



Optimisation du dimensionnement de la chaîne électrique d'un système de micro-cogénération

Projet CETI - ANR

Thu Thuy DANG, doctorante
Marie RUELLAN, Maître de conférence
Laurent PREVOND, Maître de conférence
Hamid BEN AHMED, Maître de conférence - HDR

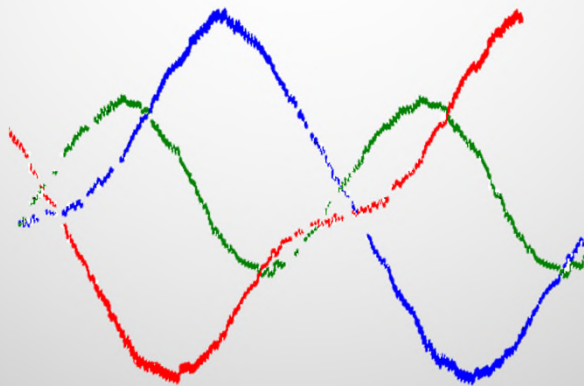
Equipe SETE, Laboratoire SATIE - UMR 8029, ENS Cachan



Plan

- 1) Introduction générale
- 2) Couplage des modèles - Banc d'essai virtuel
- 3) Analyse des résultats
- 4) Optimisation de la chaîne électrique
- 5) Etude de rentabilité du système
- 6) Conclusions et perspectives

Introduction générale



Vision globale d'un système complexe

Notre système est constitué principalement de:
1 moteur Stirling « double effet »,
1 génératrice à induction linéaire tubulaire,
1 chaîne de convertisseurs statiques.

Démarche scientifique:

- Division des tâches:
- ❑ FEMTO-ST: Modélisation et réalisation du moteur Stirling « double effet » ✓
- ❑ SATIE: Modélisation et réalisation de la chaîne électrique, contrôle/ commande global ✓
- Couplage des modèles ✓
- Assemblage des prototypes pour tests opérationnels ⌚

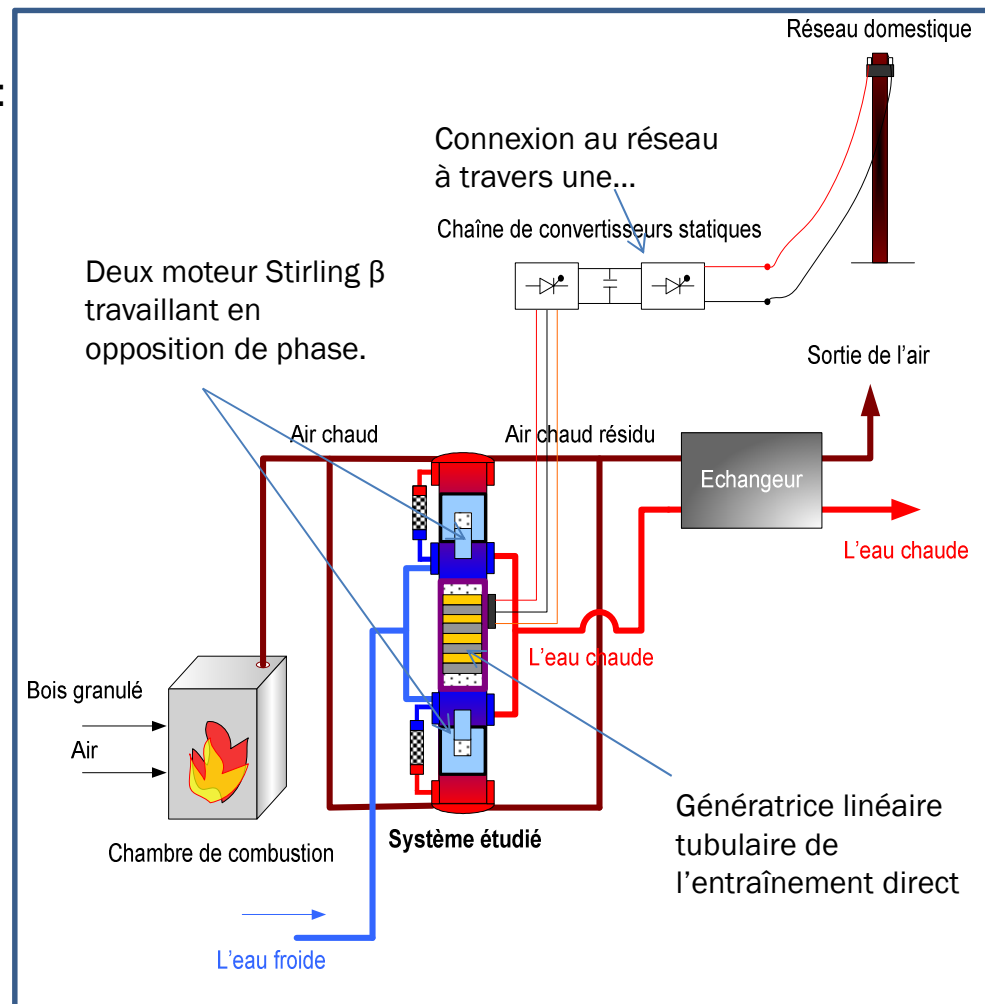


Schéma de principe du système de micro-cogénération à moteur Stirling « double effet »

Couplage des modèles

Banc d'essai virtuel

Réalisation du couplage des modèles

Etat des connaissances sur le système

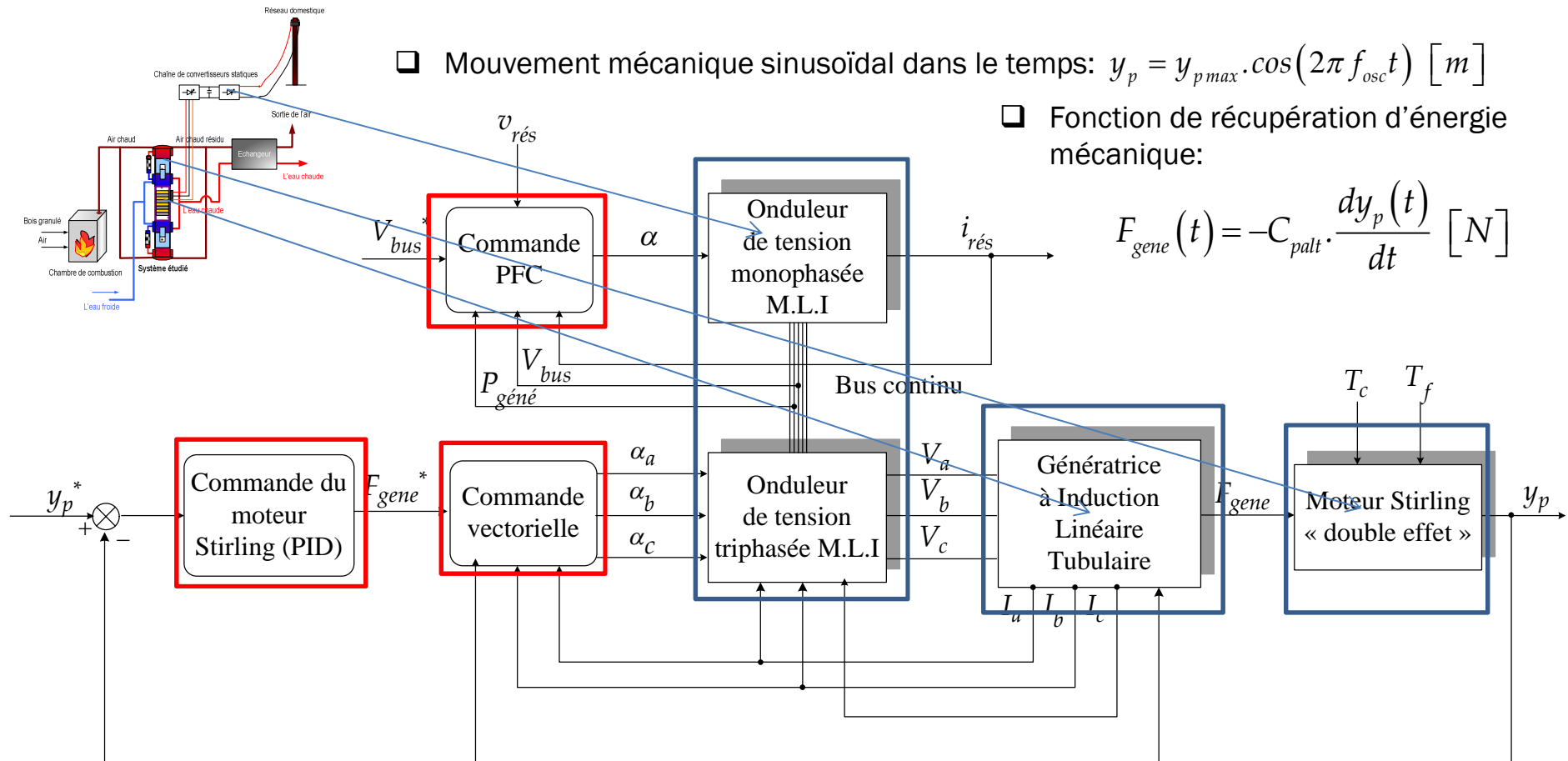
	Etude théorique		Validation expérimentale	
	Modèle analytique	Stratégie de commande	Du modèle analytique	De la stratégie de commande
Moteur Stirling « double effet »	✓ (Equipe FEMTO)	✓	✗	✗
Génératrice à induction linéaire tubulaire	✓	✓	✓	✓
Chaîne des convertisseurs statiques de puissance	✓	✓	✓	✗



Banc d'essai virtuel indispensable

Nota: Les détails des modèles sont en annexes

Réalisation du couplage des modèles ou le « banc d'essai virtuel »



Synoptique du modèle globale

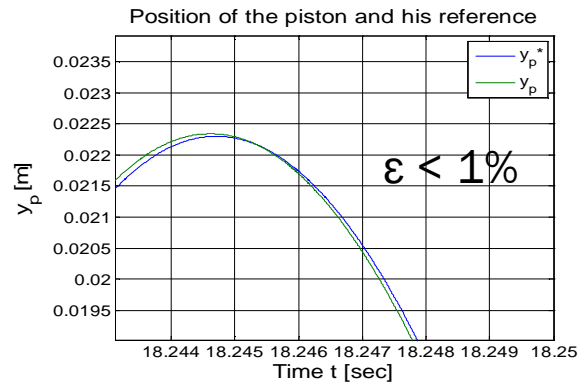
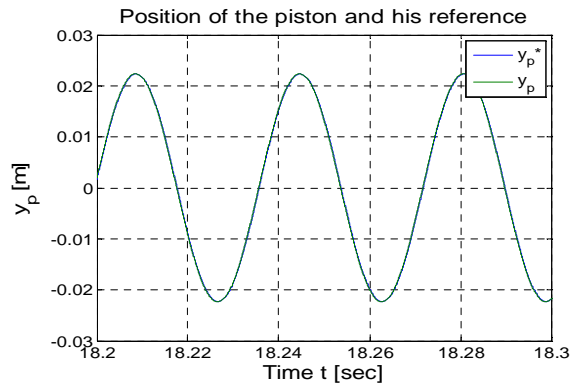
La commande vectorielle de la machine à induction linéaire tubulaire a été étudiée et validée expérimentalement sur un prototype (Annexe).

Analyse des résultats du banc d'essai virtuel

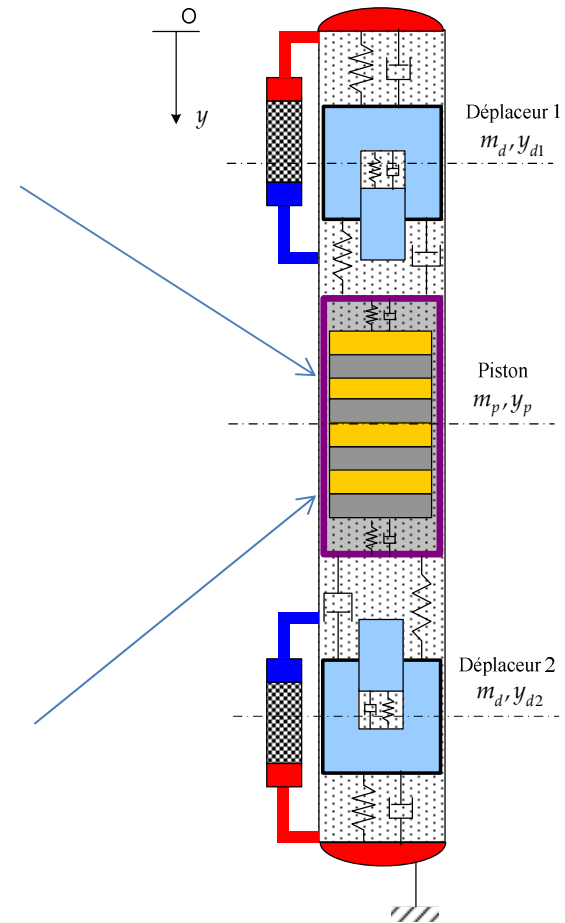
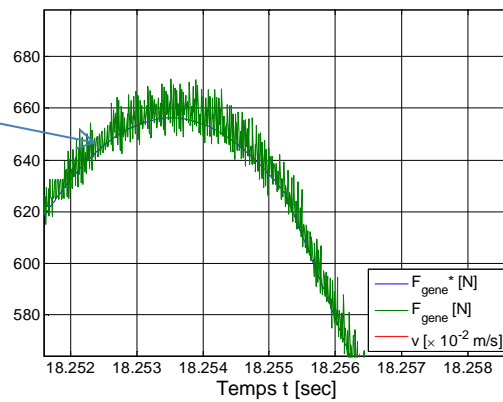
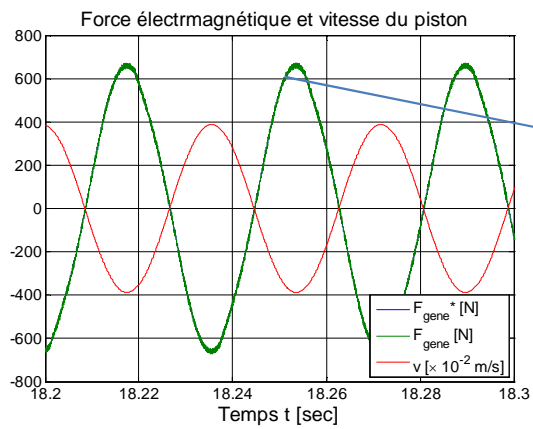
Analyse des formes d'onde

Résultats du banc d'essai virtuel

Mouvement du piston du moteur Stirling « double effet »



Maîtrise de la force électromagnétique résistante de la TLIG

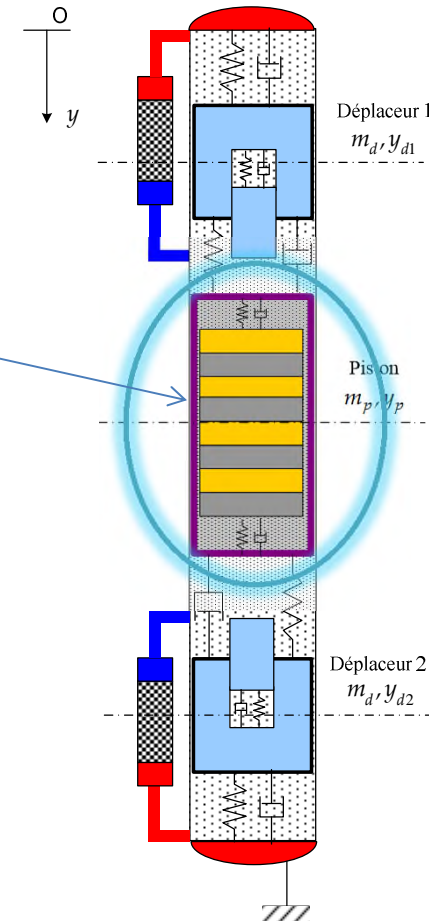
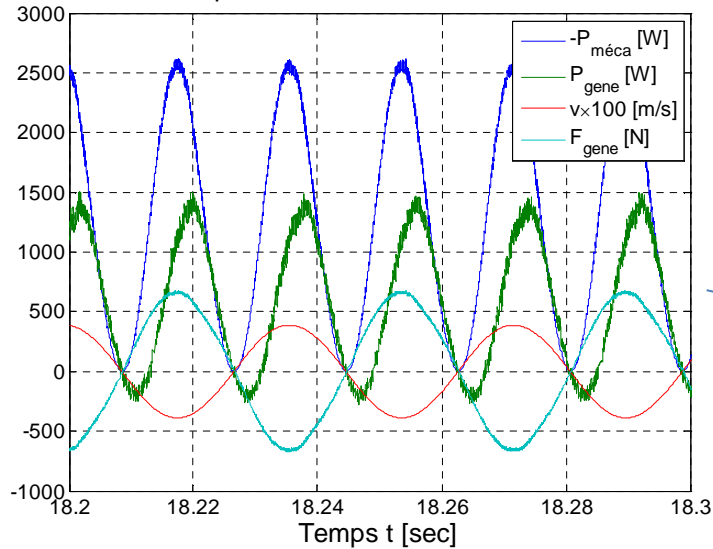


Analyse des formes d'onde

Résultats du banc d'essai virtuel

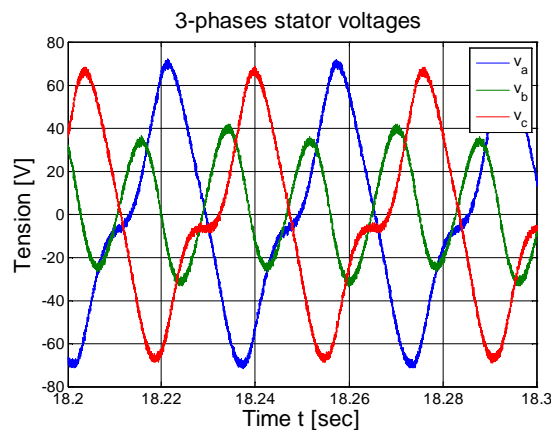
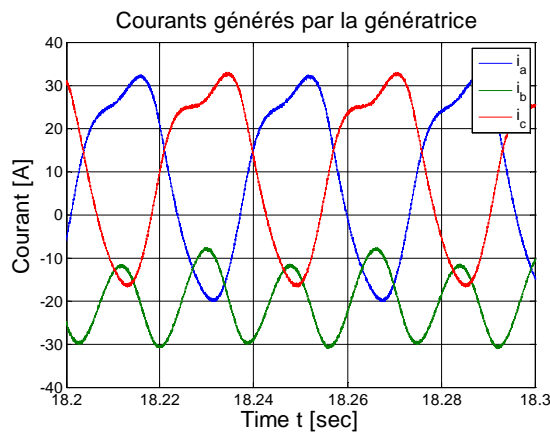
Fonctionnement de la TLIG

Pour comprendre le fonctionnement de la TLIG



Thu

Formes d'onde des courants et tensions générés

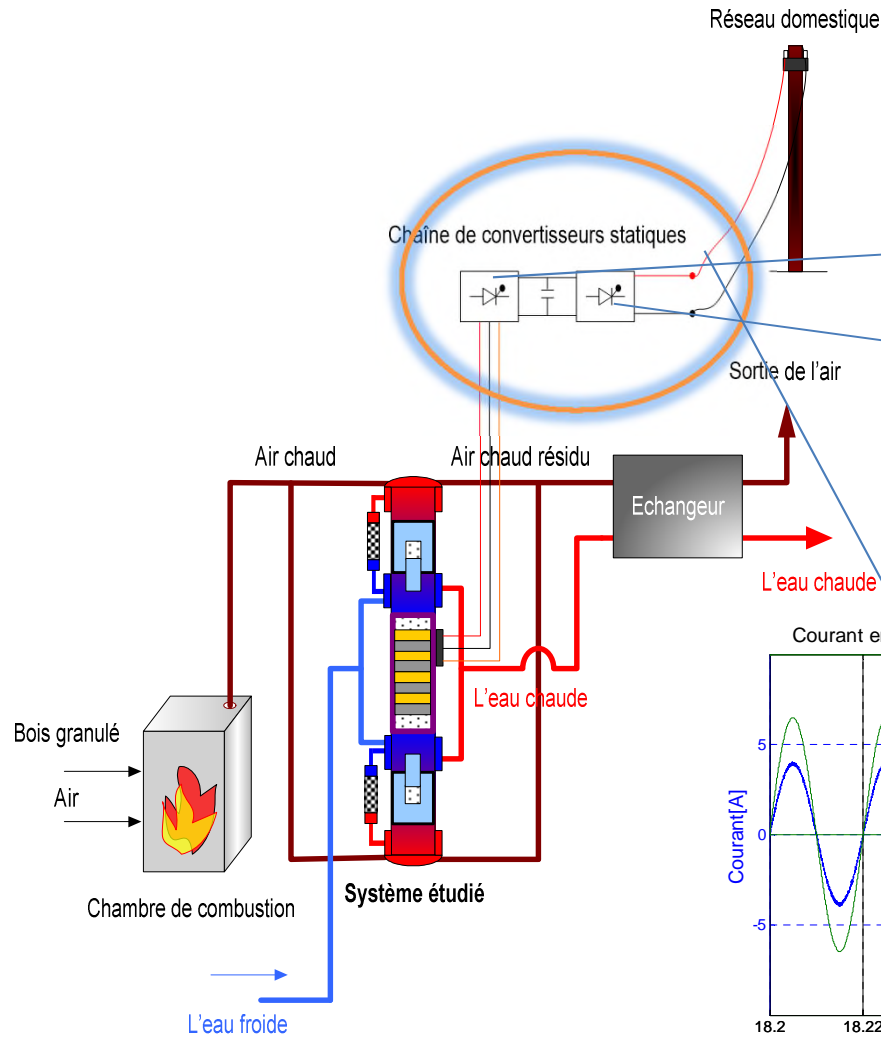


03/02/2013

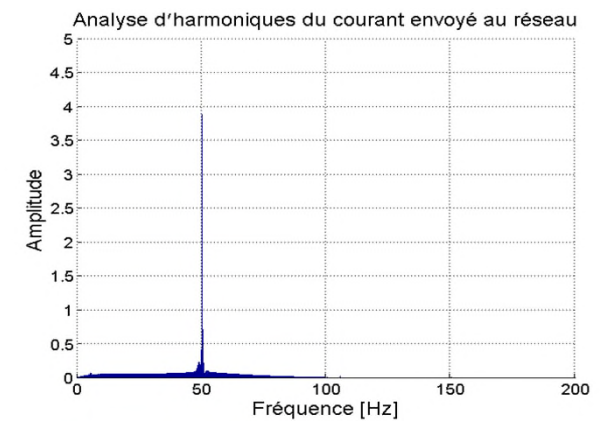
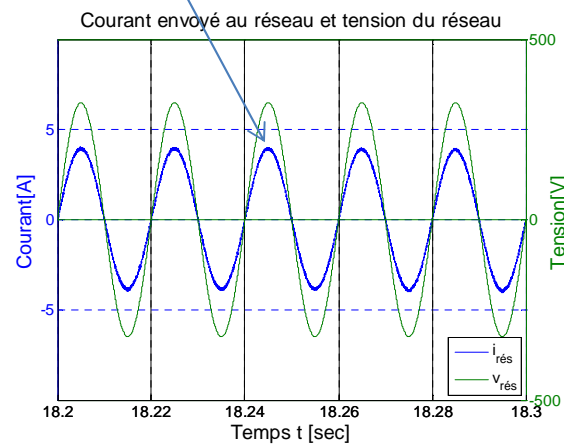
10

Analyse des formes d'onde

Résultats du banc d'essai virtuel



- ❑ Chaîne des convertisseurs → transformer la forme d'onde des courants générés pour injecter au réseau un courant sinusoïdal, en phase avec la tension du réseau.
- ❑ L'onduleur triphasé côté génératrice AC/DC → la commande vectorielle.
- ❑ L'onduleur monophasé côté réseau DC/AC (commande PFC) → l'injection sinusoïdale de courant



Bilan de puissance du système

Résultats du banc d'essai virtuel

Point de fonctionnement : $y_{pmax} = 0,0223$ [m] $\omega_{osc} = 174$ [rad/s]	Puissance active [W]	Pertes [W]	Rendement
Puissance mécanique générée par le m. Stirling	1255,2		
Puissance électrique générée par la TLIG	537,5		
Pertes joules statoriques		249,5	
Pertes joules rotoriques		468,0	
Rendement de la conversion mécano-électrique			42,8 %
Pertes dans le convertisseur côté génératrice		104,2	
Pertes dans le convertisseur côté réseau		7,1	
Pertes dans le condensateur du bus DC		0,2	
Puissance électrique injectée au réseau	426,0		
Rendement global			33,9 %

Amélioration possible du bilan de puissance du système

→ optimisation de la chaîne électrique (génératrice + convertisseurs statiques)

Pour rappel, la chaîne thermo-mécanique est ici fixe.

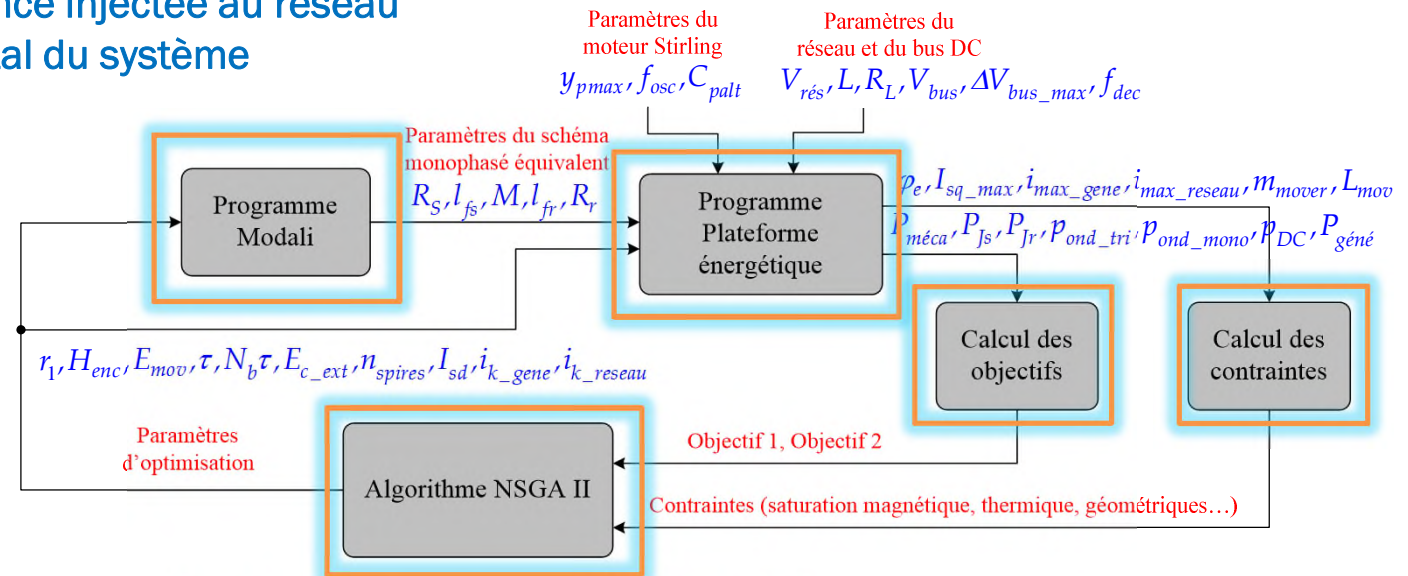
Optimisation de la chaîne électrique

Présentation du processus d'optimisation

Objectif :

Avec un dimensionnement fixe du moteur Stirling « double effet » 1250 W, optimiser le dimensionnement de l'ensemble TLIG et chaîne de convertisseur en vue de:

- Maximiser la puissance injectée au réseau
- Minimiser le coût total du système



Entrées fixes du processus d'optimisation

Grandeurs	Valeurs fixes considérées	Unités
Course du piston	2,23	cm
Fréquence d'oscillation	174	Rad/s
Coefficient de frottement visqueux	167,1	Nm ⁻¹ s
Puissance mécanique moyenne/maximale	1250/2500	W
Force résistante maximale	660	N
Vitesse du mover maximale	3,9	m/s

Les paramètres d'optimisation

	Paramètres	Notations	Min.	Max.	Unités
Variables géométriques	Rayon externe de l'axe	r_2	10	50	mm
	Hauteur des encoches	H_{enc}	1	190	mm
	Epaisseur du mover	E_{mov}	1	5	mm
	Longueur de pas polaire	τ	10	500	mm
	Nombre de paires de pôle	$N_b \tau$	1	150	--
	Epaisseur de la culasse externe	E_{c_ext}	10	50	mm
	Nombre de spires par encoche	n_{spire}	1	1000	--
Variables fonctionnelles	Courant magnétisant	I_{sd}	1	100	A
	Calibre de courant de l'onduleur côté génératrice	i_{k_gene}	1	100	A
	Calibre de courant de l'onduleur côté réseau	i_{k_reseau}	1	40	A

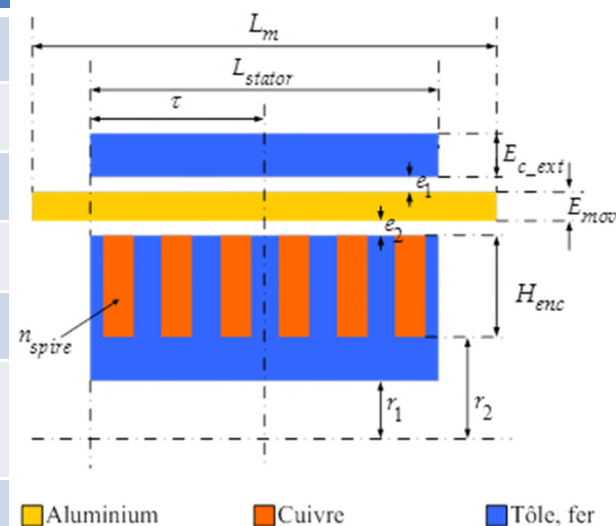
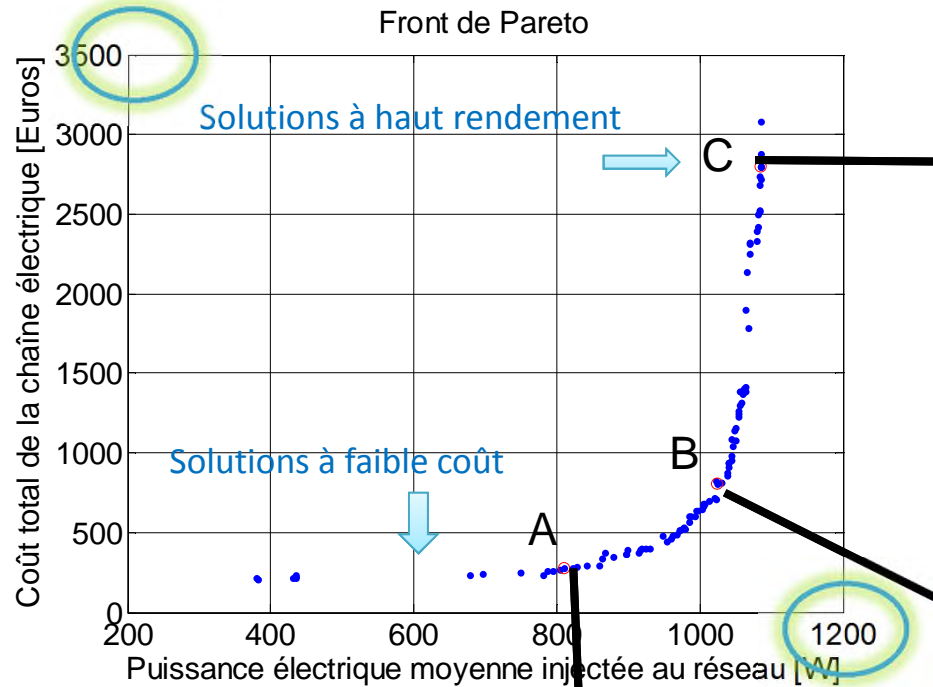
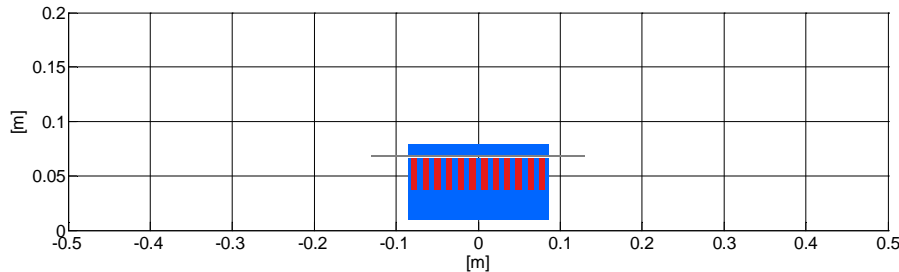


Illustration des paramètres d'optimisation relatifs à la TLIG

Analyse du front de Pareto

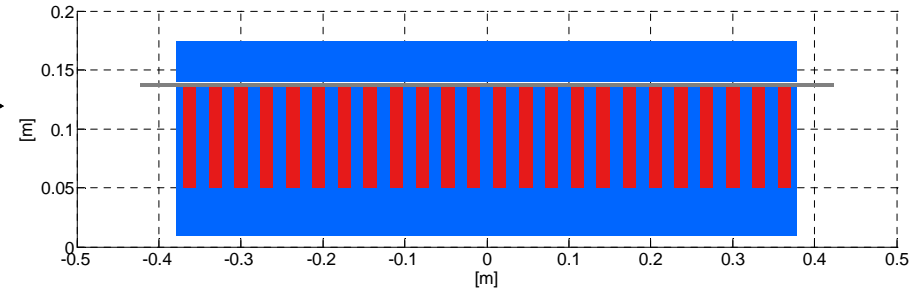


Machine A



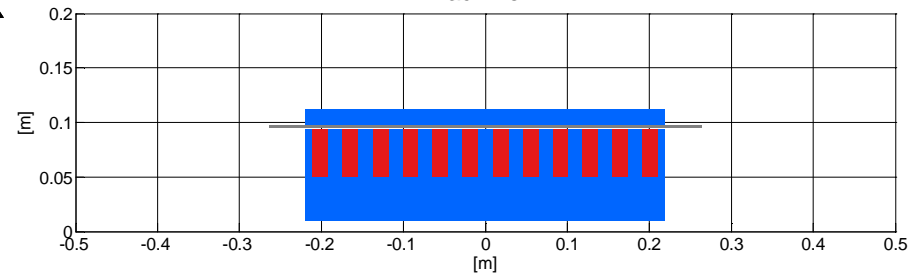
$P_{rés} = 810W \sim 65,5\%$	Coût total = 278 €
$S_{ond-tri} = 2kVA$	$S_{ond-mono} = 2kVA$

Machine C



$P_{rés} = 1086W \sim 86,5\%$	Coût total = 2802 €
$S_{ond-tri} = 39,6kVA$	$S_{ond-mono} = 14,4kVA$

Machine B



$P_{rés} = 1024W \sim 81,6\%$	Coût total = 808€
$S_{ond-tri} = 4,4kVA$	$S_{ond-mono} = 9,6kVA$

Etude de rentabilité du système de micro-cogénération

Méthode et hypothèses de calcul de rentabilité du micro-cogénérateur

Objectif: Grâce au gain de revente d'électricité, trouver une configuration optimale qui offre un temps de retour minimal sur les coûts d'investissement et d'utilisation du système.

Hypothèses simplificatrices:

- Coût du moteur Stirling est fixe: $C_{Stirling} = 4000 \text{ €}$
- Trois énergies primaires considérées: gaz (0,07€/kWh), biomasse (0,03€/kWh), solaire(0€/kWh).
- Coût de maintenance et de réparation négligé.
- Le système fonctionne en pleine charge tout au long de l'année: $\tau_{an} = 8760 \text{ h}$
- Rendement du moteur Stirling est fixe à 50%.
- Efficacité de la combustion des énergies primaires 100%
- Toute production électrique sera vendue.

Le temps de rentabilité est trouvé quand l'équivalence suivante est atteinte:

$$\underbrace{p_{kWh_e} \cdot P_{rés} \cdot 10^{-3} \cdot t}_{\text{gain de la revente d'électricité}} = \underbrace{C_{gaz,biomasse} \cdot \frac{\langle P_{méca} \rangle}{\eta_1} \cdot 10^{-3} \cdot t}_{\text{coût des énergies primaires}} + \underbrace{C_{Stirling} + C_{chaîne}}_{\text{coût d'investissement}}$$

$$\xrightarrow{\text{03/02/2013}} C_{chaîne} = \left(p_{kWh_e} \cdot 10^{-3} \cdot t \right) \left(P_{rés} - \frac{1}{\eta_1} \frac{C_{gaz,biomasse}}{p_{kWh_e}} \langle P_{méca} \rangle \right) - C_{Stirling} \quad \longleftrightarrow \text{Caractéristique de rentabilité}$$

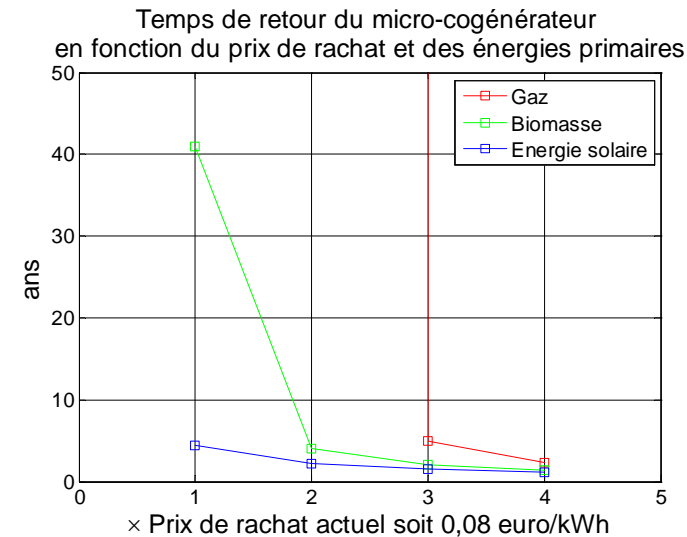
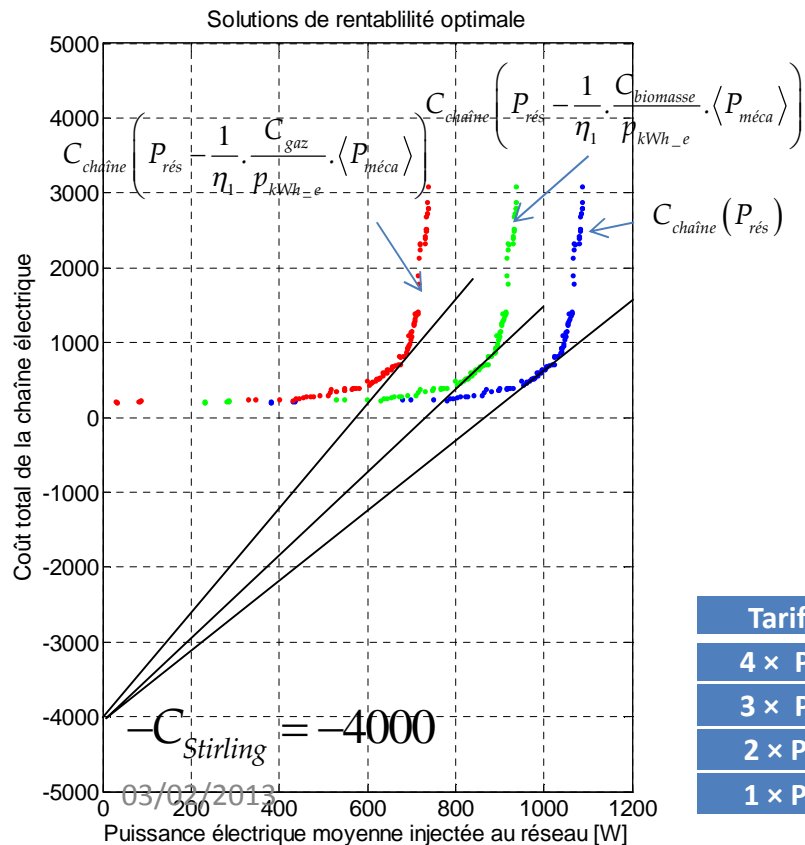
Bao Thuy DANG - Journée de la micro-cogénération, Paris, 2013

Résultats de rentabilité

$$\rightarrow C_{chaîne} = \left(p_{kWh_e} \cdot 10^{-3} \cdot t \right) \left(P_{rés} - \frac{1}{\eta_1} \cdot \frac{C_{gaz,biomasse}}{p_{kWh_e}} \cdot \langle P_{méca} \rangle \right) - C_{Stirling} \leftrightarrow y(x) = Ax + B$$

La solution de cette équation est l'intersection entre la caractéristique $C_{chaîne}(P_{rés})$ et la caractéristique de la rentabilité ci-dessus.

A est minimisé lorsque la caractéristique de rentabilité est tangentielle avec la courbe $C_{chaîne}(P_{rés})$



Tarif de rachat (€/kWh)	Gaz naturel	Biomasse	Energie solaire
4 × Prix de rachat actuel	2,4 ans	1,4 ans	1,1 ans
3 × Prix de rachat actuel	5,0 ans	2,1 ans	1,5 ans
2 × Prix de rachat actuel	infini	4,0 ans	2,2 ans
1 × Prix de rachat actuel	infini	41 ans	24,4 ans

Conclusions et perspectives

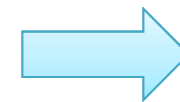
Conclusions

Nous avons traité l'étude d'un système de micro-cogénération de structure très innovante:

- ❑ Le moteur Stirling « double effet »: deux moteurs β en opposition de phase.
- ❑ La génératrice à induction linéaire tubulaire dont le secondaire est le piston lui-même
- ❑ La chaîne des convertisseurs statiques: AC/DC triphasé + DC/AC monophasé, connectant le système au réseau domestique.

Nous avons considéré un couplage des modèles dans une simulation globale appelée « banc d'essai virtuel »:

- ❑ Boucle externe d'asservissement de la position du moteur Stirling par une commande P.I.D. Sa consigne est sinusoïdale de l'amplitude 2,23 cm, de fréquence 174 rad/s (fréquence naturelle). Le moteur fournit 1250W mécanique.
- ❑ Boucle interne de la commande vectorielle de la force électromagnétique. Sa consigne est aussi sinusoïdale, élaborée par le correcteur P.I.D de la boucle externe. La force est résistante vis-à-vis du mouvement du piston/ mover, de l'amplitude 670N, en opposition de phase avec la vitesse d'amplitude 3,9 m/s. Obtention des formes d'onde particulières des courants et tension générés.
- ❑ Transformation des formes d'onde des courants avant de les envoyer au réseau sous forme sinusoïdale en phase avec la tension du réseau.



Conclusions

Nous avons traité l'étude d'optimisation du dimensionnement de la chaîne électrique:

- ❑ La chaîne thermo-mécanique est fixée à une géométrie qui fournit 1250W.
- ❑ Recherche des solutions de l'ensemble (génératrice + convertisseurs) qui maximisent le puissance injectée au réseau et qui minimisent le coût total.

Nous avons obtenu des solutions sous forme d'un front de Pareto:

- ❑ Les solutions qui maximisent le rendement global atteignent plus de 80%, avec les coûts d'environ 3000 €, soit 2,6 €/W_é.
- ❑ Les solutions qui minimisent le coût total présentent les rendement globaux d'environ 60%, pour les coûts de l'ordre de 250 €, soit 0,3 €/W_é.

Nous avons considéré un calcul de rentabilité du micro-cogénérateur:

- ❑ Le méthode consiste à calculer la rentabilité du système en supposant que le coût du moteur Stirling et de la partie thermique est fixe. Parmi les configurations optimales de la chaîne électrique, le temps de retour du système global minimal est ainsi trouvé sans avoir recours à une optimisation globale du micro-Co générateur (chaîne thermodynamique + chaîne électrique).
- ❑ Le prix de rachat et les sources d'énergies primaires, deux facteurs importants d'influence vis-à-vis de la rentabilité du système, sont considérés.
- ❑ Le temps de retour obtenu sont à prendre comme des indications.

Perspectives

L'étude d'optimisation du système global

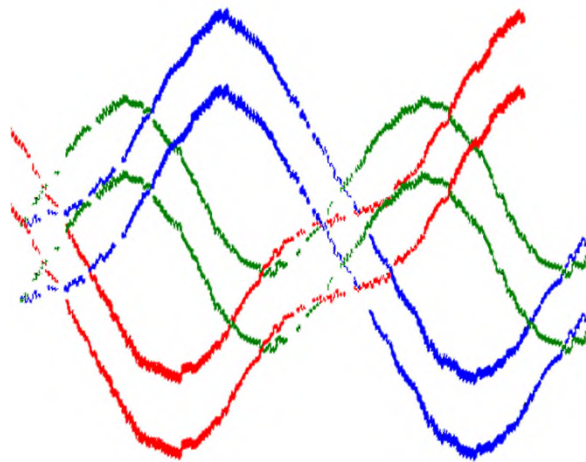
- Moteur Stirling « double effet »
- Chaîne électrique

D'autres structure de la génératrice linéaire tubulaire → A aimants permanents.

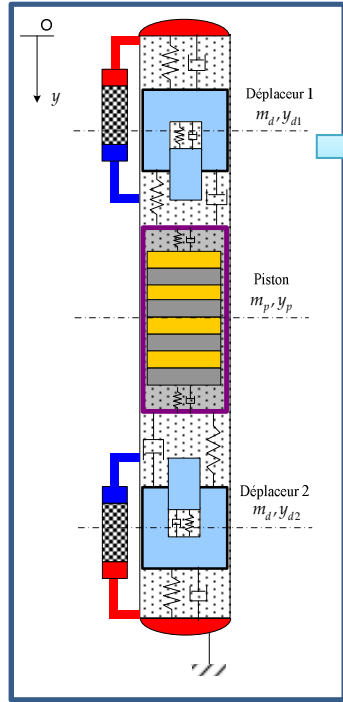
Merci de votre attention!

Annexes

Etude des modèles séparément



Modèle thermo-mécanique du moteur Stirling « double effet » et sa commande P.I.D



Modèle mécanique par la loi Newton [1][2]:

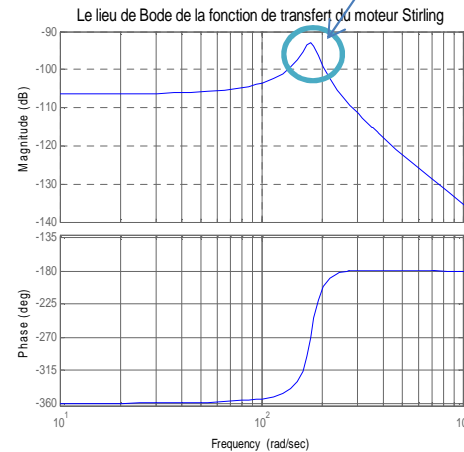
$$\begin{aligned}
 m_p \ddot{y}_p &= A_p P_{f1} - A_p P_{f2} - A_{pi} P_{b1} + A_{pi} P_{b2} - C_{Hp} \dot{y}_p - C_{palt} \dot{y}_p \\
 m_{d1} \ddot{y}_{d1} &= A_p P_{c1} - (A_p - A_r) P_{f1} - A_r P_{m1} - C_{Hd} \dot{y}_{d1} - C_{d1alt} \dot{y}_{d1} \\
 m_{d2} \ddot{y}_{d2} &= -A_p P_{c2} + (A_p - A_r) P_{f2} + A_r P_{m2} - C_{Hd} \dot{y}_{d2} - C_{d2alt} \dot{y}_{d2}
 \end{aligned}$$

Modèle thermodynamique par la méthode Schmidt [1][3]:

Expressions des pressions dans différents espaces du moteur en fonction des paramètres géométriques, températures et pression initiale [1][3]:

$$\begin{aligned}
 P_{f1} &= ? \quad P_{f2} = ? \quad P_{c1} = ? \quad P_{c2} = ? \\
 P_{b1} &= ? \quad P_{b2} = ? \quad P_{m1} = ? \quad P_{m2} = ?
 \end{aligned}$$

Fréquence naturelle



Modèle de vibration mécanique de 3 ddls avec les coefficients de raideurs et d'amortisseurs

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_p \\ \ddot{y}_{d1} \\ \ddot{y}_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{pd1} & K_{pd2} \\ K_{d1p} & K_{d1d1} & 0 \\ K_{d2p} & 0 & K_{d2d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ y_{d1} \\ y_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{pp} & D_{pd1} & D_{pd2} \\ D_{d1p} & D_{d1d1} & 0 \\ D_{d2p} & 0 & D_{d2d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_p \\ \dot{y}_{d1} \\ \dot{y}_{d2} \end{bmatrix}$$

La cinématique du système est représentée par le schéma de masses - ressorts - amortisseurs [1]

$$\frac{Y_p(p)}{F_{gene}(p)} = G \cdot \frac{p^2 + N_1 p + N_0}{p^4 + D_3 p^3 + D_2 p^2 + D_1 p + D_0}$$

Géométrie d'un moteur Stirling « double effet » 1100 W

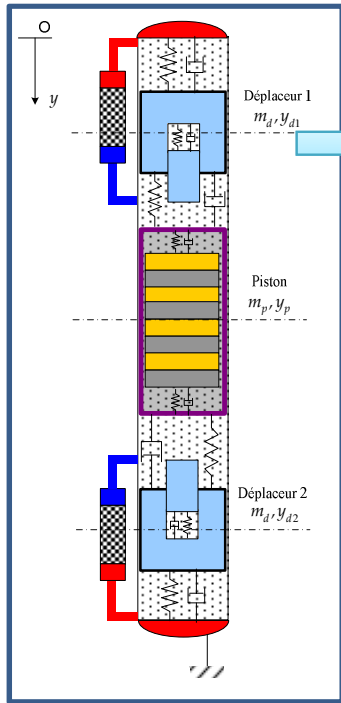
Paramètres géométriques			
$A_p = 0,0121 \text{ m}^2$	$V_{EF} = 3,1467 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$	$Y_{pc} = 0,15 \text{ m}$	$m_p = 6 \text{ kg}$
$A_d = 0,0121 \text{ m}^2$	$V_{EC} = 4,2072 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$	$Y_{de} = 0,1 \text{ m}$	$m_d = 0,3 \text{ kg}$
$A_{pi} = 0,0113 \text{ m}^2$	$V_r = 8,765 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$	$V_{ini_b} = 78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$	
$A_r = 9,6211 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$		$V_{ini_m} = 1,4432 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$	
Paramètres thermiques et mécaniques			
$T_c = 650 \text{ K}$	$P_{ini} = 1,375 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$C_{Hp} = 20 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$	$y_{pmax} = 0,0223 \text{ m}$
$T_f = 320 \text{ K}$		$C_{Hd} = 15 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$	



Système non-linéaire

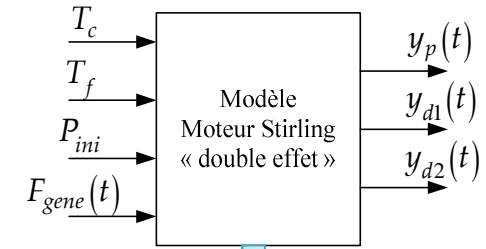
03/02/2013

Modèle thermo-mécanique du moteur Stirling « double effet » et sa commande P.I.D

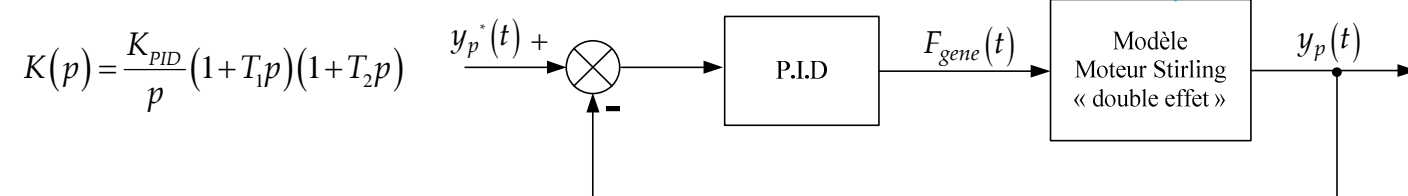


Modèle mécanique par la loi Newton [1][2]:

$$\begin{aligned}
 m_p \ddot{y}_p &= A_p P_{f1} - A_p P_{f2} - A_{pi} P_{b1} + A_{pi} P_{b2} - C_{Hp} \dot{y}_p - C_{palt} \dot{y}_p \\
 m_{d1} \ddot{y}_{d1} &= A_p P_{c1} - (A_p - A_r) P_{f1} - A_r P_{m1} - C_{Hd} \dot{y}_{d1} - C_{d1alt} \dot{y}_{d1} \\
 m_{d2} \ddot{y}_{d2} &= -A_p P_{c2} + (A_p - A_r) P_{f2} + A_r P_{m2} - C_{Hd} \dot{y}_{d2} - C_{d2alt} \dot{y}_{d2}
 \end{aligned}$$

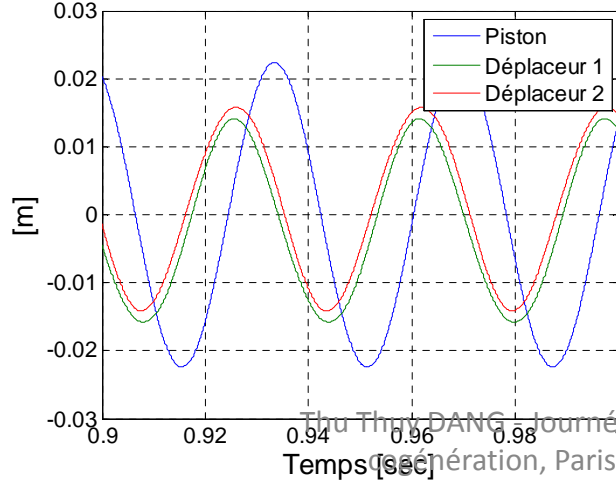


Asservissement de la position du piston avec une commande P.I.D

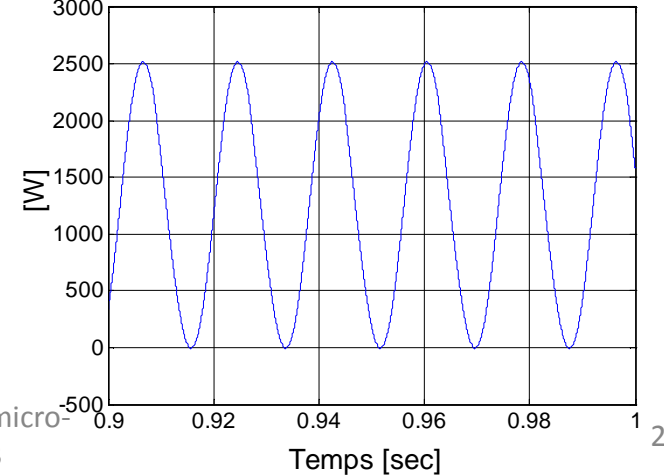


La cinématique du système est représentée par le schéma de masses - ressorts - amortisseurs [1]

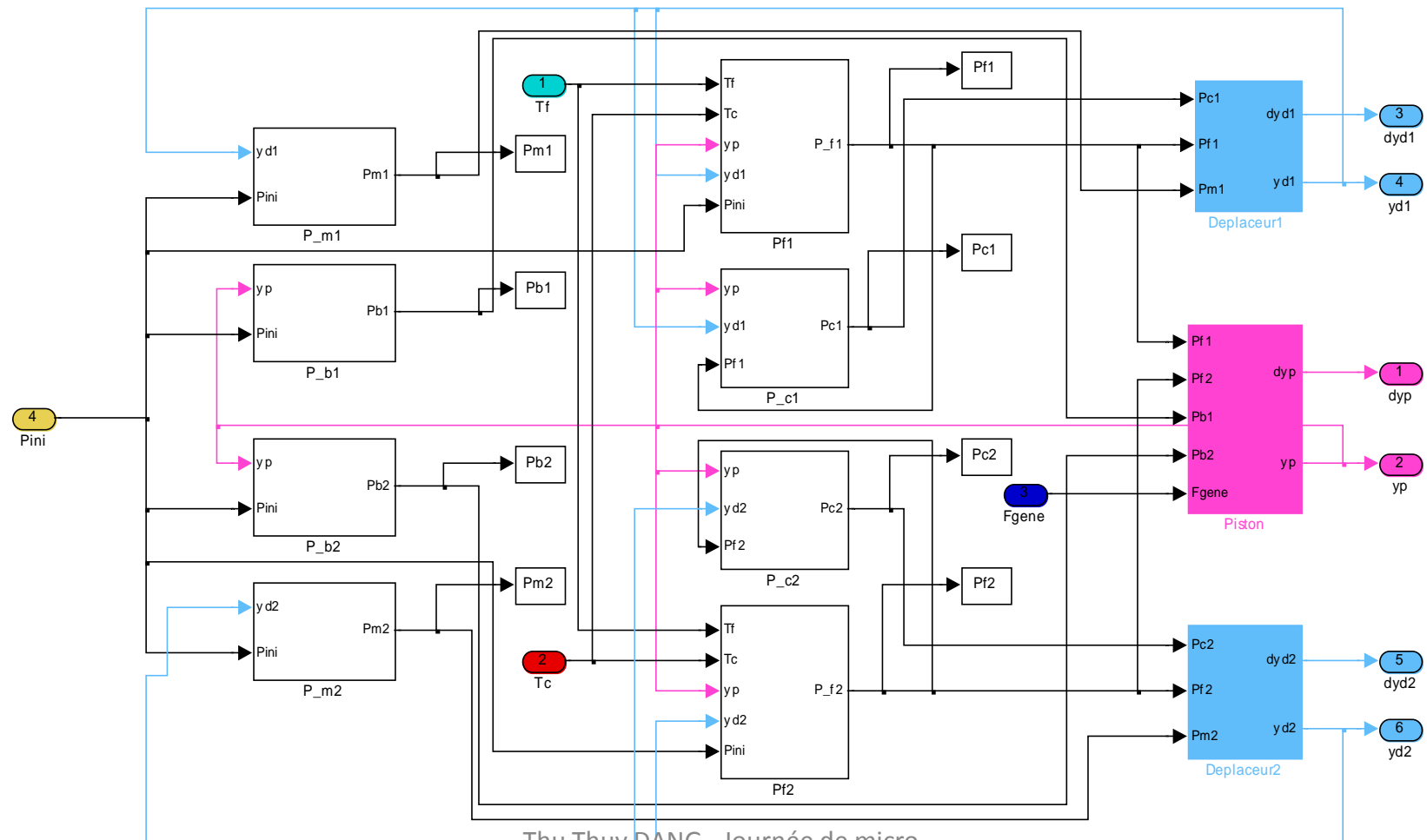
Position du piston et des déplaceurs



Puissance mécanique récupérée sur le piston

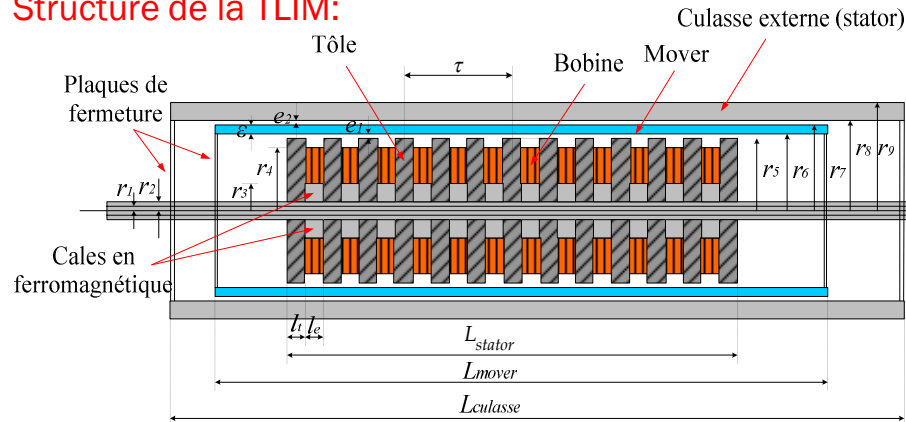


Détails de la simulation du moteur Stirling « double effet »



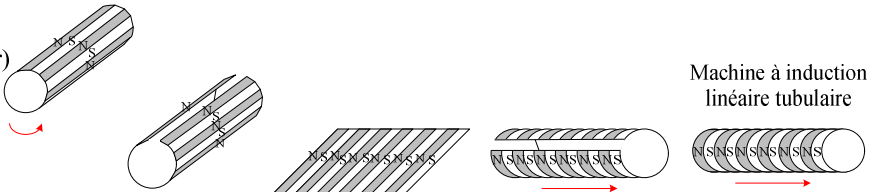
Modèle de la machine à induction linéaire tubulaire (TLIM) et sa commande

Structure de la TLIM:



Modèle dynamique à l'image d'une MAS tournante parce que:

Machine asynchrone tournante traditionnelle



Similitude électromagnétique entre la TLIM et la MAS

Premier prototype de la TLIM, SATIE-CNAM, 2007



Identification des paramètres de la TLIM sur le prototype

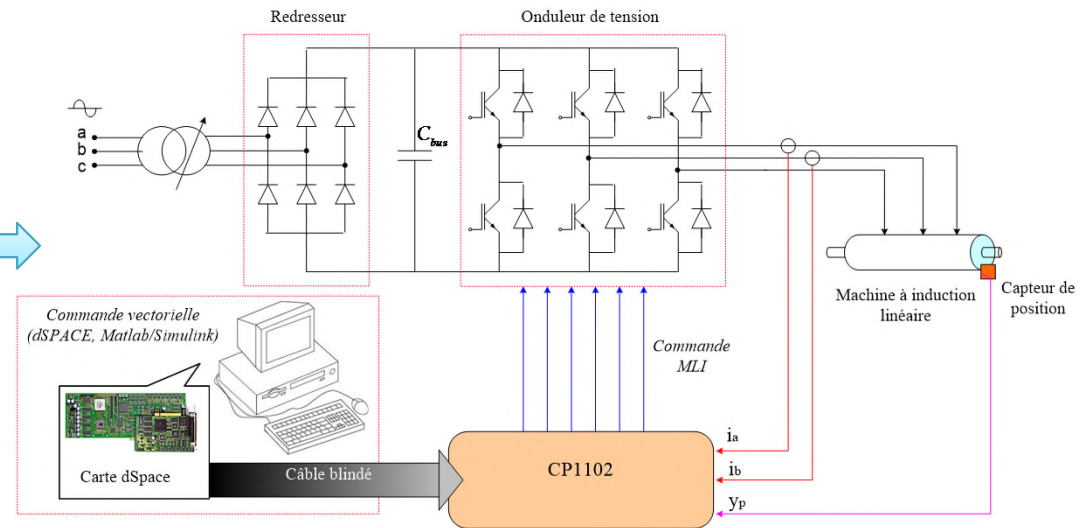
Grandeurs	Notations	Valeurs	Unités
Inductance mutuelle cyclique	M	6,50	mH
Inductance cyclique statorique	L_s	9,68	mH
Inductance cyclique rotorique	L_r	8,31	mH
Résistance statorique	R_s	0,3	Ω
Résistance rotorique	R_r	2,0	Ω
Coefficient de Blondel	σ	0,475	--
Constant de temps rotorique	τ_r	4,15	ms
Longueur de pas polaire	τ	4,8	cm
Masse du mover	m_{mover}	0,7	kg

Validation expérimentale de la commande vectorielle de la TLIM

Banc d'essai en vue de la commande vectorielle de la prototype TLIM



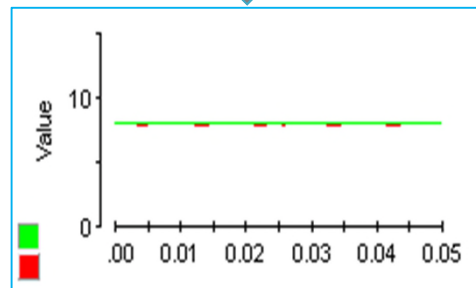
Schéma de câblage:



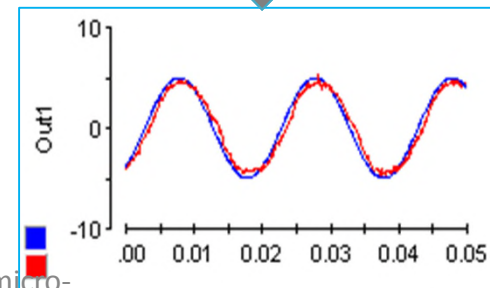
Objectif: Asservir la force électromagnétique de la TLIM en mode moteur selon la consigne suivante:

$$i_m^* = 8 \text{ [A]} \text{ (proportionnelle au flux rotorique)}$$

$$i_{sq}^* = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) \text{ [A]} \text{ (proportionnelle à la force)}$$

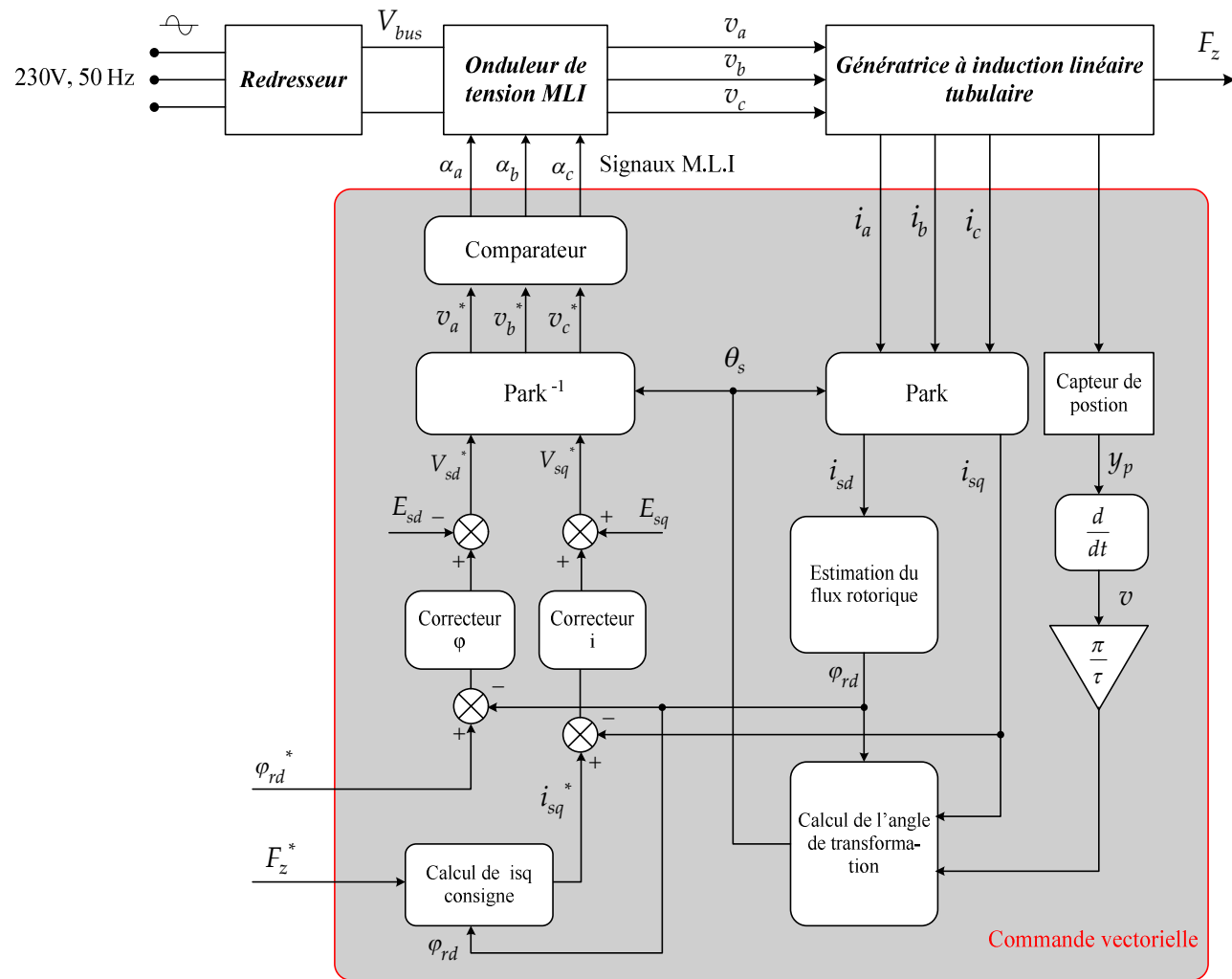


(1) ✓



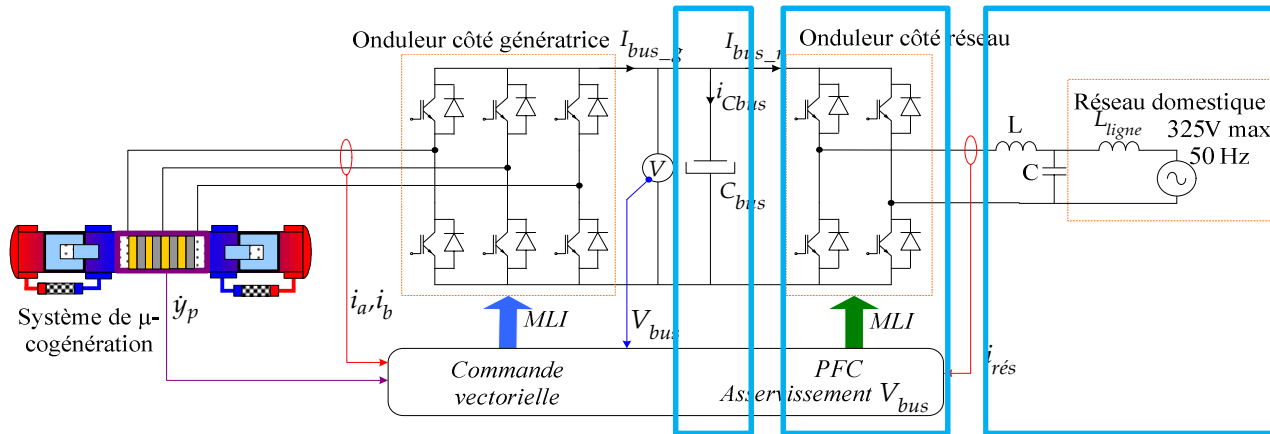
(2) ✓

Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté



Modèle de la chaîne des convertisseurs statiques de puissance et la commande PFC

Structure de la chaîne des convertisseurs connectant le système au réseau:



Objectif: Injection de courant sinusoïdal au réseau, en phase avec la tension.

$$i_{rés}(t) = I_{rés} \cdot \sin(\omega t)$$

$$v_{rés}(t) = V_{rés} \cdot \sin(\omega t)$$

Modèle de l'onduleur monophasé côté réseau

$$V_{ond} = (2\alpha - 1) \cdot V_{bus}$$

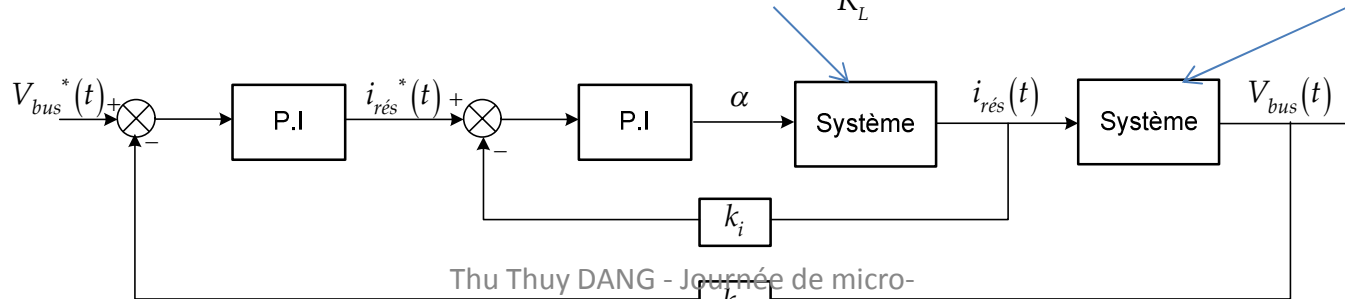
$$V_{bus} = 400 \geq V_{rés}$$

Fonction de transfert entre le courant injecté au réseau et le rapport cyclique:

$$\frac{I_{rés}(p)}{\alpha(p)} = \frac{1}{R_L} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L}{R_L} p}$$

Fonction de transfert entre la tension du bus continu et le courant injecté au réseau :

$$\frac{V_{bus}(p)}{I_{rés}(p)} = \frac{V_{rés} \cdot R_{ch}}{4 \langle V_{bus} \rangle} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{bus} \cdot R_{ch}}{2} \cdot p}$$



Bibliographie

[1]	Isabel GARCIA-BURREL, "Modélisation, commande et optimisation d'un système de micro-cogénération par moteur Stirling "double effet" et générateur asynchrone linéaire," ENS Cachan, Thèse de doctorat 2007.
[2]	Pierre FRANCOIS, "Contribution à la modélisation électromagnétique d'un générateur linéaire à induction appliquée à un micro-cogénérateur Stirling à piston libre," ENS Cachan, Thèse de doctorat 2011.
[3]	Philippe NIKA and François LANZETTA, "Thermodynamique des moteurs Stirling," <i>Revue 3EI</i> , no. 57, pp. 9-17, Juin 2009.
[4]	Julien BOUCHER, François LANZETTA, and Philippe NIKA, "Optimization of a dual free piston Stirling engine," <i>Applied Thermal Engineering</i> , no. 27, pp. 802-811, 2007.
[5]	Marie RUELLAN, Thu Thuy DANG, and Hamid BEN AHMED, "Optimisation de la chaîne électrique d'un système de micro-cogénération linéaire," <i>Conférence EF</i> , 2011.
[6]	I BOLDEA and Syed A. NASAR, <i>Linear electric actuators and generators</i> , Cambridge University Press, Ed., 1997.
[7]	K Deb, A Prata, and R Agrawal, "A fast and Elitist Genetic Algorithm : NSGA II," <i>IEEE Transactions on evolutionary computation</i> , vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002.
[8]	Nicolas BERNARD, Bernard MULTON, and Hamid BEN AHMED, "Le Redresseur MLI en Absorption Sinusoïdale de Courant," <i>La Revue 3EI</i> .
[9]	Sylvie BEGOT et al., "Modèle pour conception/ optimisation d'un moteur Stirling à pistons libres "mécanique"," 2010.