

Stabilisation de charge à puissance constante par un contrôle port-hamiltonien

DERRIEN Luc

4^{ème} Congrès Annuel de la SAGIP
10-12 Juin 2026, Bordeaux



Co-Direction : M.Fadel, P.Kergus
Encadrant industriel : M.K.Kahalerras

Sommaire

1. Introduction
2. Contrôle basé passivité
3. Application à une charge réelle
4. Conclusion

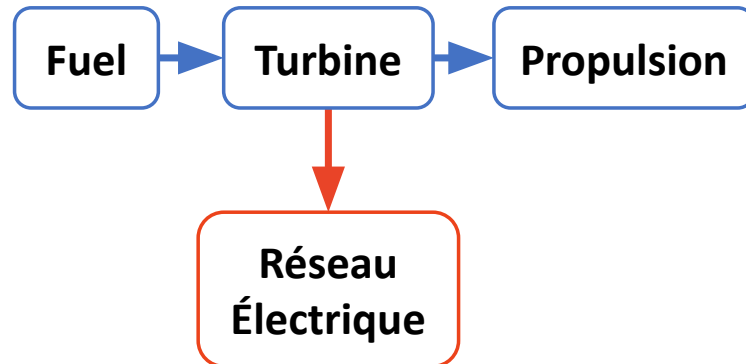
Introduction

1. Contexte - Principe de l'avion plus électrique
2. Problème de stabilité lié aux charges commandées

Introduction

Contexte - Le réseau électrique de bord

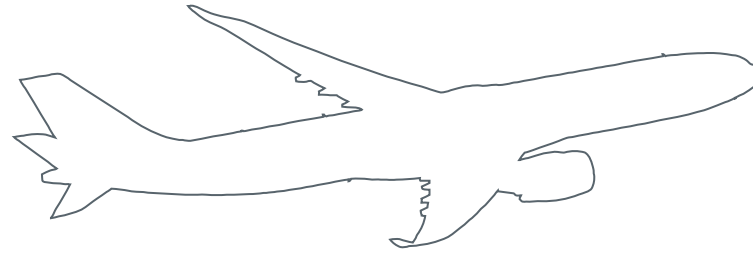
- Les turbines alimentent le réseau électrique de bord
- Avec l'électrification des systèmes, la puissance embarquée est de plus en plus grande



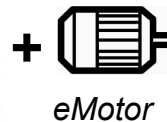
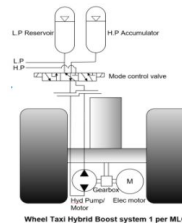
Ice Protection Systems



Environmental Control System



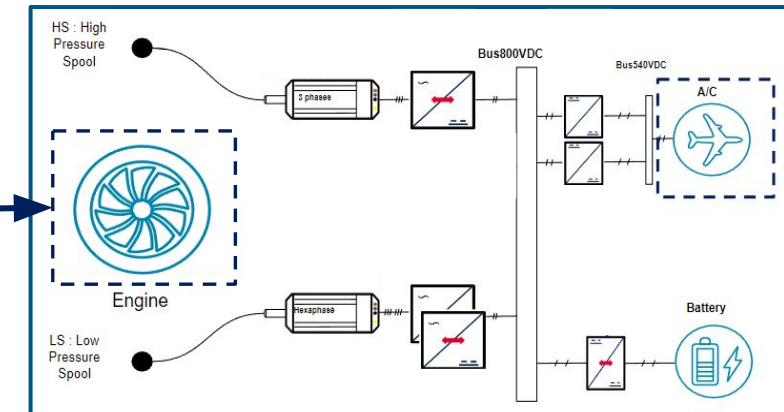
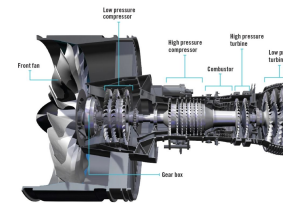
eTaxi



eMotor



Turbines

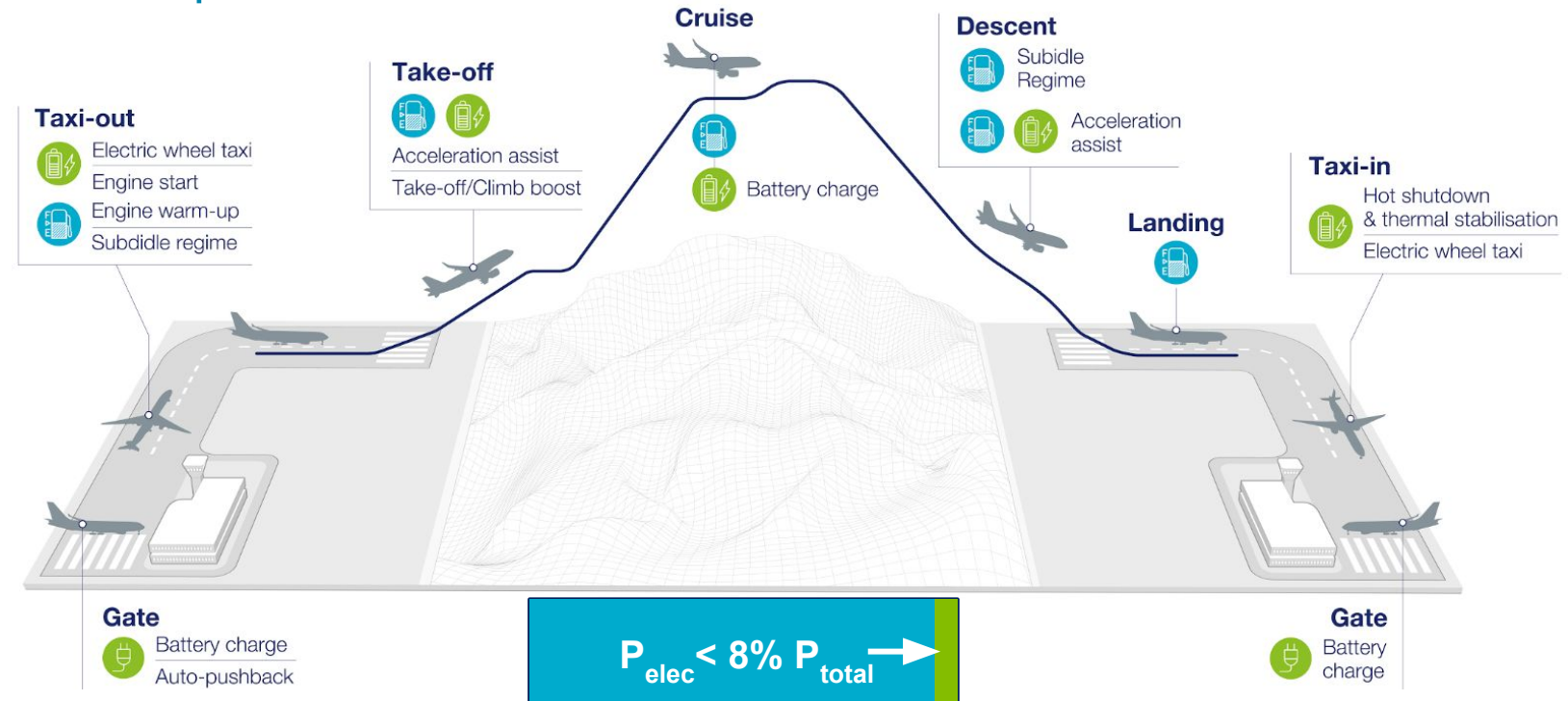
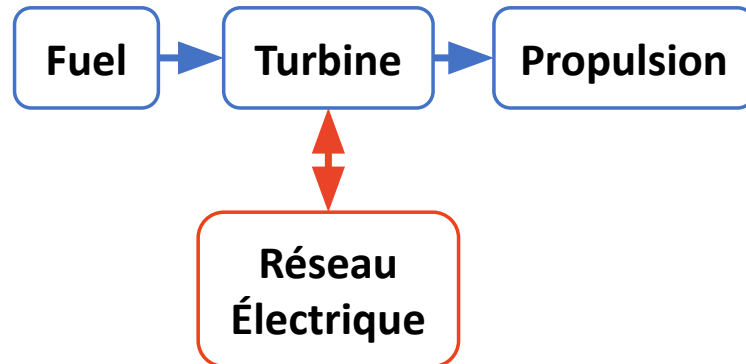


Introduction

Contexte - Principe de l'avion plus électrique

Objectif MEA :

- Propulsion thermique
- Auxiliaires 100% électriques
- Fonctions d'injection

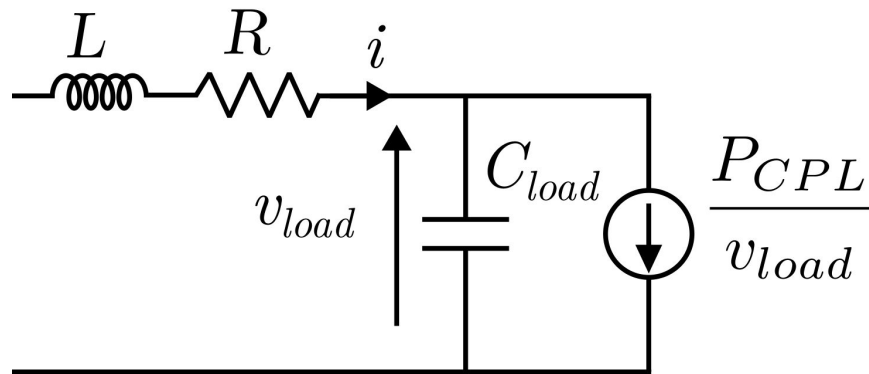


Prévision de la part de puissance électrique embarquée dans les prochains avions de ligne

Cet objectif entraîne une très importante **augmentation de la puissance électrique** à bord ainsi qu'une complexité accrue liée aux **fonctions bi-directionnelles** (injection dans les turbines)

Introduction

Problème de stabilité lié aux charges commandées



L et R : impédance de ligne
 C_{load} : condensateur de filtrage

Les charges avioniques sont finement contrôlées :
Modélisation par des **charges à puissance constante** (CPL)

- La CPL est transitoirement analogue à une **résistance négative**
- **Impacte fortement la stabilité**

Contrôle basé passivité

1. Systèmes Port-Controlled Hamiltonian
2. Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control
3. Application de l'IDA-PBC à une charge idéale
4. Stabilisation du réseau

Contrôle basé passivité

Systèmes Port-Controlled Hamiltonian

Un **système passif** peut **stocker** ou **dissiper** de l'**énergie** mais ne peut en restituer plus que ce qu'il n'a reçu.

→ **Modularité** : si tous les sous-systèmes d'un réseau sont passifs, alors le système global est asymptotiquement stable.

Il existe une classe de contrôle qui consiste à passiver les éléments actifs :

→ ***Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control*** (IDA-PBC)

Contrôle basé passivité

Systèmes Port-Controlled Hamiltonian

Un **système passif** peut **stocker** ou **dissiper** de l'**énergie** mais ne peut en restituer plus que ce qu'il n'a reçu.

→ **Modularité** : si tous les sous-systèmes d'un réseau sont passifs, alors le système global est asymptotiquement stable.

Il existe une classe de contrôle qui consiste à passiver les éléments actifs :

→ **Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control** (IDA-PBC)

Ce contrôle est basé sur la modélisation **Port - Controlled Hamiltonian** (PCH) :

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + g_c(x) \cdot u_c + g_e(x) u_e$$

Contrôle basé passivité

Systèmes Port-Controlled Hamiltonian

Un **système passif** peut **stocker** ou **dissiper** de l'**énergie** mais ne peut en restituer plus que ce qu'il n'a reçu.

→ **Modularité** : si tous les sous-systèmes d'un réseau sont passifs, alors le système global est asymptotiquement stable.

Il existe une classe de contrôle qui consiste à passiver les éléments actifs :

→ **Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control** (IDA-PBC)

Ce contrôle est basé sur la modélisation **Port - Controlled Hamiltonian** (PCH) :

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + g_c(x) \cdot u_c + g_e(x) u_e$$



u_e : **ports électriques** avec les autres sous-systèmes

Contrôle basé passivité

Systèmes Port-Controlled Hamiltonian

Un **système passif** peut **stocker** ou **dissiper** de l'**énergie** mais ne peut en restituer plus que ce qu'il n'a reçu.

→ **Modularité** : si tous les sous-systèmes d'un réseau sont passifs, alors le système global est asymptotiquement stable.

Il existe une classe de contrôle qui consiste à passiver les éléments actifs :

→ **Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control** (IDA-PBC)

Ce contrôle est basé sur la modélisation **Port - Controlled Hamiltonian** (PCH) :

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + g_c(x) \cdot u_c + g_e(x) u_e$$

↓
 u_e : ports électriques avec les autres sous-systèmes
 ↘
 u_c : ports des entrées de commandes

Contrôle basé passivité

Systèmes Port-Controlled Hamiltonian

Un **système passif** peut **stocker** ou **dissiper** de l'**énergie** mais ne peut en restituer plus que ce qu'il n'a reçu.

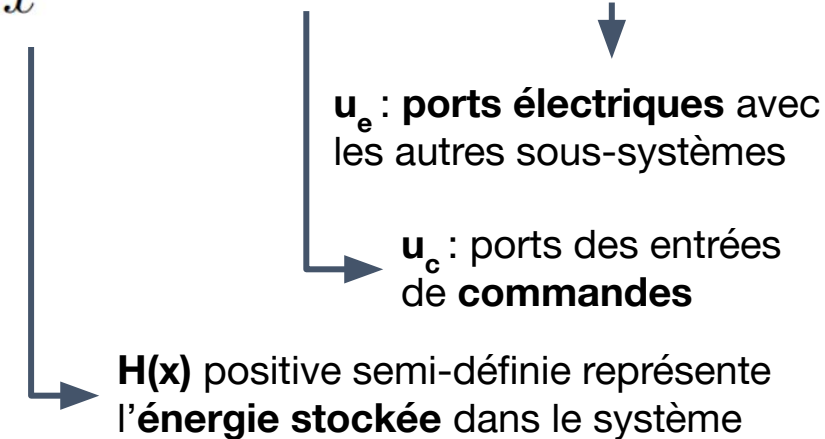
→ **Modularité** : si tous les sous-systèmes d'un réseau sont passifs, alors le système global est asymptotiquement stable.

Il existe une classe de contrôle qui consiste à passiver les éléments actifs :

→ **Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control** (IDA-PBC)

Ce contrôle est basé sur la modélisation **Port - Controlled Hamiltonian** (PCH) :

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + g_c(x) \cdot u_c + g_e(x) u_e$$



Contrôle basé passivité

Systèmes Port-Controlled Hamiltonian

Un **système passif** peut **stocker** ou **dissiper** de l'**énergie** mais ne peut en restituer plus que ce qu'il n'a reçu.

→ **Modularité** : si tous les sous-systèmes d'un réseau sont passifs, alors le système global est asymptotiquement stable.

Il existe une classe de contrôle qui consiste à passiver les éléments actifs :

→ **Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control** (IDA-PBC)

Ce contrôle est basé sur la modélisation **Port - Controlled Hamiltonian** (PCH) :

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + g_c(x) \cdot u_c + g_e(x) u_e$$

u_e : **ports électriques** avec les autres sous-systèmes

u_c : ports des entrées de **commandes**

$H(x)$ positive semi-définie représente l'**énergie stockée** dans le système

$R(x)$ positive semi-définie représente l'**énergie dissipée** dans le système

Contrôle basé passivité

Systèmes Port-Controlled Hamiltonian

Un **système passif** peut **stocker** ou **dissiper** de l'**énergie** mais ne peut en restituer plus que ce qu'il n'a reçu.

→ **Modularité** : si tous les sous-systèmes d'un réseau sont passifs, alors le système global est asymptotiquement stable.

Il existe une classe de contrôle qui consiste à passiver les éléments actifs :

→ **Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control** (IDA-PBC)

Ce contrôle est basé sur la modélisation **Port - Controlled Hamiltonian** (PCH) :

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + g_c(x) \cdot u_c + g_e(x) u_e$$

u_e : **ports électriques** avec les autres sous-systèmes

u_c : ports des entrées de **commandes**

$H(x)$ positive semi-définie représente l'**énergie stockée** dans le système

$R(x)$ positive semi-définie représente l'**énergie dissipée** dans le système

$J(x)$ antisymétrique représente l'**échange d'énergie** entre les variables d'états

Contrôle basé passivité

Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control

La **fonction hamiltonienne H** représente l'**énergie du système**. C'est une **fonction de Lyapunov** mais dont le minimum n'est pas nécessairement situé au régime permanent souhaité x_d

- Objectif du contrôle IDA-PBC :
construire une **fonction hamiltonienne H_d minimale en x_d** grâce à l'**entrée $u_c = u_{c.PBC}$**

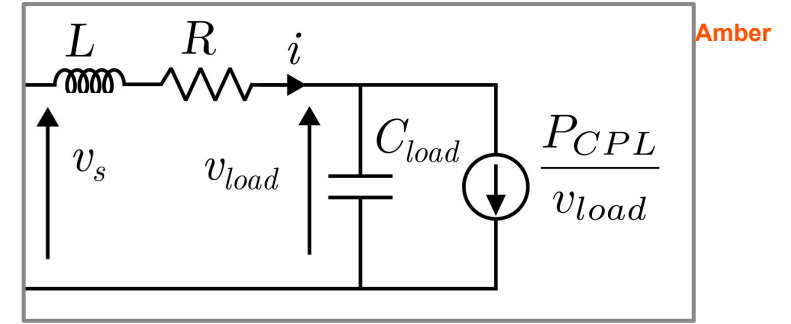
$$\dot{x} = \underbrace{[J - R] \frac{\partial H}{\partial x} + g_c \cdot u_c}_{\text{Dynamique du système}} + g_e \cdot u_e = \underbrace{[J_d - R_d] \frac{\partial H_d}{\partial x} + g_e \cdot \tilde{u}_e}_{\text{Dynamique souhaitée}} \quad \tilde{u}_e = u_e - u_{ed}$$

Contrôle basé passivité

Application de l'IDA-PBC à une charge idéale

Avec $v_{load,d}$ et i_d la tension et le courant désirés en régime permanent, la **fonction hamiltonienne recherchée** devient :

$$H(x) = \frac{C_{load}}{2} v_{load}^2 + \frac{L}{2} i^2 \longrightarrow H_d(x) = \frac{C_{load}}{2} \tilde{v}_{load}^2 + \frac{L}{2} \tilde{i}^2 \quad x = x_d + \tilde{x}$$



Contrôle basé passivité

Application de l'IDA-PBC à une charge idéale

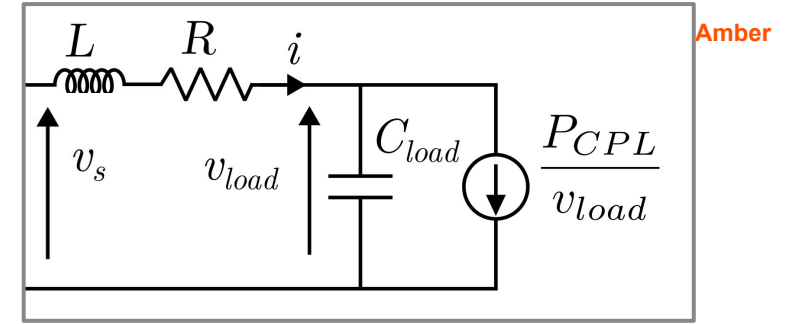
Avec $v_{load,d}$ et i_d la tension et le courant désirés en régime permanent, la **fonction hamiltonienne recherchée** devient :

$$H(x) = \frac{C_{load}}{2} v_{load}^2 + \frac{L}{2} i^2 \longrightarrow H_d(x) = \frac{C_{load}}{2} \tilde{v}_{load}^2 + \frac{L}{2} \tilde{i}^2 \quad x = x_d + \tilde{x}$$

L'entrée de commande P_{CPL} est obtenue via l'équation matricielle :

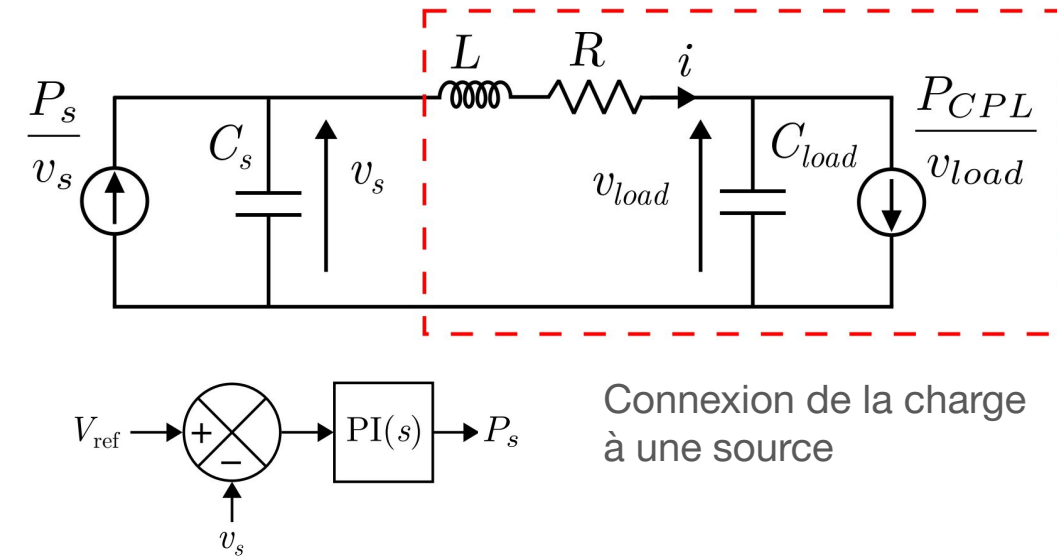
$$\dot{x} = [J - R] \frac{\partial H}{\partial x} + g_c \cdot P_{CPL} + g_e \cdot v_s = [J_d - R_d] \frac{\partial H_d}{\partial x} + g_e \cdot \tilde{v}_s$$

$$P_{CPL} = P_{ref} + i_d \tilde{v}_2 + r_1 v_2 \tilde{v}_2$$



Contrôle basé passivité

Stabilisation du réseau



Fonction de Lyapunov du réseau complet :

$$V(x) = \frac{C_s}{2} \tilde{v}_s^2 + \frac{C_{load}}{2} \tilde{v}_{load}^2 + \frac{L}{2} \tilde{i}^2$$

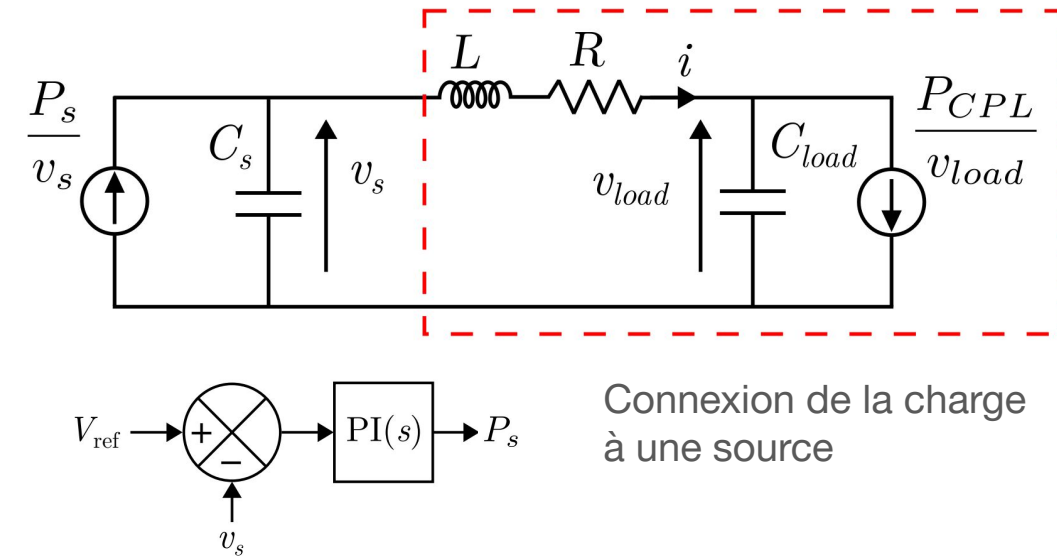
Sans IDA-PBC

$$\boxed{P_{CPL} = P_{ref}} \rightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_l^2}{v_l} + \frac{i_d \tilde{v}_{load}^2}{v_{load}} - R \tilde{i}^2$$

Non strictement négatif au voisinage de x_d : si v_{load} diminue, le courant appelé augmente ce qui aggrave la chute de v_{load}
 → **Problème de stabilité**

Contrôle basé passivité

Stabilisation du réseau



Fonction de Lyapunov du réseau complet :

$$V(x) = \frac{C_s}{2} \tilde{v}_s^2 + \frac{C_{load}}{2} \tilde{v}_{load}^2 + \frac{L}{2} \tilde{i}^2$$

Sans IDA-PBC

$$P_{CPL} = P_{ref} \rightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_l^2}{v_l} + \frac{i_d \tilde{v}_{load}^2}{v_{load}} - R \tilde{i}^2$$

Non strictement négatif au voisinage de x_d : si v_{load} diminue, le courant appelé augmente ce qui aggrave la chute de v_{load}
 → **Problème de stabilité**

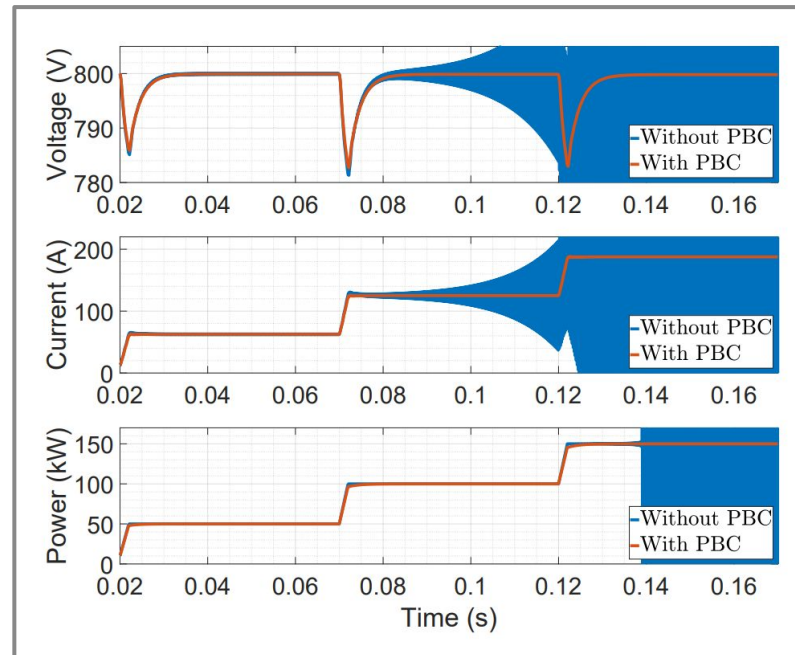
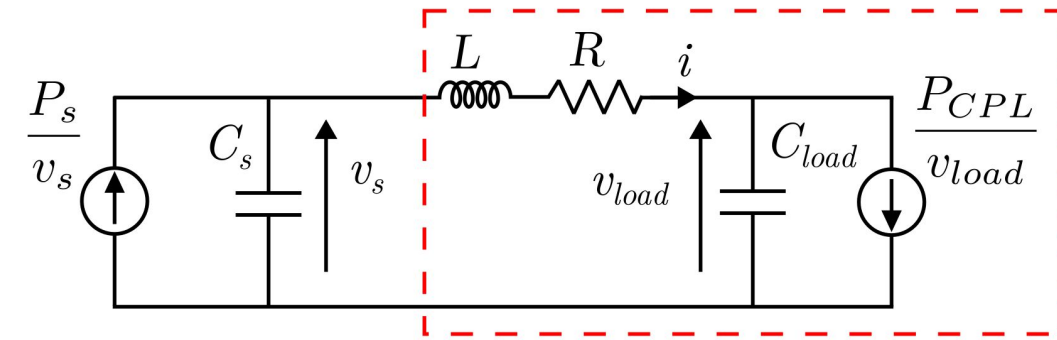
Avec IDA-PBC

$$P_{CPL} = P_{ref} + i_d \tilde{v}_2 + r_1 v_2 \tilde{v}_2 \rightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_l^2}{v_l} - r_1 \tilde{v}_{load}^2 - R \tilde{i}^2$$

Strictement négatif au voisinage de x_d :
 système **asymptotiquement stable**

Contrôle basé passivité

Stabilisation du réseau



Fonction de Lyapunov du réseau complet :

$$V(x) = \frac{C_s}{2} \tilde{v}_s^2 + \frac{C_{load}}{2} \tilde{v}_{load}^2 + \frac{L}{2} \tilde{i}^2$$

Sans IDA-PBC

$$P_{CPL} = P_{ref} \rightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_l^2}{v_l} + \frac{i_d \tilde{v}_{load}^2}{v_{load}} - R \tilde{i}^2$$

Non strictement négatif au voisinage de x_d : si v_{load} diminue, le courant appelé augmente ce qui aggrave la chute de v_{load}
 → **Problème de stabilité**

Avec IDA-PBC

$$P_{CPL} = P_{ref} + i_d \tilde{v}_2 + r_1 v_2 \tilde{v}_2 \rightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_l^2}{v_l} - r_1 \tilde{v}_{load}^2 - R \tilde{i}^2$$

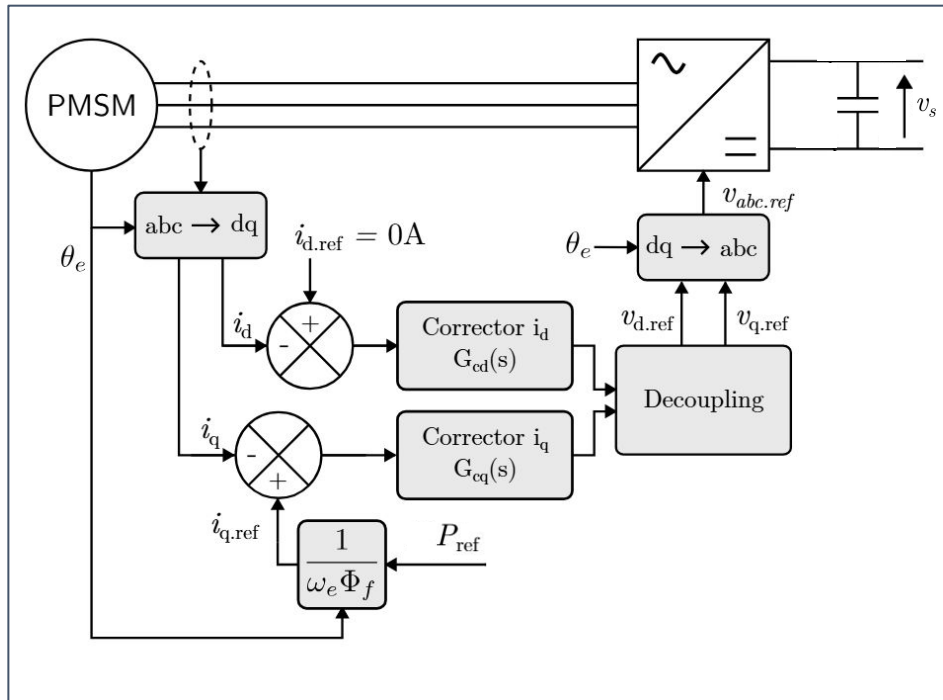
Strictement négatif au voisinage de x_d :
 système **asymptotiquement stable**

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

1. Application de l'IDA-PBC
2. Résultats de simulation
3. Erreur de modélisation
4. Stabilité Input-to-State

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Application de l'IDA-PBC

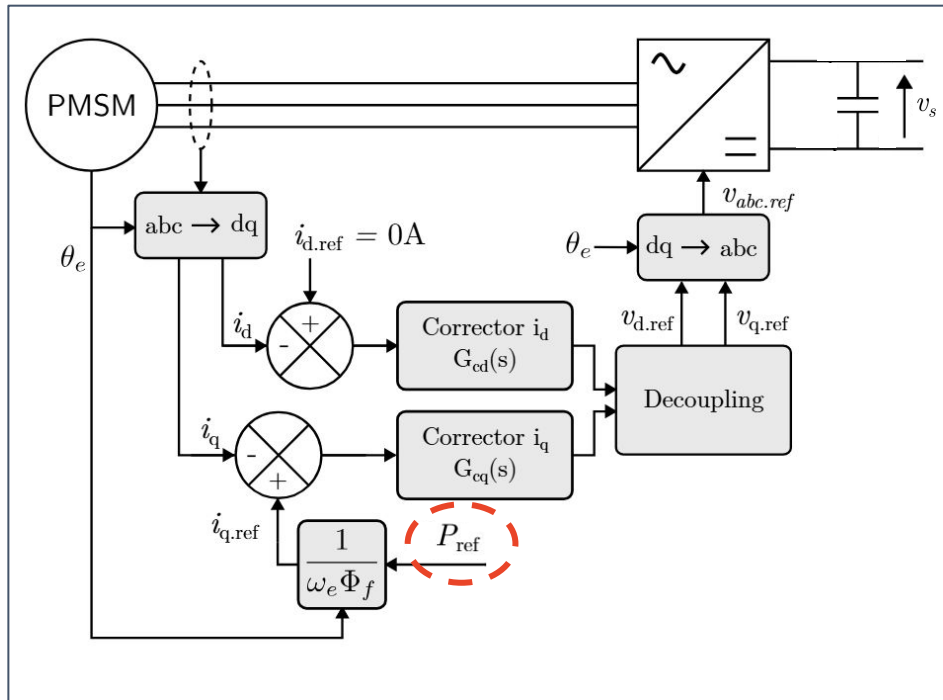


Cas d'application :
machine synchrone à aimant permanent.

PMSM		Load Control	
L_s	55.8 μH	f_{switch}	40 kHz
R_s	7.9 m Ω	ω_c	62 832 rad/s
Φ_f	0.024 Wb	r_1	0.1 Ω^{-1}
ω_e	10 472 rad/s		

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Application de l'IDA-PBC

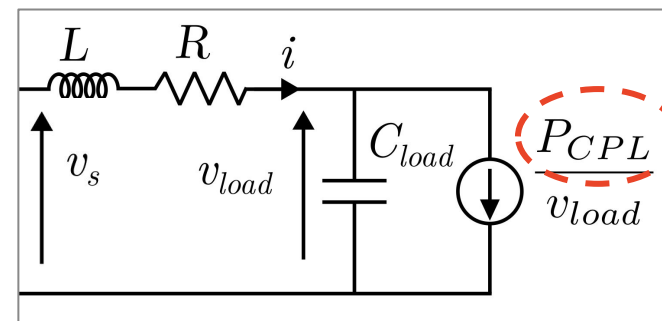


PMSM		Load Control	
L_s	55.8 μH	f_{switch}	40 kHz
R_s	7.9 m Ω	ω_c	62 832 rad/s
Φ_f	0.024 Wb	r_1	0.1 Ω^{-1}
ω_e	10 472 rad/s		

Cas d'application :
machine synchrone à aimant permanent.

La puissance consommée par la machine synchrone est liée à la **régulation des courants i_d et i_q** traversant la machine :

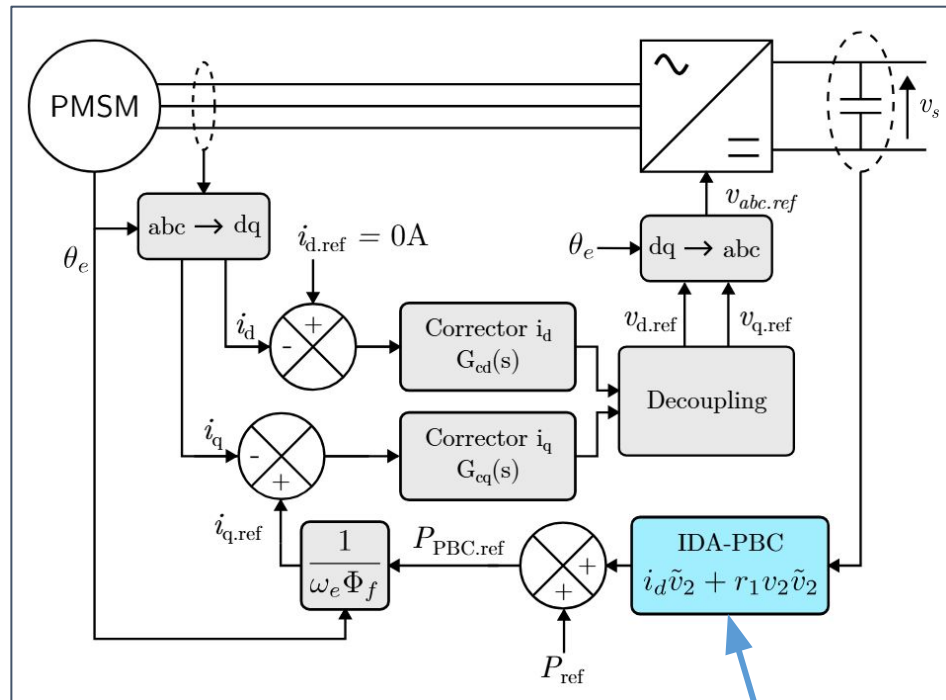
→ **La machine synchrone se comporte comme une CPL**



$$\begin{aligned}
 i_{\text{load}} &= \frac{3}{2} (\alpha_q i_q + \alpha_d i_d) \\
 &= \frac{1}{v_{\text{bus}}} \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d) \\
 &= \frac{P_{\text{MSAP}}}{v_{\text{bus}}}
 \end{aligned}$$

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Application de l'IDA-PBC



$$P_{CPL} = P_{ref} + i_d \tilde{v}_2 + r_1 v_2 \tilde{v}_2$$

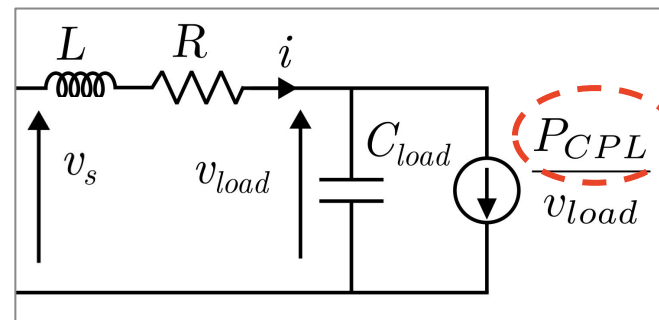
Cas d'application :
machine synchrone à aimant permanent.

La puissance consommée par la machine synchrone est liée à la **régulation des courants i_d et i_q** traversant la machine :

→ **La machine synchrone se comporte comme une CPL**

La loi proposée a été **construite pour une charge CPL**

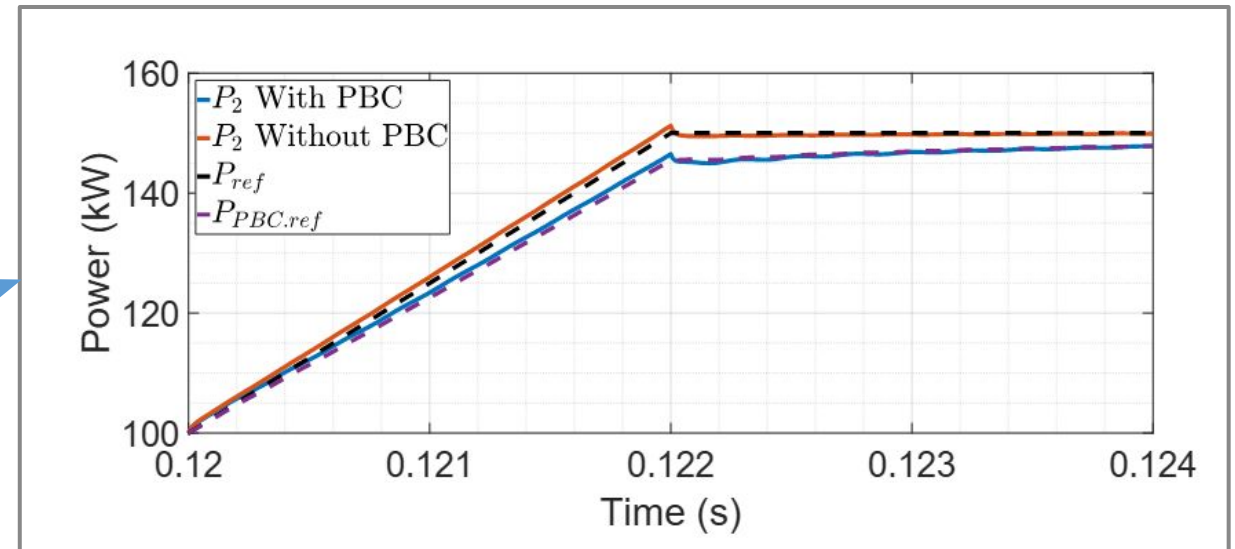
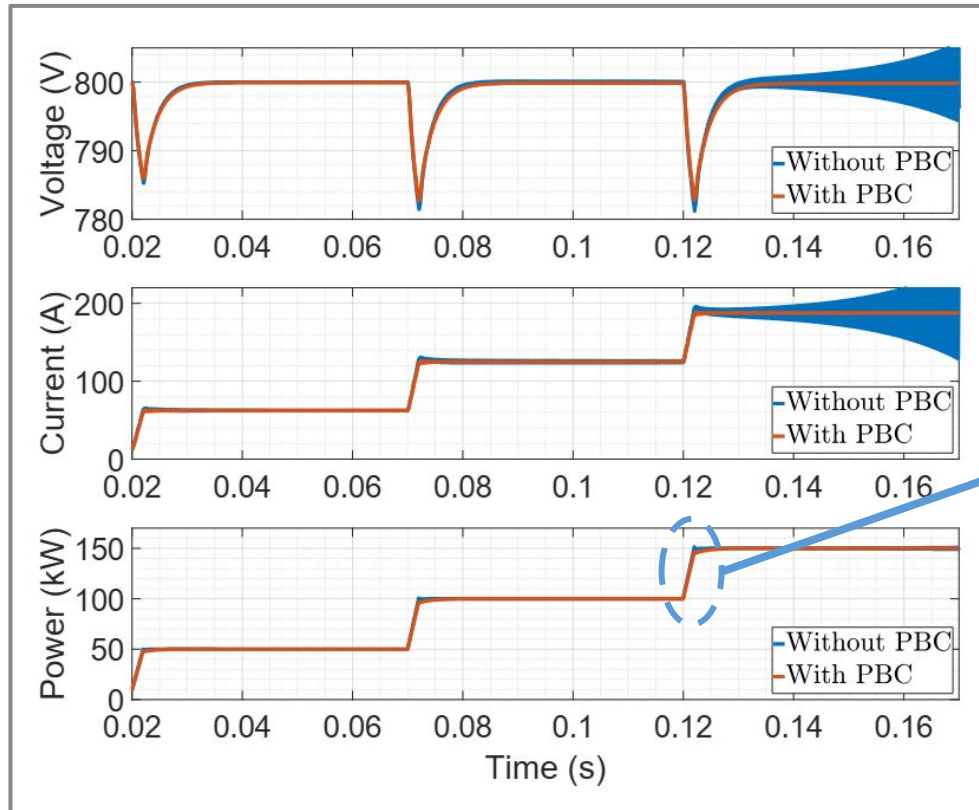
→ applicable à tout type de charge contrôlable



$$\begin{aligned} i_{load} &= \frac{3}{2} (\alpha_q i_q + \alpha_d i_d) \\ &= \frac{1}{v_{bus}} \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d) \\ &= \frac{P_{MSAP}}{v_{bus}} \end{aligned}$$

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Résultats de simulation



- Avec la correction IDA-PBC, le régime permanent n'est pas modifié mais on observe l'**effet d'amortissement** (*damping*) pendant le transitoire

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Erreur de modélisation

La charge réelle n'est pas une CPL idéale

- **Erreur de modélisation** $\tilde{P}_{CPL} = P_{CPL} - P_{PBC.ref}$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_l^2}{v_l} - r_1 \tilde{v}_{load}^2 - R \tilde{i}^2 \longrightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_s^2}{v_s} - r_1 \tilde{v}_{load}^2 - R \tilde{i}^2 - \frac{\tilde{P}_{CPL} \tilde{v}_{load}}{v_{load}}$$

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Erreur de modélisation

La charge réelle n'est pas une CPL idéale

- **Erreur de modélisation** $\tilde{P}_{CPL} = P_{CPL} - P_{PBC.ref}$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_l^2}{v_l} - r_1 \tilde{v}_{load}^2 - R \tilde{i}^2 \longrightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{-i_d \tilde{v}_s^2}{v_s} - r_1 \tilde{v}_{load}^2 - R \tilde{i}^2 - \frac{\tilde{P}_{CPL} \tilde{v}_{load}}{v_{load}}$$

Le contrôle IDA-PBC assure la stabilité au sens de Lyapunov du système autonome $\dot{x} = f(x)$

→ le système $\dot{x} = f(x, \tilde{P}_{CPL})$ n'est plus autonome :

Le théorème de stabilité de Lyapunov n'est plus applicable.

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Stabilité Input-to-State

→ Un théorème dérivé de Lyapunov est le **théorème de stabilité input-to-state (ISS)**

Il est possible de montrer que le système $\dot{x} = f(x, \tilde{P}_{CPL})$ vérifie l'inégalité suivante :

$$\|\tilde{x}\| \leq \beta(\|\tilde{x}(t_0)\|, t) + \gamma \left(\sup_{t > t_0} \|\tilde{P}_{CPL}\| \right)$$

Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Stabilité Input-to-State

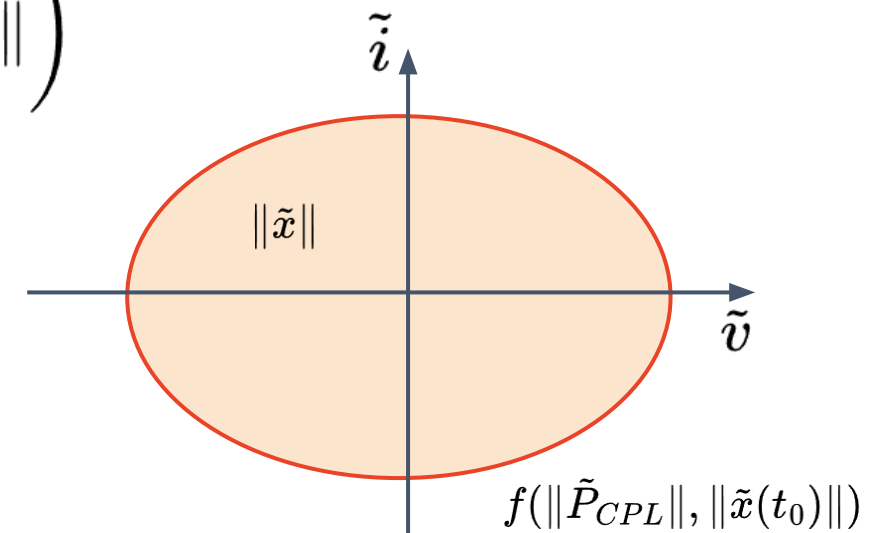
→ Un théorème dérivé de Lyapunov est le **théorème de stabilité input-to-state (ISS)**

Il est possible de montrer que le système $\dot{x} = f(x, \tilde{P}_{CPL})$ vérifie l'inégalité suivante :

$$\|\tilde{x}\| \leq \beta(\|\tilde{x}(t_0)\|, t) + \gamma \left(\sup_{t > t_0} \|\tilde{P}_{CPL}\| \right)$$

Deux propriétés découlent de cette inégalité :

- La norme de l'erreur est bornée par
 - une fonction de l'état initial $\|\tilde{x}(t_0)\|$
 - une fonction de l'erreur $\|\tilde{P}_{CPL}\|$



Application de l'IDA-PBC à une charge réelle

Stabilité Input-to-State

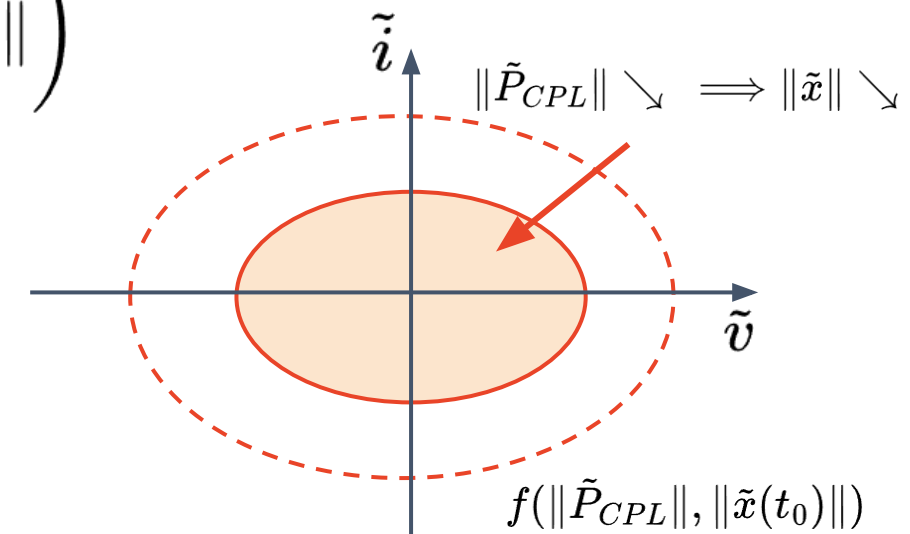
→ Un théorème dérivé de Lyapunov est le **théorème de stabilité input-to-state (ISS)**

Il est possible de montrer que le système $\dot{x} = f(x, \tilde{P}_{CPL})$ vérifie l'inégalité suivante :

$$\|\tilde{x}\| \leq \beta(\|\tilde{x}(t_0)\|, t) + \gamma \left(\sup_{t > t_0} \|\tilde{P}_{CPL}\| \right)$$

Deux propriétés découlent de cette inégalité :

- La norme de l'erreur est bornée par
 - une fonction de l'état initial $\|\tilde{x}(t_0)\|$
 - une fonction de l'erreur $\|\tilde{P}_{CPL}\|$
- Si $\|\tilde{P}_{CPL}\|$ tend vers 0, alors $\|\tilde{x}\|$ tend vers 0



Conclusion

Conclusion

- L'étude de la stabilité par la **passivité**
 - assurer la stabilité **sans linéarisation**
 - conserve les **avantages de modularité** des approches par impédance
- IDA-PBC basé sur un **modèle de charge idéalisée haut niveau**
 - **non invasif** dans la conception des charges pour les équipementiers
- Différence entre la charge réelle et modèle de charge idéale :
 - **preuve de stabilité** assurée par le théorème de **stabilité Input-to-State**.

Perspectives

- Développer le travail sur l'Input-to-State Passivity
 - **impact** quantitatif d'une **erreur de commande** sur la déviation de l'état : information primordiale pour les **systèmes bornées**
- Étude de contrôle IDA-PBC plus performant que celui étudié ici
 - Implantation d'une référence x_d dynamique
 - Résolution plus performante de l'équation matricielle IDA-PBC
- Démontrer le travail réalisé sur un banc d'essai représentatif

Thank you

© Copyright Airbus (Operation SAS 2026) / Stabilisation de charge à puissance constante par un contrôle port-hamiltonien

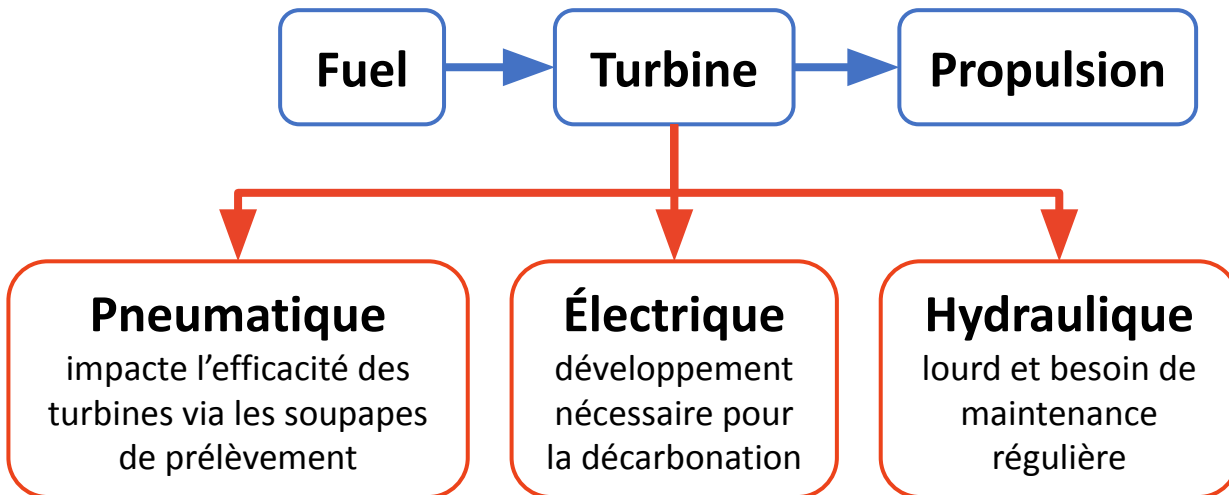
This document and all information contained herein is the sole property of Airbus. No intellectual property rights are granted by the delivery of this document or the disclosure of its content. This document shall not be reproduced or disclosed to a third party without the expressed written consent of Airbus. This document and its content shall not be used for any purpose other than that for which it is supplied.

Airbus, its logo and product names are registered trademarks.

Introduction

Contexte - Principe de l'avion plus électrique

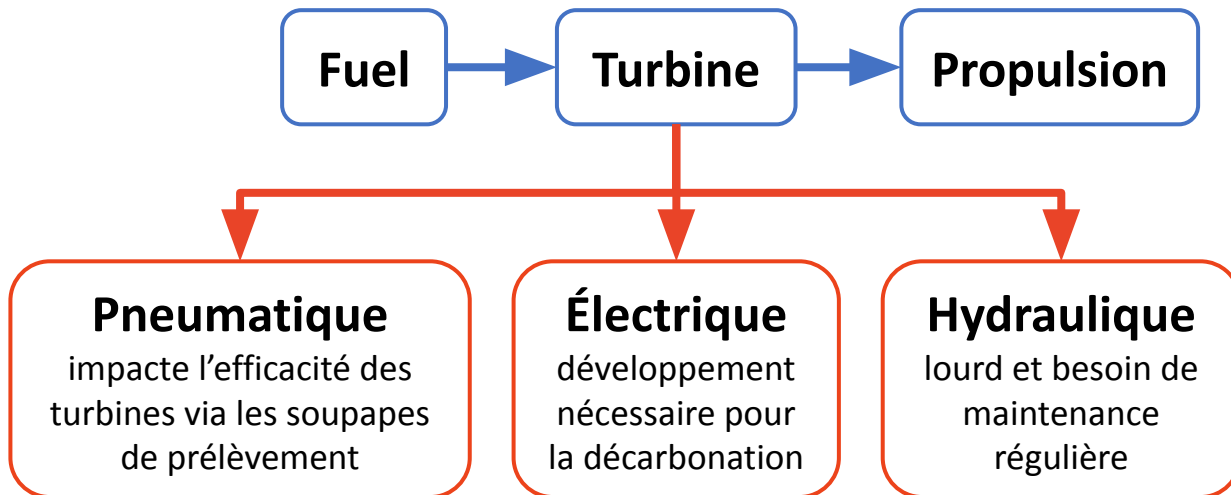
Architecture standard des avions civils en service



Introduction

Contexte - Principe de l'avion plus électrique

Architecture standard des avions civils en service



Objectif MEA :

- Propulsion thermique
- **Auxiliaires 100% électrique**
(+ aide à la propulsion)

