisfaisants, aussi bien en absence qu'en présence de perturbations, et bien meilleurs que ceux acquis avec la LQG. En revanche, le système répond sans dépassement et les sorties suivent bien ses consignes dans le cas de la GPC.

Enfin, pour les schémas de commandes adaptatives LQG et GPC, il faut souligner que, après la période d'adaptation, le comportement du système est identique à celui obtenu dans le cas à paramètres connus.