

Présentation pour L'Habilitation à Diriger des Recherches

Commande Robuste pour la conception des systèmes complexes

Anton KORNIENKO

Maître de Conférences

Section CNU : 61

École Centrale de Lyon

Laboratoire Ampère

7 février 2022

Parcours professionnel et Formation

2011 - Présent **MdC+ATER**, École Centrale Lyon

Lab. Ampère, Dép. Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes

Priorité : Conception intégrée des systèmes dynamiques

Parcours professionnel et Formation

2011 - Présent **MdC+ATER**, École Centrale Lyon
Lab. Ampère, Dép. Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes
Priorité : Conception intégrée des systèmes dynamiques

2008 - 2011 **Docteur en Automatique**, Université de Lyon
CEA, LETI Grenoble en collaboration avec
Lab. Ampère, LIP6 et Supelec ⇒ **projet HODISS**
 « Réseau de PLLs distribuées pour la synthèse
 automatique d'horloge de MPSOCs synchrones »

Parcours professionnel et Formation

2011 - Présent

MdC+ATER, École Centrale Lyon

Lab. Ampère, Dép. Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes

Priorité : Conception intégrée des systèmes dynamiques

2008 - 2011

Docteur en Automatique, Université de Lyon

CEA, LETI Grenoble en collaboration avec

Lab. Ampère, LIP6 et Supelec \Rightarrow **projet HODISS**

« Réseau de PLLs distribuées pour la synthèse automatique d'horloge de MPSOCs synchrones »

2002 - 2008

Master d'Aviation et Astronautique, Polytechnique Kiev

spécialité : Systèmes de commande des engins volants

Enseignement à l'Ecole Centrale de Lyon

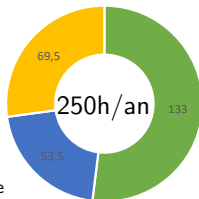
Répartition par niveau, heures eq. TD

CM, BE, cursus ingénieur et Master Automatique
(environ 20 élèves)

- ▶ Robustesse et Optimisation Convexe
- ▶ Automatique avancée

TD, TP/BE, cursus ingénieur généraliste
(400 élèves)

- ▶ Automatique et Traitement du Signal
- ▶ Régulation et entraînement électrique
- ▶ Conversion A/N, N/A



CM, TD, BE, cursus ingénieur généraliste
(24 élèves)

- ▶ Systèmes automatisés de production
- ▶ Systèmes mécatroniques intelligents

■ 1A (L3) ■ 2A (M1) ■ 3A (M2)

Enseignement à l'Ecole Centrale de Lyon

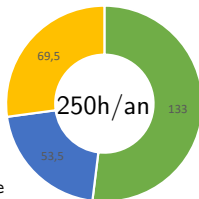
Répartition par niveau, heures eq. TD

CM, BE, cursus ingénieur et Master Automatique
(environ 20 élèves)

- ▶ Robustesse et Optimisation Convexe
- ▶ Automatique avancée

TD, TP/BE, cursus ingénieur généraliste
(400 élèves)

- ▶ Automatique et Traitement du Signal
- ▶ Régulation et entraînement électrique
- ▶ Conversion A/N, N/A



CM, TD, BE, cursus ingénieur généraliste
(24 élèves)

- ▶ Systèmes automatisés de production
- ▶ Systèmes mécatroniques intelligents

■ 1A (L3) ■ 2A (M1) ■ 3A (M2)

Particularités :

- ▶ Volume horaire limité, mais quantité importante d'informations
- ▶ Cursus généraliste
- ▶ Enjeux : intéresser les élèves

Responsabilités de cours

En 2^e année (M1), Cours électifs

- ▶ Systèmes mécatroniques intelligents, M. Collet (LTDS) et C. Marchand (INL)
 - ▶ Commande fréquentielle classique des systèmes flexibles
- ▶ Systèmes automatisés de production, E. Boutleux (Ampère)
 - ▶ Modélisation par les Réseaux de Petri

En 3^e année (M2), Cours électifs

- ▶ MOD Automatique avancée, X. Bombois (Ampère)
 - ▶ Commande H_{∞}
- ▶ Robustesse et Optimisation Convexe, G. Scorletti
 - ▶ μ -analyse
- ▶ Projet, Guidage et pilotage P. Masionni et L. Bako (Ampère)
 - ▶ Commande robuste : stabilité du vol d'avion et sa manœuvrabilité

Responsabilités de cours

En 2^e année (M1), Cours électifs

- ▶ Systèmes mécatroniques intelligents, M. Collet (LTDS) et C. Marchand (INL)
 - ▶ Commande fréquentielle classique des systèmes flexibles
- ▶ Systèmes automatisés de production, E. Boutleux (Ampère)
 - ▶ Modélisation par les Réseaux de Petri

En 3^e année (M2), Cours électifs

- ▶ MOD Automatique avancée, X. Bombois (Ampère)
 - ▶ Commande H_∞
- ▶ Robustesse et Optimisation Convexe, G. Scorletti
 - ▶ μ -analyse
- ▶ Projet, Guidage et pilotage P. Masionni et L. Bako (Ampère)
 - ▶ Commande robuste : stabilité du vol d'avion et sa manœuvrabilité

Responsabilités de cours

En 2^e année (M1), Cours électifs

- ▶ Systèmes mécatroniques intelligents, M. Collet (LTDS) et C. Marchand (INL)
 - ▶ Commande fréquentielle classique des systèmes flexibles
- ▶ Systèmes automatisés de production, E. Boutleux (Ampère)
 - ▶ Modélisation par les Réseaux de Petri

En 3^e année (M2), Cours électifs

- ▶ MOD Automatique avancée, X. Bombois (Ampère)
 - ▶ Commande H_∞
- ▶ Robustesse et Optimisation Convexe, G. Scorletti
 - ▶ μ -analyse
- ▶ Projet, Guidage et pilotage P. Masionni et L. Bako (Ampère)
 - ▶ Commande robuste : stabilité du vol d'avion et sa manœuvrabilité

Responsabilités de cours

En 2^e année (M1), Cours électifs

- ▶ Systèmes mécatroniques intelligents, M. Collet (LTDS) et C. Marchand (INL)
 - ▶ Commande fréquentielle classique des systèmes flexibles
- ▶ Systèmes automatisés de production, E. Boutleux (Ampère)
 - ▶ Modélisation par les Réseaux de Petri

En 3^e année (M2), Cours électifs

- ▶ MOD Automatique avancée, X. Bombois (Ampère)
 - ▶ Commande H_∞
- ▶ Robustesse et Optimisation Convexe, G. Scorletti
 - ▶ μ -analyse
- ▶ Projet, Guidage et pilotage P. Masionni et L. Bako (Ampère)
 - ▶ Commande robuste : stabilité du vol d'avion et sa manœuvrabilité

Responsabilités de cours

En 2^e année (M1), Cours électifs

- ▶ Systèmes mécatroniques intelligents, M. Collet (LTDS) et C. Marchand (INL)
 - ▶ Commande fréquentielle classique des systèmes flexibles*
- ▶ Systèmes automatisés de production, E. Boutleux (Ampère)
 - ▶ Modélisation par les Réseaux de Petri

En 3^e année (M2), Cours électifs

- ▶ MOD Automatique avancée, X. Bombois (Ampère)
 - ▶ Commande H_{∞} *
- ▶ Robustesse et Optimisation Convexe, G. Scorletti
 - ▶ μ -analyse*
- ▶ Projet, Guidage et pilotage P. Masionni et L. Bako (Ampère)
 - ▶ Commande robuste : stabilité du vol d'avion et sa manœuvrabilité *

* En lien avec mes thématiques de recherche

Activité d'intérêt collectif : Enseignement

Correspondant de l'École Centrale du **Master EEEA, parcours GSA**

- ▶ Co-accrédité avec l'Université de Claude Bernard Lyon 1
- ▶ Gestion du parcours, côté de l'ECL
- ▶ Évaluation des dossiers des candidats, jury de soutenances
- ▶ Préparation de l'évaluation du HCERES, nouvelles maquettes

Porteur projet Européen Erasmus+ AC107 (MIC) 2017-2019

- ▶ Renforcement de la politique de l'école vers l'Ukraine
- ▶ Institut Polytechnique de Kiev et Université Nationale Taras Chevtchenko de Kiev (Enseignement mais aussi **Recherche**)
- ▶ 23 mobilités d'étudiants (17 vers la France, 6 vers l'Ukraine)
- ▶ 48 mobilités du personnel (39 vers la France, 9 vers l'Ukraine)
- ▶ **Cours** (3 × 8h) : *From classical to advanced control design, H_∞ synthesis perspective*

Membre élu Conseil Scientifique de l'École Centrale de Lyon, avril 2020

Activité d'intérêt collectif : Enseignement

Correspondant de l'École Centrale du **Master EEEA, parcours GSA**

- ▶ Co-accrédité avec l'Université de Claude Bernard Lyon 1
- ▶ Gestion du parcours, côté de l'ECL
- ▶ Évaluation des dossiers des candidats, jury de soutenances
- ▶ Préparation de l'évaluation du HCERES, nouvelles maquettes

Porteur projet Européen Erasmus+ AC107 (MIC) 2017-2019

- ▶ Renforcement de la politique de l'école vers l'Ukraine
- ▶ Institut Polytechnique de Kiev et Université Nationale Taras Chevtchenko de Kiev (Enseignement mais aussi **Recherche**)
- ▶ 23 mobilités d'étudiants (17 vers la France, 6 vers l'Ukraine)
- ▶ 48 mobilités du personnel (39 vers la France, 9 vers l'Ukraine)
- ▶ **Cours** (3 × 8h) : *From classical to advanced control design, H_∞ synthesis perspective*

Membre élu Conseil Scientifique de l'École Centrale de Lyon, avril 2020

Activité d'intérêt collectif : Enseignement

Correspondant de l'École Centrale du **Master EEEA, parcours GSA**

- ▶ Co-accrédité avec l'Université de Claude Bernard Lyon 1
- ▶ Gestion du parcours, côté de l'ECL
- ▶ Évaluation des dossiers des candidats, jury de soutenances
- ▶ Préparation de l'évaluation du HCERES, nouvelles maquettes

Porteur projet Européen Erasmus+ AC107 (MIC) 2017-2019

- ▶ Renforcement de la politique de l'école vers l'Ukraine
- ▶ Institut Polytechnique de Kiev et Université Nationale Taras Chevtchenko de Kiev (Enseignement mais aussi **Recherche**)
- ▶ 23 mobilités d'étudiants (17 vers la France, 6 vers l'Ukraine)
- ▶ 48 mobilités du personnel (39 vers la France, 9 vers l'Ukraine)
- ▶ **Cours** (3 × 8h) : *From classical to advanced control design, H_∞ synthesis perspective*

Membre élu Conseil Scientifique de l'École Centrale de Lyon, avril 2020

Activité d'intérêt collectif : Recherche

Animation Laboratoire

- ▶ Depuis janvier 2021, **co-responsable** avec M. Di Loreto, groupe de travail : Conception intégrée des systèmes dynamiques (15 permanents et 13 non permanents)
- ▶ **Animation scientifique** au sein du département
- ▶ Projets de recherche quinquennaux, défis et objectifs sociétaux

Mobilité International

- ▶ Séjour de 6 mois en 2015, Department of Automatic Control School of Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology (Stockholm, Suède) invité par prof. *Håkan Hjalmarsson* : **Identification pour la commande de systèmes interconnectés**
- ▶ Séjours courts (Caltech, Tufts University, Université Fédérale de Santa Catarina, de Porto-Alegre et du Minas Gerais, TU Delft, Polytechnique de Kiev)

Examineur de thèse de Sjoerd Boersma, TU Delft, Pays-Bas, 15 janvier 2019

Animation Laboratoire

- ▶ Depuis janvier 2021, **co-responsable** avec M. Di Loreto, groupe de travail : Conception intégrée des systèmes dynamiques (15 permanents et 13 non permanents)
- ▶ **Animation scientifique** au sein du département
- ▶ Projets de recherche quinquennaux, défis et objectifs sociétaux

Mobilité International

- ▶ Séjour de 6 mois en 2015, Department of Automatic Control School of Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology (Stockholm, Suède) invité par prof. *Håkan Hjalmarsson* : **Identification pour la commande de systèmes interconnectés**
- ▶ Séjours courts (Caltech, Tufts University, Université Fédérale de Santa Catarina, de Porto-Alegre et du Minas Gerais, TU Delft, Polytechnique de Kiev)

Examineur de thèse de Sjoerd Boersma, TU Delft, Pays-Bas, 15 janvier 2019

Animation Laboratoire

- ▶ Depuis janvier 2021, **co-responsable** avec M. Di Loreto, groupe de travail : Conception intégrée des systèmes dynamiques (15 permanents et 13 non permanents)
- ▶ **Animation scientifique** au sein du département
- ▶ Projets de recherche quinquennaux, défis et objectifs sociétaux

Mobilité International

- ▶ Séjour de 6 mois en 2015, Department of Automatic Control School of Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology (Stockholm, Suède) invité par prof. *Håkan Hjalmarsson* :
Identification pour la commande de systèmes interconnectés
- ▶ Séjours courts (Caltech, Tufts University, Université Fédérale de Santa Catarina, de Porto-Alegre et du Minas Gerais, TU Delft, Polytechnique de Kiev)

Examineur de thèse de Sjoerd Boersma, TU Delft, Pays-Bas, 15 janvier 2019

Encadrement de doctorants : thèses soutenues

1. Jorge Ayala-Cuevas, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models, 2021
 - ▶ actuellement **postdoc à CentraleSupélec**
2. Fabricio Saggin, Robust control for MEMS inertial sensors, 2021
 - ▶ actuellement **ingénieur de recherche chez JXSNS**
3. Arthur Perodou, Frequency Design of Passive Electronic Filters : a Modern System Approach, 2019
 - ▶ actuellement **ATER dans notre laboratoire**
4. Peng Wang, Active vibration control in a specific zone of smart structures, 2019
 - ▶ actuellement **ingénieur de recherche chez Huawei, Chine**
5. Khaled Laib, Analyse hiérarchisée de la robustesse des systèmes incertains de grande dimension, 2017
 - ▶ actuellement en **postdoc à l'Université de Cambridge**

Commande Robuste pour la conception des systèmes complexes

1. Commande = **Automatique**, mais conception = vision **plus large**
2. Conception des systèmes = **Robustesse** grâce aux **boucles fermées**

Commande Robuste pour la **conception** des systèmes complexes

1. Commande = **Automatique**, mais conception = vision **plus large**
2. Conception des systèmes = **Robustesse** grâce aux **boucles fermées**

Commande Robuste pour la **conception des systèmes** complexes

1. Commande = **Automatique**, mais conception = vision **plus large**
2. Conception des systèmes = **Robustesse** grâce aux **boucles fermées**

Boucles fermées pour la robustesse

STABILIZED FEEDBACK AMPLIFIERS

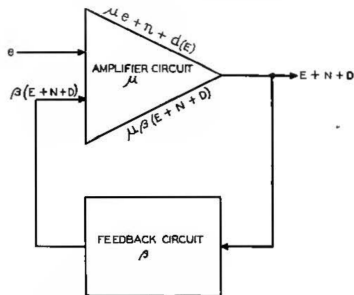
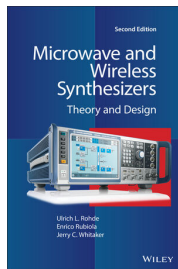


Fig. 1—Amplifier system with feedback.

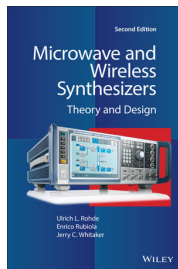
The Bell System Technical Journal
by H.S. Black, 1934

Potential de la Commande Robuste



Conception de PLLs,
2nd Edition April 2021

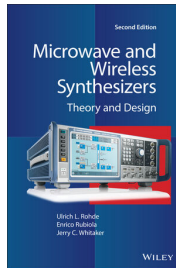
Potential de la Commande Robuste



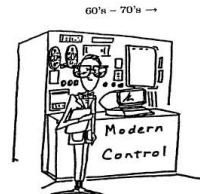
Conception de PLLs,
2nd Edition April 2021



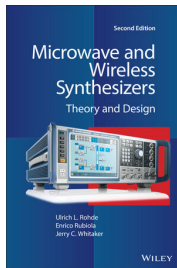
Potential de la Commande Robuste



Conception de PLLs,
2nd Edition April 2021



Potentiel de la Commande Robuste



Conception de PLLs,
2nd Edition April 2021

40's - 50's →



80's - 90's →



60's - 70's →



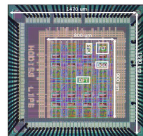
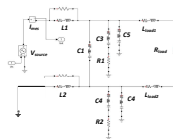
Commande Robuste pour la conception des systèmes complexes

1. Commande = **Automatique**, mais conception = vision **plus large**
2. Conception des systèmes = **Robustesse** grâce aux **boucles fermées**
3. Intérêt et potentiel **non explorés** de la Commande Robuste
4. Face à la complexité, **développement de nouvelles méthodes**

Commande Robuste pour la conception des systèmes complexes

1. Commande = **Automatique**, mais conception = vision **plus large**
2. Conception des systèmes = **Robustesse** grâce aux **boucles fermées**
3. Intérêt et potentiel **non explorés** de la Commande Robuste
4. Face à la complexité, **développement de nouvelles méthodes**

Commande Robuste pour la conception



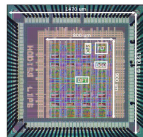
*Conception des
systèmes*

Commande Robuste pour la conception

Problèmes originaux

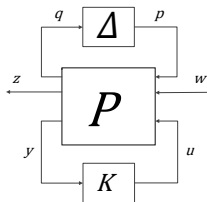
Effort pédagogique

Méthodes systématiques et adaptées



*Commande
Robuste*

*Conception des
systèmes*



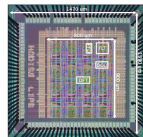
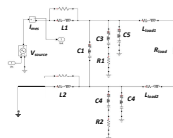
Commande Robuste pour la conception

Problèmes originaux

Effort pédagogique

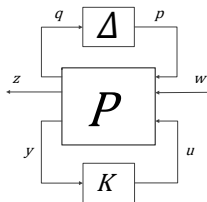
Méthodes systématiques et adaptées

Complexité et Grande échelle



*Commande
Robuste*

*Conception des
systèmes*



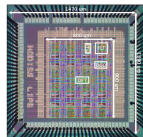
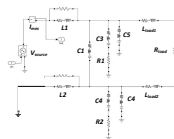
Commande Robuste pour la conception

Problèmes originaux

Effort pédagogique

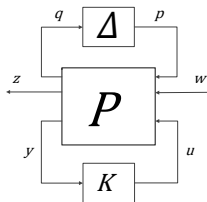
Méthodes systématiques et adaptées

Complexité et Grande échelle



Commande Robuste

Conception des systèmes



Développement de nouvelles méthodes :

- ▶ Défis scientifiques sous-jacents
- ▶ Idées originales exploitées
- ▶ Financement de la recherche

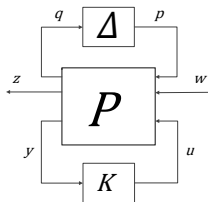
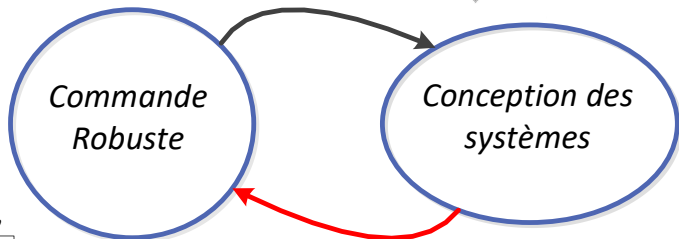
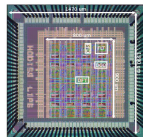
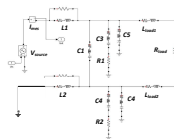
Commande Robuste pour la conception

Problèmes originaux

Effort pédagogique

Méthodes systématiques et adaptées

Complexité et Grande échelle



Développement de nouvelles méthodes :

- ▶ Défis scientifiques sous-jacents
- ▶ **Idées originales exploitées**
- ▶ Financement de la recherche



Stratégie de la démarche entreprise

Établir des collaborations en Microélectronique

Stratégie de la démarche entreprise

Établir des collaborations en **Microélectronique**

Stratégie de la démarche entreprise

Établir des collaborations en **Microélectronique**

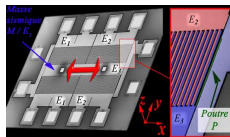
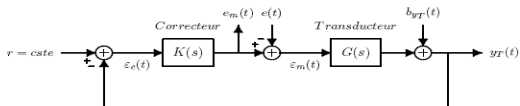
1. Collaboration avec des partenaires institutionnels (CEA, INL)
2. Collaboration avec des partenaires industriels (Asygn, Tronics Microsystems)

Stratégie de la démarche entreprise

Établir des collaborations en **Microélectronique**

1. Collaboration avec des partenaires institutionnels (CEA, INL)
2. Collaboration avec des partenaires industriels (Asygn, Tronics Microsystems)

Formation continue : **une étape de cette démarche**



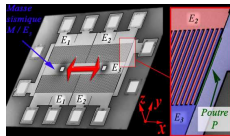
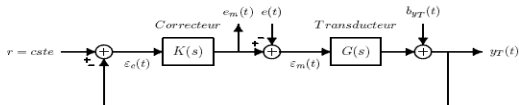
- ▶ Ingénieurs d'Asygn
- ▶ Montée et réalisée en 2016 ensemble avec X. Bombois et G. Scorletti
- ▶ Formation 4 jours : Automatique fréquentielle, Identification, Commande H_∞
- ▶ Combinaison de cours et de cas d'étude pratiques
- ▶ Automatique **sous l'angle de la conception des systèmes**

Stratégie de la démarche entreprise

Établir des collaborations en **Microélectronique**

1. Collaboration avec des partenaires institutionnels (CEA, INL)
2. Collaboration avec des partenaires industriels (Asygn, Tronics Microsystems)

Formation continue : **une étape de cette démarche**



- ▶ Ingénieurs d'Asygn
- ▶ Montée et réalisée en 2016 ensemble avec X. Bombois et G. Scorletti
- ▶ Formation 4 jours : Automatique fréquentielle, Identification, Commande H_∞
- ▶ Combinaison de cours et de cas d'étude pratiques
- ▶ Automatique **sous l'angle de la conception des systèmes**

Projet PSPC Next4MEMS (2016-2022)

- ▶ **Financé par la BPI France**
- ▶ Conception d'une nouvelle génération de capteurs inertiels MEMS
- ▶ Collaborations avec TDK-Tronics Microsys., Asygn, iXblue, Onera
 - ▶ C. Le Blanc, N. Delorme (Asygn)
 - ▶ G. Papin, A. Filipe, Y. David (TDK Tronics Microsystems)
- ▶ **Budget 1ME**, 4 doctorants, 2 masters, 1 postdoc, 2 ing. de recherche, 2 étudiants 2A, (X. Bombois, G. Scorletti, L. Bako)
- ▶ Mon rôle : responsable Ampère
- ▶ **Thèse de M. Saggin**, Robust control for MEMS inertial sensors
- ▶ **Thèse de M. Ayala-Cuevas**, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models

Projet PSPC Next4MEMS (2016-2022)

- ▶ Financé par la BPI France
- ▶ Conception d'une nouvelle génération de capteurs inertiels MEMS
- ▶ Collaborations avec TDK-Tronics Microsys., Asygn, iXblue, Onera
 - ▶ C. Le Blanc, N. Delorme (Asygn)
 - ▶ G. Papin, A. Filipe, Y. David (TDK Tronics Microsystems)
- ▶ **Budget 1ME**, 4 doctorants, 2 masters, 1 postdoc, 2 ing. de recherche, 2 étudiants 2A, (X. Bombois, G. Scorletti, L. Bako)
- ▶ Mon rôle : responsable Ampère
- ▶ Thèse de M. Saggin, Robust control for MEMS inertial sensors
- ▶ Thèse de M. Ayala-Cuevas, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models

Projet PSPC Next4MEMS (2016-2022)

- ▶ Financé par la BPI France
- ▶ Conception d'une nouvelle génération de capteurs inertiels MEMS
- ▶ Collaborations avec TDK-Tronics Microsys., Asygn, iXblue, Onera
 - ▶ C. Le Blanc, N. Delorme (Asygn)
 - ▶ G. Papin, A. Filipe, Y. David (TDK Tronics Microsystems)
- ▶ Budget 1ME, 4 doctorants, 2 masters, 1 postdoc, 2 ing. de recherche, 2 étudiants 2A, (X. Bombois, G. Scorletti, L. Bako)
- ▶ Mon rôle : responsable Ampère
- ▶ Thèse de M. Saggin, Robust control for MEMS inertial sensors
- ▶ Thèse de M. Ayala-Cuevas, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models

Projet PSPC Next4MEMS (2016-2022)

- ▶ Financé par la BPI France
- ▶ Conception d'une nouvelle génération de capteurs inertiels MEMS
- ▶ Collaborations avec TDK-Tronics Microsys., Asygn, iXblue, Onera
 - ▶ C. Le Blanc, N. Delorme (Asygn)
 - ▶ G. Papin, A. Filipe, Y. David (TDK Tronics Microsystems)
- ▶ **Budget 1ME**, 4 doctorants, 2 masters, 1 postdoc, 2 ing. de recherche, 2 étudiants 2A, (X. Bombois, G. Scorletti, L. Bako)
- ▶ Mon rôle : responsable Ampère
- ▶ Thèse de M. Saggin, Robust control for MEMS inertial sensors
- ▶ Thèse de M. Ayala-Cuevas, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models

Projet PSPC Next4MEMS (2016-2022)

- ▶ Financé par la BPI France
- ▶ Conception d'une nouvelle génération de capteurs inertiels MEMS
- ▶ Collaborations avec TDK-Tronics Microsys., Asygn, iXblue, Onera
 - ▶ C. Le Blanc, N. Delorme (Asygn)
 - ▶ G. Papin, A. Filipe, Y. David (TDK Tronics Microsystems)
- ▶ **Budget 1ME**, 4 doctorants, 2 masters, 1 postdoc, 2 ing. de recherche, 2 étudiants 2A, (X. Bombois, G. Scorletti, L. Bako)
- ▶ Mon rôle : responsable Ampère
- ▶ Thèse de M. Saggin, Robust control for MEMS inertial sensors
- ▶ Thèse de M. Ayala-Cuevas, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models

Projet PSPC Next4MEMS (2016-2022)

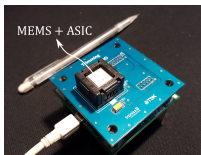
- ▶ Financé par la BPI France
- ▶ Conception d'une nouvelle génération de capteurs inertiels MEMS
- ▶ Collaborations avec TDK-Tronics Microsys., Asygn, iXblue, Onera
 - ▶ C. Le Blanc, N. Delorme (Asygn)
 - ▶ G. Papin, A. Filipe, Y. David (TDK Tronics Microsystems)
- ▶ **Budget 1ME**, 4 doctorants, 2 masters, 1 postdoc, 2 ing. de recherche, 2 étudiants 2A, (X. Bombois, G. Scorletti, L. Bako)
- ▶ Mon rôle : responsable Ampère
- ▶ **Thèse de M. Saggin**, Robust control for MEMS inertial sensors
- ▶ **Thèse de M. Ayala-Cuevas**, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models

Projet PSPC Next4MEMS (2016-2022)

- ▶ Financé par la BPI France
- ▶ Conception d'une nouvelle génération de capteurs inertiels MEMS
- ▶ Collaborations avec TDK-Tronics Microsys., Asygn, iXblue, Onera
 - ▶ C. Le Blanc, N. Delorme (Asygn)
 - ▶ G. Papin, A. Filipe, Y. David (TDK Tronics Microsystems)
- ▶ **Budget 1ME**, 4 doctorants, 2 masters, 1 postdoc, 2 ing. de recherche, 2 étudiants 2A, (X. Bombois, G. Scorletti, L. Bako)
- ▶ Mon rôle : responsable Ampère
- ▶ **Thèse de M. Saggin**, Robust control for MEMS inertial sensors
- ▶ **Thèse de M. Ayala-Cuevas**, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models

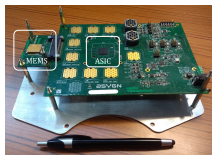
Projet PSPC Next4MEMS (2016-2022)

- ▶ Financé par la BPI France
- ▶ Conception d'une nouvelle génération de capteurs inertiels MEMS
- ▶ Collaborations avec TDK-Tronics Microsys., Asygn, iXblue, Onera
 - ▶ C. Le Blanc, N. Delorme (Asygn)
 - ▶ G. Papin, A. Filipe, Y. David (TDK Tronics Microsystems)
- ▶ **Budget 1ME**, 4 doctorants, 2 masters, 1 postdoc, 2 ing. de recherche, 2 étudiants 2A, (X. Bombois, G. Scorletti, L. Bako)
- ▶ Mon rôle : responsable Ampère
- ▶ **Thèse de M. Saggin**, Robust control for MEMS inertial sensors
- ▶ **Thèse de M. Ayala-Cuevas**, Performance validation of MEMS sensors using uncertain and time-varying models



Plateforme dédiée
(*industrialisation à court terme*)

tronics
microsystems

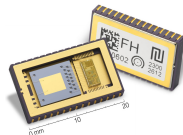


Plateforme flexible
(*industrialisation à moyen et long terme*)

ASYGN

Problématique : Capteurs résonnants MEMS

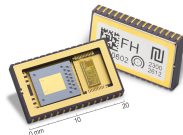
- ▶ MEMS gyromètres, accéléromètres, etc.



www.ledauphine.com/...

Problématique : Capteurs résonnants MEMS

- ▶ MEMS gyromètres, accéléromètres, etc.
- ▶ Utilisation de plus en plus large → Précision ↗



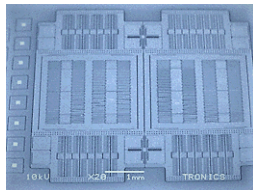
[www.ledauphine.com/...](http://www.ledauphine.com/)



[www.smartphonedomain.com/...](http://www.smartphonedomain.com/)



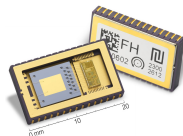
www.wired.com/story...



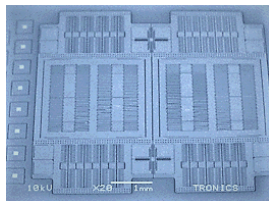
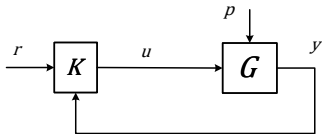
Élément sensible de capteur Tronics

Problématique : Capteurs résonnants MEMS

- ▶ MEMS gyromètres, accéléromètres, etc.
- ▶ Utilisation de plus en plus large → Précision ↗
- ▶ Mesure en boucle fermée → Automatique



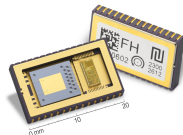
[www.ledauphine.com/...](http://www.ledauphine.com/)



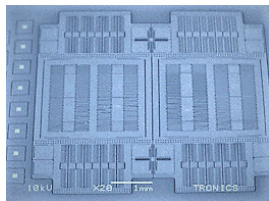
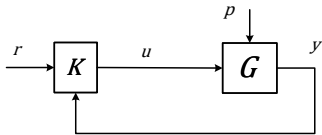
Élément sensible de capteur Tronics

Problématique : Capteurs résonnants MEMS

- ▶ MEMS gyromètres, accéléromètres, etc.
- ▶ Utilisation de plus en plus large → Précision ↗
- ▶ Mesure en boucle fermée → Automatique
- ▶ Contrôle de vibrations : $y(t) \rightarrow A_r \sin(\omega_0 t)$



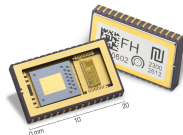
[www.ledauphine.com/...](http://www.ledauphine.com/)



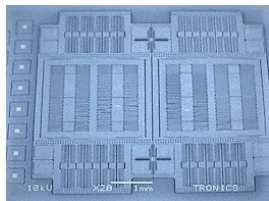
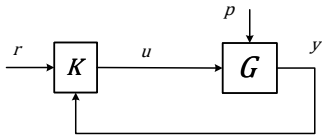
Élément sensible de capteur Tronics

Problématique : Capteurs résonnants MEMS

- ▶ MEMS gyromètres, accéléromètres, etc.
- ▶ Utilisation de plus en plus large → Précision ↗
- ▶ Mesure en boucle fermée → Automatique
- ▶ Contrôle de vibrations : $y(t) \rightarrow A_r \sin(\omega_0 t)$
- ▶ Fortes contraintes d'implémentation



[www.ledauphine.com/...](http://www.ledauphine.com/)



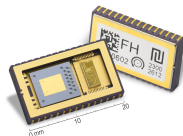
Élément sensible de capteur Tronics

Problématique : Capteurs résonnants MEMS

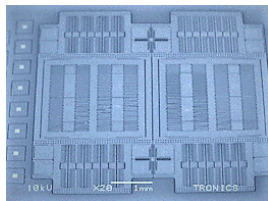
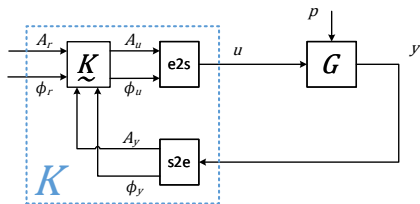
- ▶ MEMS gyromètres, accéléromètres, etc.
- ▶ Utilisation de plus en plus large → Précision ↗
- ▶ Mesure en boucle fermée → Automatique
- ▶ Contrôle de vibrations : $y(t) \rightarrow A_r \sin(\omega_0 t)$
- ▶ Fortes contraintes d'implémentation
- ▶ Commande directe → ... **des enveloppes**

$$y(t) = A_y(t) \sin(\phi_y(t))$$

$$A_y(t) \rightarrow A_r, \quad \phi_y(t) \rightarrow \omega_0 t$$



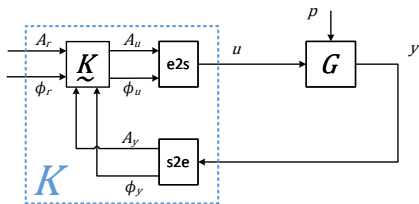
[www.ledauphine.com/...](http://www.ledauphine.com/)



Élément sensible de capteur Tronics

Méthodes de conception existantes

- ▶ Commande des enveloppes : $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_{Ph}(t))$
- ▶ Modulation/démodulation synchrone
- ▶ Manque de méthodes maîtrisées et exploitables
- ▶ Méthodes heuristiques de conception appliquées avec succès !

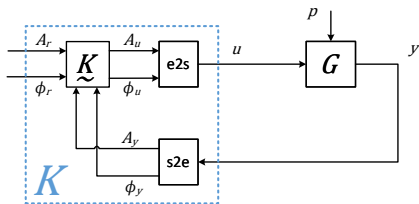


Nos contributions :

- ▶ Méthodes de conception maîtrisées et systématiques
- ▶ Prise en compte de non-idéalités

Méthodes de conception existantes

- ▶ Commande des enveloppes : $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_{Ph}(t))$
- ▶ Modulation/démodulation synchrone
- ▶ Manque de méthodes maîtrisées et exploitables
- ▶ Méthodes heuristiques de conception appliquées avec succès !

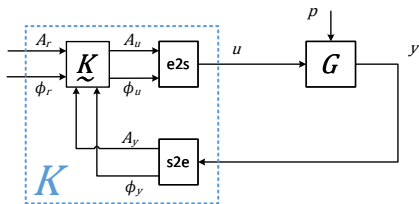


Nos contributions :

- ▶ Méthodes de conception maîtrisées et systématiques
- ▶ Prise en compte de non-idéalités

Méthodes de conception existantes

- ▶ Commande des enveloppes : $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_{Ph}(t))$
- ▶ Modulation/démodulation synchrone
- ▶ Manque de méthodes maîtrisées et exploitables
- ▶ Méthodes heuristiques de conception appliquées avec succès !

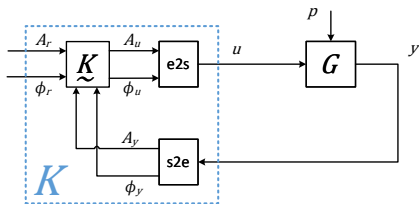


Nos contributions :

- ▶ Méthodes de conception maîtrisées et systématiques
- ▶ Prise en compte de non-idéalités

Méthodes de conception existantes

- ▶ Commande des enveloppes : $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_{Ph}(t))$
- ▶ Modulation/démodulation synchrone
- ▶ Manque de méthodes maîtrisées et exploitables
- ▶ Méthodes heuristiques de conception appliquées avec succès !

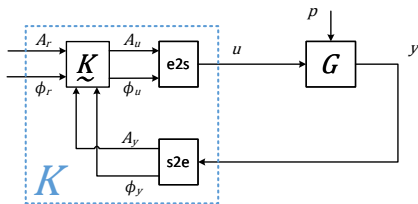


Nos contributions :

- ▶ Méthodes de conception maîtrisées et systématiques
- ▶ Prise en compte de non-idéalités

Méthodes de conception existantes

- ▶ Commande des enveloppes : $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_{Ph}(t))$
- ▶ Modulation/démodulation synchrone
- ▶ Manque de méthodes maîtrisées et exploitables
- ▶ Méthodes heuristiques de conception appliquées avec succès !

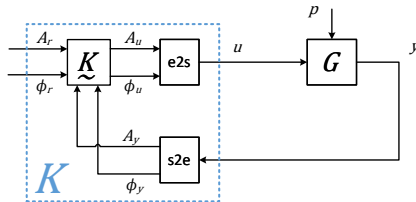


Nos contributions :

- ▶ Méthodes de conception maîtrisées et systématiques
- ▶ Prise en compte de non-idéalités

Méthodes de conception existantes

- ▶ Commande des enveloppes : $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_{Ph}(t))$
- ▶ Modulation/démodulation synchrone
- ▶ Manque de méthodes maîtrisées et exploitables
- ▶ Méthodes heuristiques de conception appliquées avec succès !

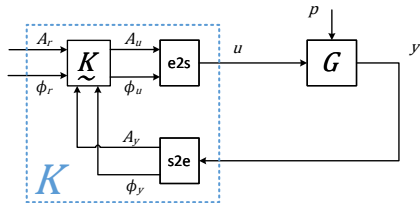


Nos contributions :

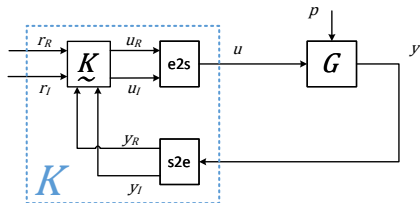
- ▶ Méthodes de conception maîtrisées et systématiques
- ▶ Prise en compte de non-idéalités

Synthèse : Thèse de M. Saggin

Comment développer les méthodes maîtrisées ?

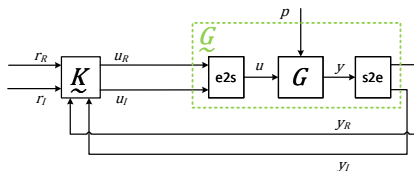


Comment développer les méthodes maîtrisées ?



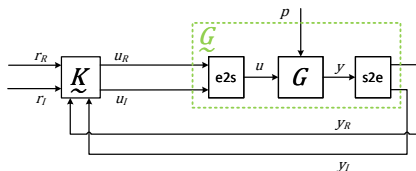
- ▶ Si $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_y(t)) \rightarrow y_{\Re}(t) \cos(\omega_0(t)t) - y_{\Im}(t) \sin(\omega_0(t)t)$

Comment développer les méthodes maîtrisées ?



- Si $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_y(t)) \rightarrow y_{\Re}(t) \cos(\omega_0(t)t) - y_{\Im}(t) \sin(\omega_0(t)t)$

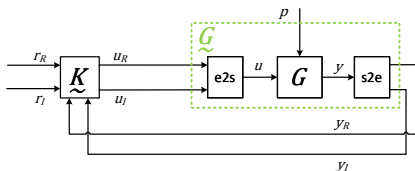
Comment développer les méthodes maîtrisées ?



- Si $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_y(t)) \rightarrow y_{\Re}(t) \cos(\omega_0(t)t) - y_{\Im}(t) \sin(\omega_0(t)t)$

$$G(s) \sim \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] \Rightarrow \tilde{G} \sim \left[\begin{array}{cc|cc} A & \omega_0(t)I_n & B & 0 \\ -\omega_0(t)I_n & A & 0 & B \\ \hline C & 0 & D & 0 \\ 0 & C & 0 & D \end{array} \right]$$

Comment développer les méthodes maîtrisées ?



- ▶ Si $y(t) = A_y(t) \sin(\phi_y(t)) \rightarrow y_{\Re}(t) \cos(\omega_0(t)t) - y_{\Im}(t) \sin(\omega_0(t)t)$

$$G(s) \sim \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] \Rightarrow \tilde{G} \sim \left[\begin{array}{cc|cc} A & \omega_0(t)I_n & B & 0 \\ -\omega_0(t)I_n & A & 0 & B \\ \hline C & 0 & D & 0 \\ 0 & C & 0 & D \end{array} \right]$$

- ▶ **Commande standard** LPV ($\omega_0(t)$) ou H_∞ ($\omega_0(t) = \omega_0^\infty$)

**Peut-on assurer le même niveau de performance
commande d'enveloppes \underline{K} VS. commande directe K ?**

**Peut-on assurer le même niveau de performance
commande d'enveloppes \underline{K} VS. commande directe K ?**

La réponse est **Oui** !

$$\exists K \text{ s.t. } \|P \star K\|_{i_2} < \gamma \quad \Leftrightarrow \quad \exists \underline{K} \text{ s.t. } \|\underline{P} \star \underline{K}\|_{i_2} < \gamma$$

**Peut-on assurer le même niveau de performance
commande d'enveloppes \underline{K} VS. commande directe K ?**

La réponse est **Oui** !

$$\exists K \text{ s.t. } \|P \star K\|_{i_2} < \gamma \quad \Leftrightarrow \quad \exists \underline{K} \text{ s.t. } \|\underline{P} \star \underline{K}\|_{i_2} < \gamma$$

Conséquences importantes :

1. Calcul du correcteur direct et transformation pour l'implémentation en commande des enveloppes
2. Pas de pénalité a priori au niveau de la performance atteignable

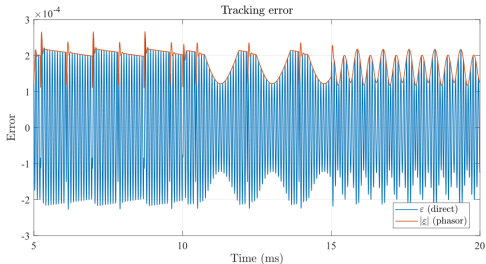
Exemple

- ▶ L'objectif est de concevoir un correcteur assurant un niveau de poursuite du signal harmonique : $r(t) = A_r \sin(\omega_0 t)$ avec $A_r = 1$
- ▶ **Commande directe** vs. **commande par enveloppes**

Exemple

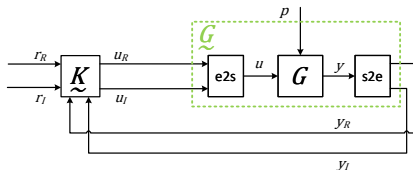
- ▶ L'objectif est de concevoir un correcteur assurant un niveau de poursuite du signal harmonique : $r(t) = A_r \sin(\omega_0 t)$ avec $A_r = 1$
- ▶ **Commande directe** vs. **commande par enveloppes**

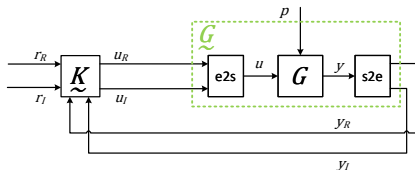
Erreur de poursuite :



Analyse : M. Ayala-Cuevas

Problèmes de stabilité !

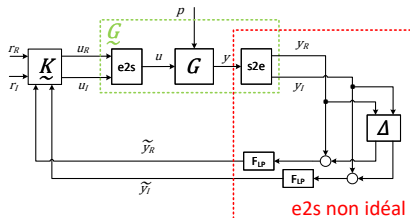




Problèmes de stabilité !

Prise en compte des imperfections de la Démodulation ?

Problèmes de stabilité !



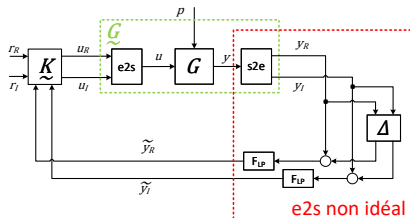
Prise en compte des imperfections de la Démodulation ?

1. Dynamique de filtre F_{LP} de démodulation synchrone
2. Gains harmoniques :

$$\Delta = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi) & -\sin(\omega_0 t + \phi) \\ -\sin(\omega_0 t + \phi) & -\cos(\omega_0 t + \phi) \end{bmatrix}$$

avec $\phi \in [0, 2\pi[$

Problèmes de stabilité !



Prise en compte des imperfections de la Démodulation ?

1. Dynamique de filtre F_{LP} de démodulation synchrone (possible de prendre en compte dès la synthèse)
2. Gains harmoniques :

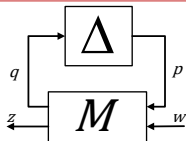
$$\Delta = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi) & -\sin(\omega_0 t + \phi) \\ -\sin(\omega_0 t + \phi) & -\cos(\omega_0 t + \phi) \end{bmatrix}$$

avec $\phi \in [0, 2\pi[$

Analyse de la robustesse par l'Approche IQC

Forme LFR $\Delta \star M$ avec

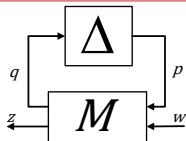
- ▶ M opérateur connu et donné
- ▶ Δ opérateur incertain : $\Delta \in \mathbf{\Delta}^{\omega_0}$



Analyse de la robustesse par l'Approche IQC

Forme LFR $\Delta \star M$ avec

- ▶ M opérateur connu et donné
- ▶ Δ opérateur incertain : $\Delta \in \mathbf{\Delta}^{\omega_0}$



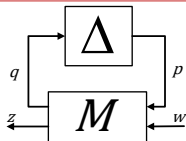
Tester la stabilité avec un **paramètre HV**

$$\forall \Delta \in \mathbf{\Delta}^{\omega_0} = \{ \theta^{\omega_0}(t) I_n \mid \exists \phi \in [0, 2\pi[, \theta^{\omega_0}(t) = \cos(\omega_0 t + \phi) \}$$

Analyse de la robustesse par l'Approche IQC

Forme LFR $\Delta \star M$ avec

- ▶ M opérateur connu et donné
- ▶ Δ opérateur incertain : $\Delta \in \mathbf{\Delta}$



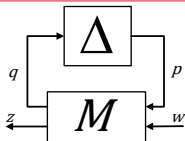
Problème général d'analyse de stabilité robuste,
pour $\forall \Delta \in \mathbf{\Delta}$

$$\sigma(s, e, \Pi) \geq 0$$

Analyse de la robustesse par l'Approche IQC

Forme LFR $\Delta \star M$ avec

- ▶ M opérateur connu et donné
- ▶ Δ opérateur incertain : $\Delta \in \mathbf{\Delta}$



Problème général d'analyse de stabilité robuste,
pour $\forall \Delta \in \mathbf{\Delta}$

$$\sigma(s, e, \Pi) \geq 0$$

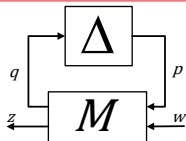
$$\sigma(s, e, \Pi) = \int_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} s(j\omega) \\ e(j\omega) \end{bmatrix}^* \underbrace{\begin{bmatrix} \Pi^{11}(j\omega) & \Pi^{12}(j\omega) \\ \Pi^{21}(j\omega) & \Pi^{22}(j\omega) \end{bmatrix}}_{\Pi(j\omega)} \begin{bmatrix} s(j\omega) \\ e(j\omega) \end{bmatrix} d\omega \geq 0$$

Contrainte Quadratique Intégrale (IQC)

Analyse de la robustesse par l'Approche IQC

Forme LFR $\Delta \star M$ avec

- ▶ M opérateur connu et donné
- ▶ Δ opérateur incertain : $\Delta \in \mathbf{\Delta}$



Problème général d'analyse de stabilité robuste,
pour $\forall \Delta \in \mathbf{\Delta}$

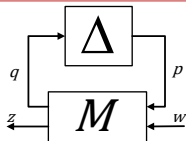
$$\sigma(s, e, \Pi) \geq 0$$

- ▶ Soit un ensemble Π_{Δ} : tel que $\sigma(\Delta(q), q, \Pi) \geq 0 \forall \Delta \in \mathbf{\Delta}, \forall \Pi \in \Pi_{\Delta}$

Analyse de la robustesse par l'Approche IQC

Forme LFR $\Delta \star M$ avec

- ▶ M opérateur connu et donné
- ▶ Δ opérateur incertain : $\Delta \in \mathbf{\Delta}$



Problème général d'analyse de stabilité robuste,
pour $\forall \Delta \in \mathbf{\Delta}$

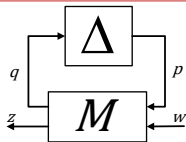
$$\sigma(s, e, \Pi) \geq 0$$

- ▶ Soit un ensemble $\mathbf{\Pi}_{\Delta}$: tel que $\sigma(\Delta(q), q, \Pi) \geq 0 \forall \Delta \in \mathbf{\Delta}, \forall \Pi \in \mathbf{\Pi}_{\Delta}$
- ▶ Alors $\sigma(p, M_{11}(p), \Pi + \epsilon I) \leq 0$ pour une $\Pi \in \mathbf{\Pi}_{\Delta} \Rightarrow$ Stabilité

Analyse de la robustesse par l'Approche IQC

Forme LFR $\Delta \star M$ avec

- ▶ M opérateur connu et donné
- ▶ Δ opérateur incertain : $\Delta \in \mathbf{\Delta}$



Problème général d'analyse de stabilité robuste,
pour $\forall \Delta \in \mathbf{\Delta}$

$$\sigma(s, e, \Pi) \geq 0$$

- ▶ Soit un ensemble $\mathbf{\Pi}_{\Delta}$: tel que $\sigma(\Delta(q), q, \Pi) \geq 0 \forall \Delta \in \mathbf{\Delta}, \forall \Pi \in \mathbf{\Pi}_{\Delta}$
- ▶ Alors $\sigma(p, M_{11}(p), \Pi + \epsilon I) \leq 0$ pour une $\Pi \in \mathbf{\Pi}_{\Delta} \Rightarrow$ Stabilité

1. Conditions suffisantes
2. Le choix de l'ensemble $\mathbf{\Pi}_{\Delta}$ est crucial
 - ▶ Riche
 - ▶ Paramétrisation affine en variables de décision \Rightarrow Optimisation LMI

Paramétrisation pour paramètre HV

$$\Delta^{\omega_0} = \left\{ \theta^{\omega_0} I_{n_q} \mid \exists \phi \in [0, 2\pi[, \forall t, \theta^{\omega_0}(t) = \cos(\omega_0 t + \phi) \right\}$$

Δ_{TV} : paramètre variant	Δ_{TI} : paramètre incertain constant
$\forall t, \delta(t) \leq 1$	$\delta \in \mathbb{R}, \delta \leq 1$
$\Pi_{TV} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D / D = D^T > 0, \\ \exists G / G = -G^T, \\ \Pi_{TV} = \begin{bmatrix} -D & G \\ G^T & D \end{bmatrix} \end{array} \right\}$	$\Pi_{TI} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D(j\omega) / D(j\omega) = D(j\omega)^* > 0, \\ \exists G(j\omega) / G(j\omega) = -G(j\omega)^*, \\ \Pi_{TI}(j\omega) = \begin{bmatrix} -D(j\omega) & G(j\omega) \\ G(j\omega)^* & D(j\omega) \end{bmatrix} \end{array} \right\}$

$$\Delta^{\omega_0} \subset \Delta_{TV}$$

Paramétrisation similaire, mais pour $\Delta_{\theta}^{\omega_0}$?

Paramétrisation pour paramètre HV

$$\Delta^{\omega_0} = \left\{ \theta^{\omega_0} I_{n_q} \mid \exists \phi \in [0, 2\pi[, \forall t, \theta^{\omega_0}(t) = \cos(\omega_0 t + \phi) \right\}$$

Δ_{TV} : paramètre variant	Δ_{TI} : paramètre incertain constant
$\forall t, \delta(t) \leq 1$	$\delta \in \mathbb{R}, \delta \leq 1$
$\Pi_{TV} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D / D = D^T > 0, \\ \exists G / G = -G^T, \\ \Pi_{TV} = \begin{bmatrix} -D & G \\ G^T & D \end{bmatrix} \end{array} \right\}$	$\Pi_{TI} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D(j\omega) / D(j\omega) = D(j\omega)^* > 0, \\ \exists G(j\omega) / G(j\omega) = -G(j\omega)^*, \\ \Pi_{TI}(j\omega) = \begin{bmatrix} -D(j\omega) & G(j\omega) \\ G(j\omega)^* & D(j\omega) \end{bmatrix} \end{array} \right\}$

$$\Delta^{\omega_0} \subset \Delta_{TV}$$

et

$$\Delta^0 = \Delta_{TI}$$

Paramétrisation similaire, mais pour $\Delta_{\theta}^{\omega_0}$?

Paramétrisation pour paramètre HV

$$\Delta^{\omega_0} = \left\{ \theta^{\omega_0} I_{n_q} \mid \exists \phi \in [0, 2\pi[, \forall t, \theta^{\omega_0}(t) = \cos(\omega_0 t + \phi) \right\}$$

Δ_{TV} : paramètre variant	Δ_{TI} : paramètre incertain constant
$\forall t, \delta(t) \leq 1$ $\Pi_{TV} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D / D = D^T > 0, \\ \exists G / G = -G^T, \\ \Pi_{TV} = \begin{bmatrix} -D & G \\ G^T & D \end{bmatrix} \end{array} \right\}$	$\delta \in \mathbb{R}, \delta \leq 1$ $\Pi_{TI} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D(j\omega) / D(j\omega) = D(j\omega)^* > 0, \\ \exists G(j\omega) / G(j\omega) = -G(j\omega)^*, \\ \Pi_{TI}(j\omega) = \begin{bmatrix} -D(j\omega) & G(j\omega) \\ G(j\omega)^* & D(j\omega) \end{bmatrix} \end{array} \right\}$

$$\Delta^{\omega_0} \subset \Delta_{TV}$$

et

$$\Delta^0 = \Delta_{TI}$$

Paramétrisation similaire, mais pour $\Delta_{\theta}^{\omega_0}$?

Paramétrisation pour paramètre HV

$$\Delta^{\omega_0} = \left\{ \theta^{\omega_0} I_{n_q} \mid \exists \phi \in [0, 2\pi[, \forall t, \theta^{\omega_0}(t) = \cos(\omega_0 t + \phi) \right\}$$

Δ_{TV} : paramètre variant	Δ_{TI} : paramètre incertain constant
$\forall t, \delta(t) \leq 1$ $\Pi_{TV} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D / D = D^T \succ 0, \\ \exists G / G = -G^T, \\ \Pi_{TV} = \begin{bmatrix} -D & G \\ G^T & D \end{bmatrix} \end{array} \right\}$	$\delta \in \mathbb{R}, \delta \leq 1$ $\Pi_{TI} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D(j\omega) / D(j\omega) = D(j\omega)^* \succ 0, \\ \exists G(j\omega) / G(j\omega) = -G(j\omega)^*, \\ \Pi_{TI}(j\omega) = \begin{bmatrix} -D(j\omega) & G(j\omega) \\ G(j\omega)^* & D(j\omega) \end{bmatrix} \end{array} \right\}$

$$\Delta^{\omega_0} \subset \Delta_{TV}$$

et

$$\Delta^0 = \Delta_{TI}$$

Paramétrisation similaire, mais pour $\Delta_{\theta}^{\omega_0}$?

Paramétrisation pour paramètre HV

$$\Delta^{\omega_0} = \left\{ \theta^{\omega_0} I_{n_q} \mid \exists \phi \in [0, 2\pi[, \forall t, \theta^{\omega_0}(t) = \cos(\omega_0 t + \phi) \right\}$$

Δ_{TV} : paramètre variant	Δ_{TI} : paramètre incertain constant
$\forall t, \delta(t) \leq 1$ $\Pi_{TV} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D / D = D^T \succ 0, \\ \exists G / G = -G^T, \\ \Pi_{TV} = \begin{bmatrix} -D & G \\ G^T & D \end{bmatrix} \end{array} \right\}$	$\delta \in \mathbb{R}, \delta \leq 1$ $\Pi_{TI} = \left\{ \begin{array}{l} \exists D(j\omega) / D(j\omega) = D(j\omega)^* \succ 0, \\ \exists G(j\omega) / G(j\omega) = -G(j\omega)^*, \\ \Pi_{TI}(j\omega) = \begin{bmatrix} -D(j\omega) & G(j\omega) \\ G(j\omega)^* & D(j\omega) \end{bmatrix} \end{array} \right\}$

$$\Delta^{\omega_0} \subset \Delta_{TV}$$

et

$$\Delta^0 = \Delta_{TI}$$

Paramétrisation similaire, mais pour $\Delta_{\theta}^{\omega_0}$?

Paramétrisation pour paramètre HV

[Megretski and Rantzer, 1997]

$$\Pi = \begin{bmatrix} -2D(j\omega) & 0 \\ 0 & D(j(\omega + \omega_0)) + D(j(\omega - \omega_0)) \end{bmatrix}$$

Paramétrisation pour paramètre HV

[Megretski and Rantzer, 1997]

$$\Pi = \begin{bmatrix} -2D(j\omega) & 0 \\ 0 & D(j(\omega + \omega_0)) + D(j(\omega - \omega_0)) \end{bmatrix}$$

Nos contributions :

- ▶ Démonstration : $\mathcal{F}[e^{j\omega_0 t} q(\cdot)](j\omega) = \hat{q}(j(\omega - \omega_0))$

Paramétrisation pour paramètre HV

[Megretski and Rantzer, 1997]

$$\Pi = \begin{bmatrix} -2D(j\omega) & 0 \\ 0 & D(j(\omega + \omega_0)) + D(j(\omega - \omega_0)) \end{bmatrix}$$

Nos contributions :

- ▶ Démonstration : $\mathcal{F}[e^{j\omega_0 t} q(\cdot)](j\omega) = \hat{q}(j(\omega - \omega_0))$
- ▶ Amélioration de la paramétrisation :

$$\Pi = \begin{bmatrix} -2D(j\omega) & G(j\omega) \\ G(j\omega)^* & D(j(\omega + \omega_0)) + D(j(\omega - \omega_0)) \end{bmatrix}, \quad G(j\omega) = -G(j(\omega + \omega_0))^*$$

Paramétrisation pour paramètre HV

[Megretski and Rantzer, 1997]

$$\Pi = \begin{bmatrix} -2D(j\omega) & 0 \\ 0 & D(j(\omega + \omega_0)) + D(j(\omega - \omega_0)) \end{bmatrix}$$

Nos contributions :

- ▶ Démonstration : $\mathcal{F}[e^{j\omega_0 t} q(\cdot)](j\omega) = \hat{q}(j(\omega - \omega_0))$
- ▶ Amélioration de la paramétrisation :

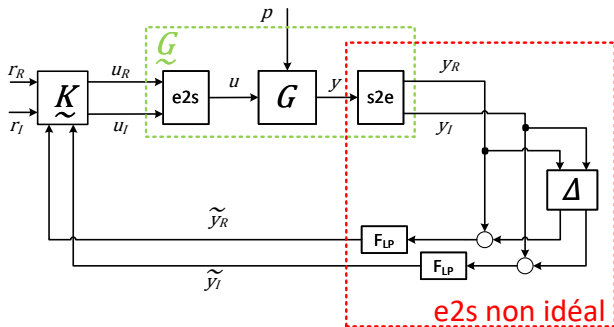
$$\Pi = \begin{bmatrix} -2D(j\omega) & G(j\omega) \\ G(j\omega)^* & D(j(\omega + \omega_0)) + D(j(\omega - \omega_0)) \end{bmatrix}, \quad G(j\omega) = -G(j(\omega + \omega_0))^*$$

- ▶ **Généralisation d'autres paramétrisations**

$$\Pi_{TV} = \begin{bmatrix} -D & G \\ G^T & D \end{bmatrix}$$

$$\Pi_{TI}(j\omega) = \begin{bmatrix} -D(j\omega) & G(j\omega) \\ G(j\omega)^* & D(j\omega) \end{bmatrix}$$

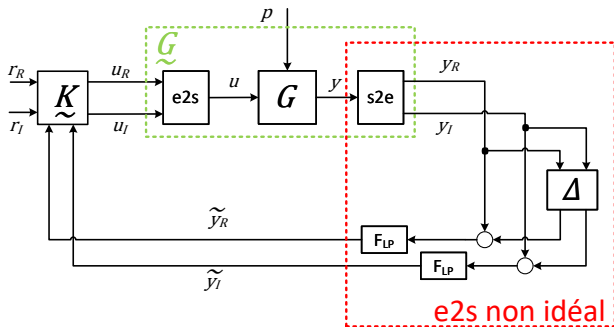
Exemple : Stabilité avec démodulation non idéale



Modèle :

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi) l_2 & 0 \\ 0 & \sin(\omega_0 t + \phi) l_2 \end{bmatrix} * \tilde{G}$$

Exemple : Stabilité avec démodulation non idéale



Modèle :

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi) l_2 & 0 \\ 0 & \sin(\omega_0 t + \phi) l_2 \end{bmatrix} * \tilde{G}$$

Extension de la paramétrisation

Exemple : Stabilité avec démodulation non idéale

Paramétrisation	Δ^{ω_0} avec $\phi_1, \phi_2 \in [0, 2\pi[$
Π_{TV} : deux PV	$\begin{bmatrix} \theta_1(t)l_2 & 0 \\ 0 & \theta_2(t)l_2 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \theta_1 \leq 1 \\ \theta_2 \leq 1 \end{array}$
Π^{ω_0} : deux PHV	$\begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi_1)l_2 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_0 t + \phi_2)l_2 \end{bmatrix}$
$\Pi_{SD}^{\omega_0}$: deux PHV couplés	$\begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi_1)l_2 & 0 \\ 0 & \sin(\omega_0 t + \phi_1)l_2 \end{bmatrix}$

Problème d'analyse :

- ▶ On remplace Δ^{ω_0} par $\alpha\Delta^{\omega_0}$, $|\alpha| \geq 0$
- ▶ $\alpha = 0 \rightarrow$ cas nominal/idéal \rightarrow Stabilité garantie
- ▶ $\exists \alpha^* = 5.1 \rightarrow$ Instabilité
- ▶ $\alpha^* - \alpha_{max}$ faible \leftrightarrow \downarrow conservatisme

Exemple : Stabilité avec démodulation non idéale

Paramétrisation	Δ^{ω_0} avec $\phi_1, \phi_2 \in [0, 2\pi[$
Π_{TV} : deux PV	$\begin{bmatrix} \theta_1(t)l_2 & 0 \\ 0 & \theta_2(t)l_2 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \theta_1 \leq 1 \\ \theta_2 \leq 1 \end{array}$
Π^{ω_0} : deux PHV	$\begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi_1)l_2 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_0 t + \phi_2)l_2 \end{bmatrix}$
$\Pi_{SD}^{\omega_0}$: deux PHV couplés	$\begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi_1)l_2 & 0 \\ 0 & \sin(\omega_0 t + \phi_1)l_2 \end{bmatrix}$

Problème d'analyse :

- ▶ On remplace Δ^{ω_0} par $\alpha\Delta^{\omega_0}$, $|\alpha| \geq 0$
- ▶ $\alpha = 0 \rightarrow$ cas nominal/idéal \rightarrow Stabilité garantie
- ▶ $\exists \alpha^* = 5.1 \rightarrow$ Instabilité
- ▶ $\alpha^* - \alpha_{max}$ faible $\leftrightarrow \downarrow$ conservatisme

Exemple : Stabilité avec démodulation non idéale

Résultats :

Paramétrisation	α max (seul D)	α max (avec D et G)
Π_{TV} : deux PV	0.29 (5.7%)	0.29 (5.7%)
Π^{ω_0} : deux HV	1.16 (22.7%)	3.52 (68.9%)
$\Pi_{SD}^{\omega_0}$: HV couplés	1.17 (22.9%)	4.77 (93.4%)
Simulation	≈ 5.10	≈ 5.10

- ▶ G permet de réduire le *conservatisme*
- ▶ Π_{TV} : la plus *conservative*
- ▶ $\Pi_{SD}^{\omega_0}$ moins *conservative* que Π^{ω_0} → Importance de déphasage

Liste d'exemples concrets

- ▶ Barycentre sur l'application d'aujourd'hui
 1. Analyse de la Robustesse de circuits
 2. Conception de PLLs
 3. Commande de vibrations
 4. Conception de capteurs résonnants MEMS

- ▶ Barycentre sur la méthodologie :
 1. Commande décentralisée Multi-Agents
 2. Analyse hiérarchique de la robustesse
 3. Synthèse LFR de filtres fréquentiels

Commande Robuste pour la conception

Liste d'exemples concrets

- ▶ Barycentre sur l'application d'aujourd'hui
 1. Analyse de la Robustesse de circuits
 2. Conception de PLLs
 3. Commande de vibrations
 4. Conception de capteurs résonnants MEMS

- ▶ Barycentre sur la méthodologie :
 1. Commande décentralisée Multi-Agents
 2. Analyse hiérarchique de la robustesse
 3. Synthèse LFR de filtres fréquentiels

Projet ARC6 TIC

- ▶ **Commande Robuste pour la Conception de filtres BAW (2016-2019)**
- ▶ **Financé par la Région Auvergne-Rhône-Alpes**
- ▶ Collaborations avec
 - ▶ M. Zarudniev, J.-B. David (CEA, Grenoble)
 - ▶ I. O'Connor (INL)
- ▶ 1 doctorant, 2 stages (2A et 3A) (H. Omran, G. Scorletti)
- ▶ Mon rôle : Porteur et responsable Ampère
- ▶ **Thèse de A. Perodou**, Frequency Design of Passive Electronic Filters : a Modern System Approach

Projet ARC6 TIC

- ▶ Commande Robuste pour la Conception de filtres BAW (2016-2019)
- ▶ Financé par la Région Auvergne-Rhône-Alpes
- ▶ Collaborations avec
 - ▶ M. Zarudniev, J.-B. David (CEA, Grenoble)
 - ▶ I. O'Connor (INL)
- ▶ 1 doctorant, 2 stages (2A et 3A) (H. Omran, G. Scorletti)
- ▶ Mon rôle : Porteur et responsable Ampère
- ▶ **Thèse de A. Perodou**, Frequency Design of Passive Electronic Filters : a Modern System Approach

Projet ARC6 TIC

- ▶ Commande Robuste pour la Conception de filtres BAW (2016-2019)
- ▶ Financé par la Région Auvergne-Rhône-Alpes
- ▶ Collaborations avec
 - ▶ M. Zarudniev, J.-B. David (CEA, Grenoble)
 - ▶ I. O'Connor (INL)
- ▶ 1 doctorant, 2 stages (2A et 3A) (H. Omran, G. Scorletti)
- ▶ Mon rôle : Porteur et responsable Ampère
- ▶ Thèse de A. Perodou, Frequency Design of Passive Electronic Filters : a Modern System Approach

Projet ARC6 TIC

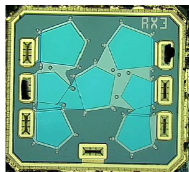
- ▶ Commande Robuste pour la Conception de filtres BAW (2016-2019)
- ▶ Financé par la Région Auvergne-Rhône-Alpes
- ▶ Collaborations avec
 - ▶ M. Zarudniev, J.-B. David (CEA, Grenoble)
 - ▶ I. O'Connor (INL)
- ▶ 1 doctorant, 2 stages (2A et 3A) (H. Omran, G. Scorletti)
- ▶ Mon rôle : Porteur et responsable Ampère
- ▶ Thèse de A. Perodou, Frequency Design of Passive Electronic Filters : a Modern System Approach

Projet ARC6 TIC

- ▶ Commande Robuste pour la Conception de filtres BAW (2016-2019)
- ▶ Financé par la Région Auvergne-Rhône-Alpes
- ▶ Collaborations avec
 - ▶ M. Zarudniev, J.-B. David (CEA, Grenoble)
 - ▶ I. O'Connor (INL)
- ▶ 1 doctorant, 2 stages (2A et 3A) (H. Omran, G. Scorletti)
- ▶ Mon rôle : Porteur et responsable Ampère
- ▶ **Thèse de A. Perodou**, Frequency Design of Passive Electronic Filters : a Modern System Approach

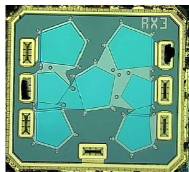
Problématique : Synthèse de Filtre passifs

- ▶ Filtres fréquentiels passifs

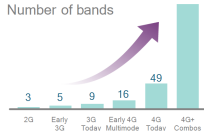


Problématique : Synthèse de Filtre passifs

- ▶ Filtres fréquentiels passifs
- ▶ Augmentation exponentielle en télécommunication, 3G,4G,5G....

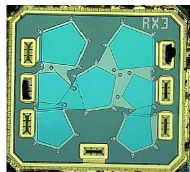


Number of bands

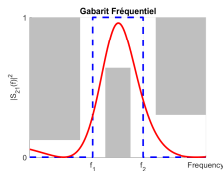
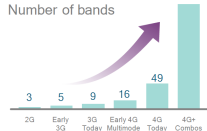


Problématique : Synthèse de Filtre passifs

- ▶ Filtres fréquentiels passifs
- ▶ Augmentation exponentielle en télécommunication, 3G,4G,5G....
- ▶ Performance + exigeante (bande passante, taille, prix)

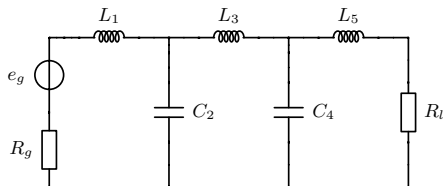


Number of bands

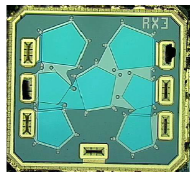


Problématique : Synthèse de Filtre passifs

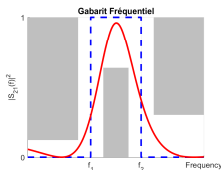
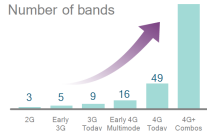
- ▶ Filtres fréquentiels passifs
- ▶ Augmentation exponentielle en télécommunication, 3G,4G,5G....
- ▶ Performance + exigeante (bande passante, taille, prix)
- ▶ Technologie + avancée, résonateurs



$$H(s) = \left(\frac{1}{s} \cdot I\right) \star \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] = \frac{b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{s} + \dots + b_m \cdot \left(\frac{1}{s}\right)^m}{a_0 + a_1 \cdot \frac{1}{s} + \dots + a_n \cdot \left(\frac{1}{s}\right)^n}$$

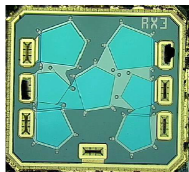


Number of bands

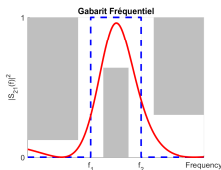
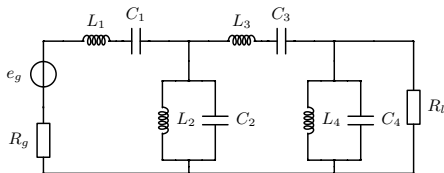
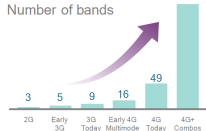


Problématique : Synthèse de Filtre passifs

- ▶ Filtres fréquentiels passifs
- ▶ Augmentation exponentielle en télécommunication, 3G,4G,5G....
- ▶ Performance + exigeante (bande passante, taille, prix)
- ▶ Technologie + avancée, résonateurs



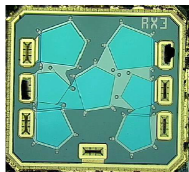
Number of bands



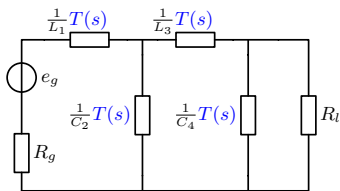
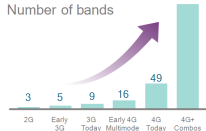
$$H(T(s)) = (T(s) \cdot I) \star \left[\frac{A}{C} \middle| \frac{B}{D} \right] = \frac{b_0 + b_1 \cdot T(s) + \dots + b_m \cdot T(s)^m}{a_0 + a_1 \cdot T(s) + \dots + a_n \cdot T(s)^n}, \text{ avec } T(s) = \frac{s}{s^2 + \omega_0^2}$$

Problématique : Synthèse de Filtre passifs

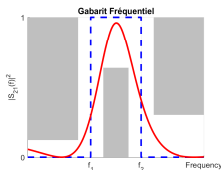
- ▶ Filtres fréquentiels passifs
- ▶ Augmentation exponentielle en télécommunication, 3G,4G,5G....
- ▶ Performance + exigeante (bande passante, taille, prix)
- ▶ Technologie + avancée, résonateurs



Number of bands

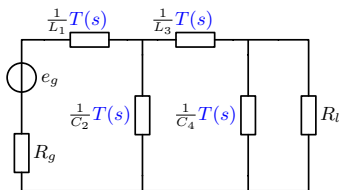


$$H(T(s)) = (T(s) \cdot I) \star \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] = \frac{b_0 + b_1 \cdot T(s) + \dots + b_m \cdot T(s)^m}{a_0 + a_1 \cdot T(s) + \dots + a_n \cdot T(s)^n}, \text{ avec } T(s) = \frac{s}{s^2 + \omega_0^2}$$

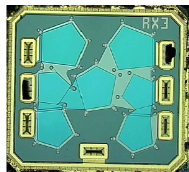


Problématique : Synthèse de Filtre passifs

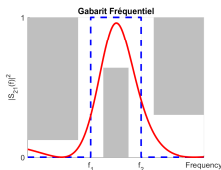
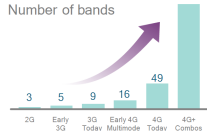
- ▶ Filtres fréquentiels passifs
- ▶ Augmentation exponentielle en télécommunication, 3G,4G,5G....
- ▶ Performance + exigeante (bande passante, taille, prix)
- ▶ Technologie + avancée, résonateurs
- ▶ **Manque de méthodes systématiques et maîtrisées**



$$H(T(s)) = (T(s) \cdot I) \star \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] = \frac{b_0 + b_1 \cdot T(s) + \dots + b_m \cdot T(s)^m}{a_0 + a_1 \cdot T(s) + \dots + a_n \cdot T(s)^n}, \text{ avec } T(s) = \frac{s}{s^2 + \omega_0^2}$$

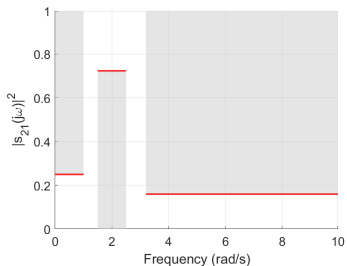
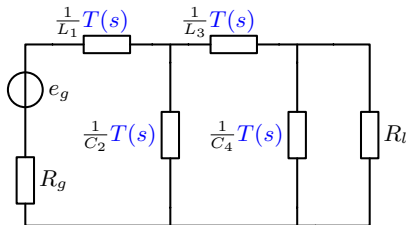


Number of bands



Formulation du problème

Concevoir un circuit : pour un $T(s)$ donné, trouver les valeurs L_i et C_j



telles que

$$s_{21}(s) = H(T(s)) \quad \text{assurant} \quad \begin{cases} \forall \omega \in \Omega^U, M(T(j\omega)) \leq U^2 \\ \forall \omega \in \Omega^L, M(T(j\omega)) \geq L^2 \end{cases}$$

$$M(T(j\omega)) = |H(T(j\omega))|^2$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

2) Factorisation spectrale

$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

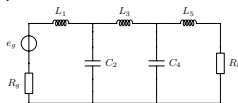
1) Synthèse du Module $M(\omega)$

2) Factorisation spectrale

$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

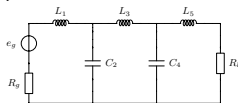
1) Synthèse du Module $M(\omega)$

2) Factorisation spectrale

$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Synthèse du Prototype

$$\text{Butterworth } M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$$

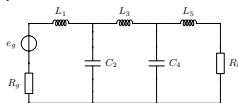
$$\text{Chebyshev } M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$$

2) Factorisation spectrale

$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Synthèse du Prototype

$$\text{Butterworth } M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$$

$$\text{Chebyshev } M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$$

2) Factorisation spectrale

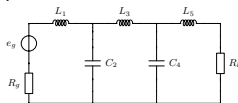
$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

Tri de pôles stables

$$H(s) = \frac{1}{1+a_1s+a_2s^2+a_3s^3}$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Synthèse du Prototype

$$\text{Butterworth } M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$$

$$\text{Chebyshev } M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$$

2) Factorisation spectrale

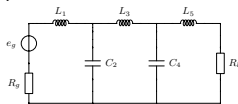
$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

Tri de pôles stables

$$H(s) = \frac{1}{1+a_1s+a_2s^2+a_3s^3}$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Transformation + extraction

$$Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$$

$$\text{Si } s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

Commande Robuste

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Synthèse du Prototype

$$\text{Butterworth } M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$$

$$\text{Chebyshev } M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$$

2) Factorisation spectrale

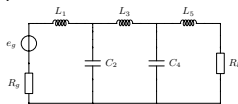
$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

Tri de pôles stables

$$H(s) = \frac{1}{1+a_1s+a_2s^2+a_3s^3}$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Transformation + extraction

$$Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$$

$$\text{Si } s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

Commande Robuste

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Synthèse du Prototype
Butterworth $M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$

Chebyshev $M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$

Factorisation rationnelle
co-prime

$$M(\omega) = \frac{\mathcal{B}(j\omega)^* X_N \mathcal{B}(j\omega)}{\mathcal{B}(j\omega)^* X_D \mathcal{B}(j\omega)}$$

2) Factorisation spectrale

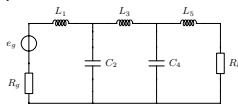
$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

Tri de pôles stables

$$H(s) = \frac{1}{1+a_1s+a_2s^2+a_3s^3}$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Transformation + extraction

$$Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$$

$$\text{Si } s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

Commande Robuste

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Synthèse du Prototype
Butterworth $M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$

Chebyshev $M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$

Factorisation rationnelle
co-prime
 $M(\omega) = \frac{\mathcal{B}(j\omega)^* X_N \mathcal{B}(j\omega)}{\mathcal{B}(j\omega)^* X_D \mathcal{B}(j\omega)}$

2) Factorisation spectrale

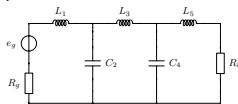
$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

Tri de pôles stables
 $H(s) = \frac{1}{1+a_1s+a_2s^2+a_3s^3}$

Éq/Inégalité Riccati
 $M(\omega) \rightarrow H(s)$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Transformation + extraction
 $Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$

Si $s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

Commande Robuste

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Synthèse du Prototype
Butterworth $M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$

Chebyshev $M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$

Factorisation rationnelle
co-prime
 $M(\omega) = \frac{B(j\omega)^* X_N B(j\omega)}{B(j\omega)^* X_D B(j\omega)}$

2) Factorisation spectrale

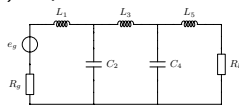
$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

Tri de pôles stables
 $H(s) = \frac{1}{1+a_1s+a_2s^2+a_3s^3}$

Éq/Inégalité Riccati
 $M(\omega) \rightarrow H(s)$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Transformation + extraction
 $Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$

Si $s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$

Imposer
 $H(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$

Méthodes de conception existantes $T(s) = \frac{1}{s}$

3 étapes de conception

Traitement du Signal

Commande Robuste

1) Synthèse du Module $M(\omega)$

Synthèse du Prototype
 Butterworth $M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$
 Chebyshev $M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$

Factorisation rationnelle
 co-prime
 $M(\omega) = \frac{B(j\omega)^* X_N B(j\omega)}{B(j\omega)^* X_D B(j\omega)}$

2) Factorisation spectrale

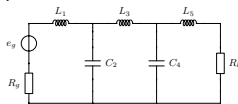
$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

$$M(\omega) = |H(j\omega)|^2$$

Tri de pôles stables
 $H(s) = \frac{1}{1+a_1s+a_2s^2+a_3s^3}$

Éq/Inégalité Riccati
 $M(\omega) \rightarrow H(s)$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Transformation + extraction
 $Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$

Si $s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$

Imposer
 $H(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$

Méthodes de conception existantes $T(s)$

3 étapes de conception

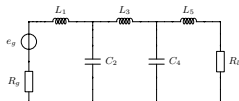
1) Synthèse du Module

$$M(\omega) \rightarrow M(T(j\omega))$$

2) Factorisation spectrale

$$M(\omega) \rightarrow H(s) \rightarrow \\ M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(s) = H(s)$$

Traitement du Signal

Synthèse du Prototype

$$\text{Butterworth } M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$$

$$\text{Chebyshev } M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$$

Tri de pôles stables

$$H(s) = \frac{1}{1+a_1s+a_2s^2+a_3s^3}$$

Transformation + extraction

$$Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$$

$$\text{Si } s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

Commande Robuste

Factorisation rationnelle

$$M(\omega) = \frac{\text{co-prime } \mathcal{B}(j\omega)^* X_N \mathcal{B}(j\omega)}{\mathcal{B}(j\omega)^* X_D \mathcal{B}(j\omega)}$$

Éq/Inégalité Riccati

$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

Imposer

$$H(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

Méthodes de conception existantes $T(s)$

3 étapes de conception

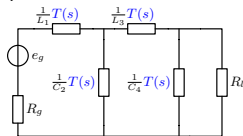
1) Synthèse du Module

$$M(\omega) \rightarrow M(T(j\omega))$$

2) Factorisation spectrale

$$M(\omega) \rightarrow H(s) \rightarrow \\ M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(T(s)) = H(T(s))$$

Traitement du Signal

Synthèse du Prototype

$$\text{Butterworth } M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$$

$$\text{Chebyshev } M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$$

Tri de pôles stables

$$H(s) = \frac{1}{1+a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

Transformation + extraction

$$Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$$

$$\text{Si } s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

Commande Robuste

Factorisation rationnelle

$$M(\omega) = \frac{\text{co-prime } \mathcal{B}(j\omega)^* X_N \mathcal{B}(j\omega)}{\mathcal{B}(j\omega)^* X_D \mathcal{B}(j\omega)}$$

Éq/Inégalité Riccati

$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

Imposer

$$H(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

Méthodes de conception existantes $T(s)$

3 étapes de conception

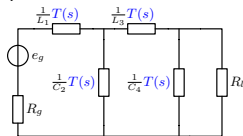
1) Synthèse du Module

$$M(\omega) \rightarrow M(T(j\omega))$$

2) Factorisation spectrale

$$M(\omega) \rightarrow H(s) \rightarrow \\ M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$$

3) Implémentation circuit



$$s_{21}(T(s)) = H(T(s))$$

Traitement du Signal

Synthèse du Prototype

$$\text{Butterworth } M(\omega) = \frac{1}{1+\omega^{2n}}$$

$$\text{Chebyshev } M(\omega) = \frac{1}{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}$$

Tri de pôles stables

$$H(s) = \frac{1}{1+a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

Transformation + extraction

$$Z_{in}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N s + R}}$$

$$\text{Si } s_{21}(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

Commande Robuste

Factorisation rationnelle

$$M(\omega) = \frac{\text{co-prime } \mathcal{B}(j\omega)^* X_N \mathcal{B}(j\omega)}{\mathcal{B}(j\omega)^* X_D \mathcal{B}(j\omega)}$$

Éq/Inégalité Riccati

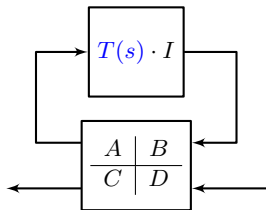
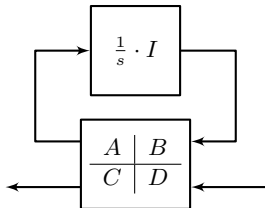
$$M(\omega) \rightarrow H(s)$$

Imposer

$$H(s) = \frac{1}{g(s)} \rightarrow Z_{in} \rightarrow s_{21}$$

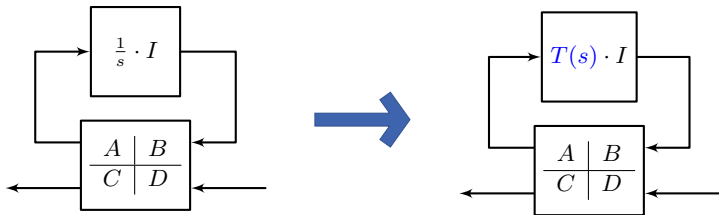
Nos contributions

Idée générale : Exploiter la structure



Nos contributions

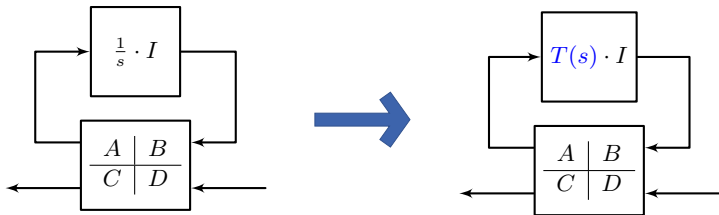
Idée générale : Exploiter la structure



1) Synthèse du Module :
$$M(T(j\omega)) = \frac{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_N \mathcal{B}(T(j\omega))}{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_D \mathcal{B}(T(j\omega))}$$

Nos contributions

Idée générale : Exploiter la structure

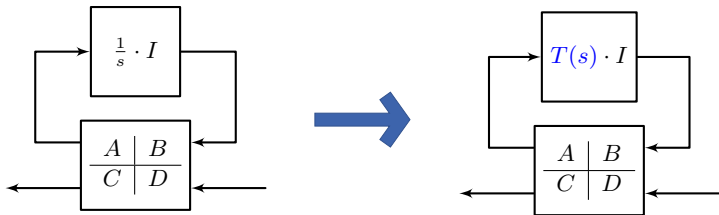


1) Synthèse du Module : $M(T(j\omega)) = \frac{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_N \mathcal{B}(T(j\omega))}{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_D \mathcal{B}(T(j\omega))}$

$$\begin{cases} \forall \omega \in \Omega^U, M(T(j\omega)) \leq U^2 \\ \forall \omega \in \Omega^L, M(T(j\omega)) \geq L^2 \end{cases}$$

Nos contributions

Idée générale : Exploiter la structure



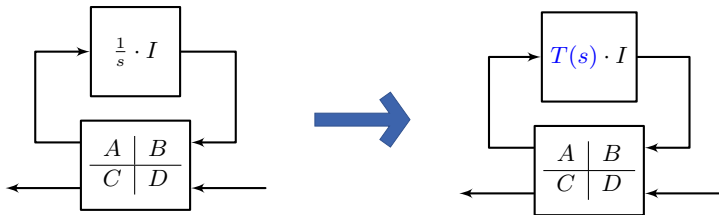
1) Synthèse du Module :
$$M(T(j\omega)) = \frac{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_N \mathcal{B}(T(j\omega))}{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_D \mathcal{B}(T(j\omega))}$$

2) Factorisation spectrale : $M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$

Éq/Inégalité Riccati $M(T(j\omega)) = |H(T(j\omega))|^2$

Nos contributions

Idée générale : Exploiter la structure



1) Synthèse du Module :
$$M(T(j\omega)) = \frac{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_N \mathcal{B}(T(j\omega))}{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_D \mathcal{B}(T(j\omega))}$$

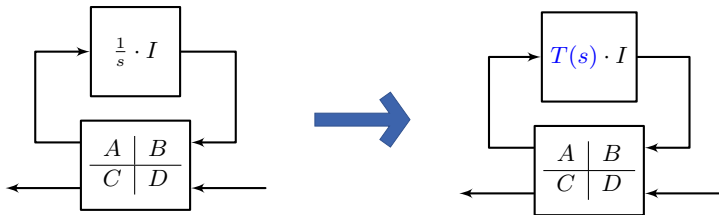
2) Factorisation spectrale :
$$M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$$

Éq/Inégalité Riccati
$$M(T(j\omega)) = |H(T(j\omega))|^2$$

Sans pertes :
$$\sigma(T(q), q, \begin{bmatrix} x & y \\ y & z \end{bmatrix}) = 0$$

Nos contributions

Idée générale : Exploiter la structure



1) Synthèse du Module :
$$M(T(j\omega)) = \frac{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_N \mathcal{B}(T(j\omega))}{\mathcal{B}(T(j\omega))^* X_D \mathcal{B}(T(j\omega))}$$

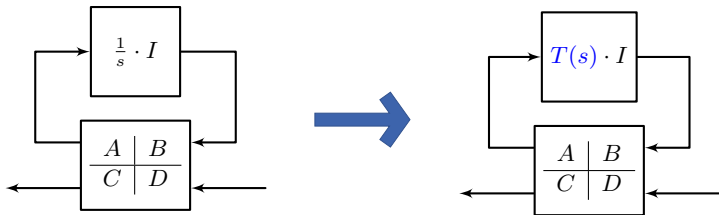
2) Factorisation spectrale :
$$M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$$

Éq/Inégalité Riccati
$$M(T(j\omega)) = |H(T(j\omega))|^2 - E(T(j\omega))$$

Sans pertes :
$$\sigma(T(q), q, \begin{bmatrix} x & y \\ y & z \end{bmatrix}) = 0$$
 Avec pertes :
$$\sigma(T(q), q, \begin{bmatrix} x & y \\ y & z \end{bmatrix}) \geq 0$$

Nos contributions

Idée générale : Exploiter la structure



1) Synthèse du Module :
$$M(T(j\omega)) = \frac{B(T(j\omega))^* X_N B(T(j\omega)) - E(T(j\omega))}{B(T(j\omega))^* X_D B(T(j\omega)) - E(T(j\omega))}$$

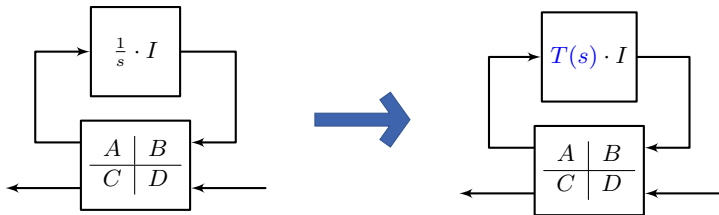
2) Factorisation spectrale : $M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$

Éq/Inégalité Riccati $M(T(j\omega)) = |H(T(j\omega))|^2 - E(T(j\omega))$

Sans pertes : $\sigma(T(q), q, \begin{bmatrix} x & y \\ y & z \end{bmatrix}) = 0$ Avec pertes : $\sigma(T(q), q, \begin{bmatrix} x & y \\ y & z \end{bmatrix}) \geq 0$

Nos contributions

Idée générale : Exploiter la structure



1) Synthèse du Module : $M(T(j\omega)) = \frac{B(T(j\omega))^* X_N B(T(j\omega)) - E(T(j\omega))}{B(T(j\omega))^* X_D B(T(j\omega)) - E(T(j\omega))}$

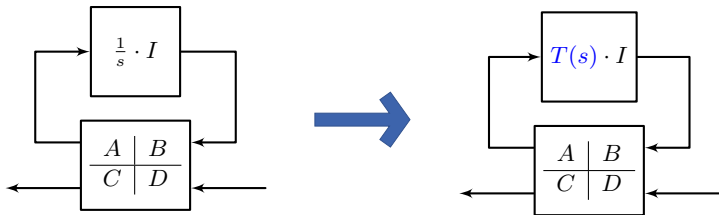
2) Factorisation spectrale : $M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$

3) Implémentation circuit :

$$Z_{in}(T(s)) = \alpha_1 T(s) + \frac{1}{\dots + \frac{1}{\alpha_N T(s) + R}}$$

Nos contributions

Idée générale : Exploiter la structure



1) Synthèse du Module : $M(T(j\omega)) = \frac{B(T(j\omega))^* X_N B(T(j\omega)) - E(T(j\omega))}{B(T(j\omega))^* X_D B(T(j\omega)) - E(T(j\omega))}$

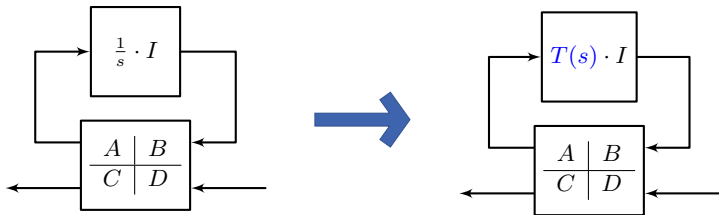
2) Factorisation spectrale : $M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$

3) Implémentation circuit :

$$Z_{in}(T(s)) = \alpha_1 T(s) + \frac{1}{1 + \alpha_N T(s) + R}, \text{ Si } s_{21}(T(s)) = \frac{1}{g(T(s))}$$

Nos contributions

Idee générale : Exploiter la structure

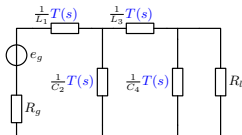


1) Synthèse du Module :
$$M(T(j\omega)) = \frac{B(T(j\omega))^* X_N B(T(j\omega)) - E(T(j\omega))}{B(T(j\omega))^* X_D B(T(j\omega)) - E(T(j\omega))}$$

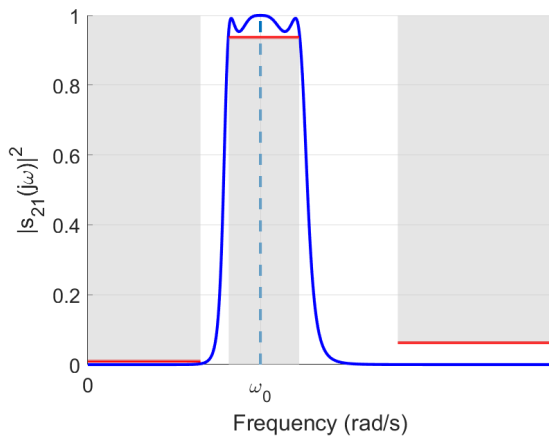
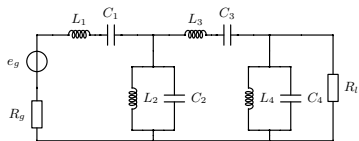
2) Factorisation spectrale :
$$M(T(j\omega)) \rightarrow H(T(s))$$

3) Implémentation circuit :

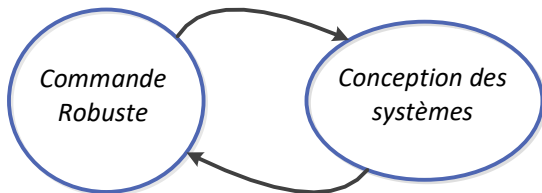
$$Z_{in}(T(s)) = \alpha_1 T(s) + \frac{1}{1 + \frac{\alpha_N T(s)}{R}}$$



Résultat



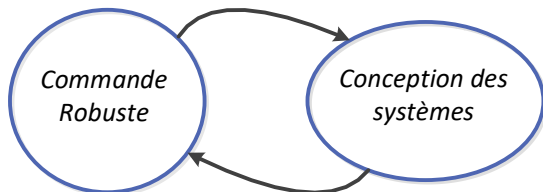
Quelques conclusions



Objectifs atteints en 10 ans de recherche :

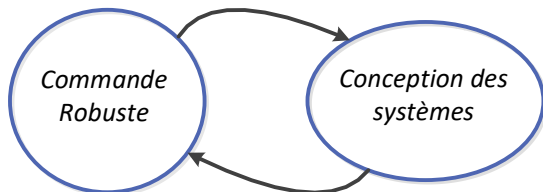
- ▶ Développer ma thématique de recherche en Automatique pour la conception de systèmes
- ▶ Établir des collaborations pérennes autour de cette thématique
- ▶ Constituer une équipe de recherche
- ▶ Proposer une méthodologie de conception pertinente et maîtrisée

Quelques conclusions et perspectives...

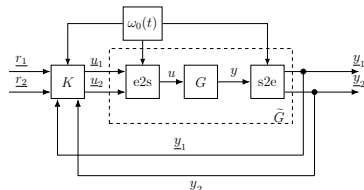


- ▶ Renforcer cette vision dans mes enseignements

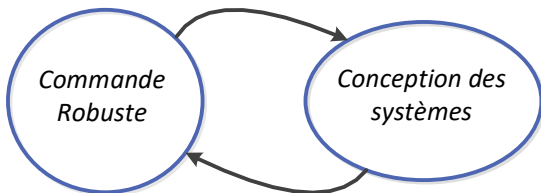
Quelques conclusions et perspectives...



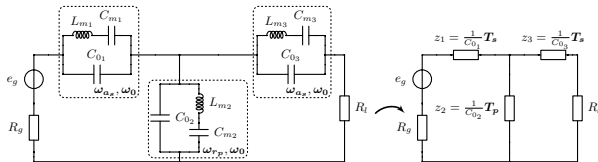
- ▶ Renforcer cette vision dans mes enseignements
- ▶ Prendre en compte/introduire les effets NL, TV



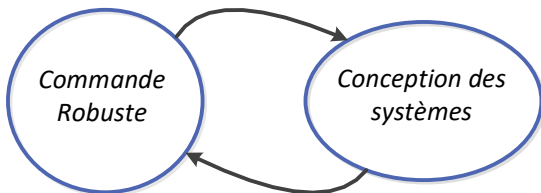
Quelques conclusions et perspectives...



- ▶ Renforcer cette vision dans mes enseignements
- ▶ Prendre en compte/introduire les effets NL, TV
- ▶ Synthèse de systèmes à plusieurs variables généralisées

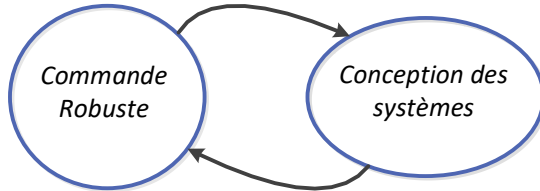


Quelques conclusions et perspectives...



- ▶ Renforcer cette vision dans mes enseignements
- ▶ Prendre en compte/introduire les effets NL, TV
- ▶ Synthèse de systèmes à plusieurs variables généralisées
- ▶ Structure hiérarchique comme degré de liberté
- ▶ Commande de systèmes distribués

Quelques conclusions et perspectives...



- ▶ Renforcer cette vision dans mes enseignements
- ▶ Prendre en compte/introduire les effets NL, TV
- ▶ Synthèse de systèmes à plusieurs variables généralisées
- ▶ Structure hiérarchique comme degré de liberté
- ▶ Commande de systèmes distribués
- ▶ Commande Robuste en conception d'algorithmes / Cyber-physiques