



François Guérin, Dimitri Lefebvre

Université du Havre / GREAH

75 rue Bellot, CS80540, 76058 Le Havre Cedex (France)

{francois.guerin, dimitri.lefebvre}@univ-lehavre.fr

INTRODUCTION

→ Le contexte de notre étude est celui de l'alimentation électrique des zones rurales isolées en Afrique sub-Saharienne. Dans ces territoires, les énergies renouvelables sont une alternative séduisante aux énergies conventionnelles car elles mettent en œuvre des technologies relativement récentes qui ne nécessitent pas de capitaux importants.

→ Très souvent, les systèmes de production d'énergie électrique multi-sources (photovoltaïque, éolien,...) sont les seuls qui peuvent être installés compte tenu de l'absence ou du faible taux de couverture des réseaux électriques conventionnels. Par ailleurs, l'extension des réseaux électriques conventionnels s'avère souvent trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès.

→ Des micro-centrales sont généralement conçues pour répondre à des besoins énergétiques allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète de petits villages ou de petites îles. Elles fournissent non seulement une énergie à un prix abordable mais elles peuvent aussi être à l'origine de créations d'entreprises et d'emplois dans différents secteurs d'activité. De nombreux systèmes de production d'énergie électrique multi-sources sont par conséquent mis en œuvre (Sénégal, Mali, Burkina Faso...) pour l'alimentation de bâtiments institutionnels (hôpitaux, écoles,...) ou l'éclairage public.

→ Les obstacles liés à la fiabilité de la production et à la maintenance peuvent souvent être surmontés (supervision, commandes déportées...). Cet aspect est particulièrement important dans des zones où l'accès à une expertise scientifique et technique est quelquefois difficile. Cependant, pour que ces micro-centrales soient compétitives, il convient de minimiser les interventions humaines en mettant en œuvre des dispositifs de surveillance capables de détecter et de diagnostiquer les défauts qui affectent les composants du système et son instrumentation.

→ C'est dans ce cadre que le CIFRES (Centre International de Formation et de Recherche en Energie Solaire) a proposé au GREAH un partenariat en vue de la commande et de la supervision des systèmes multi-sources conçus pour alimenter la région de Saint-Louis (Zone des Trois Marigots), Potou, Gandon ou Kayar (Sénégal).

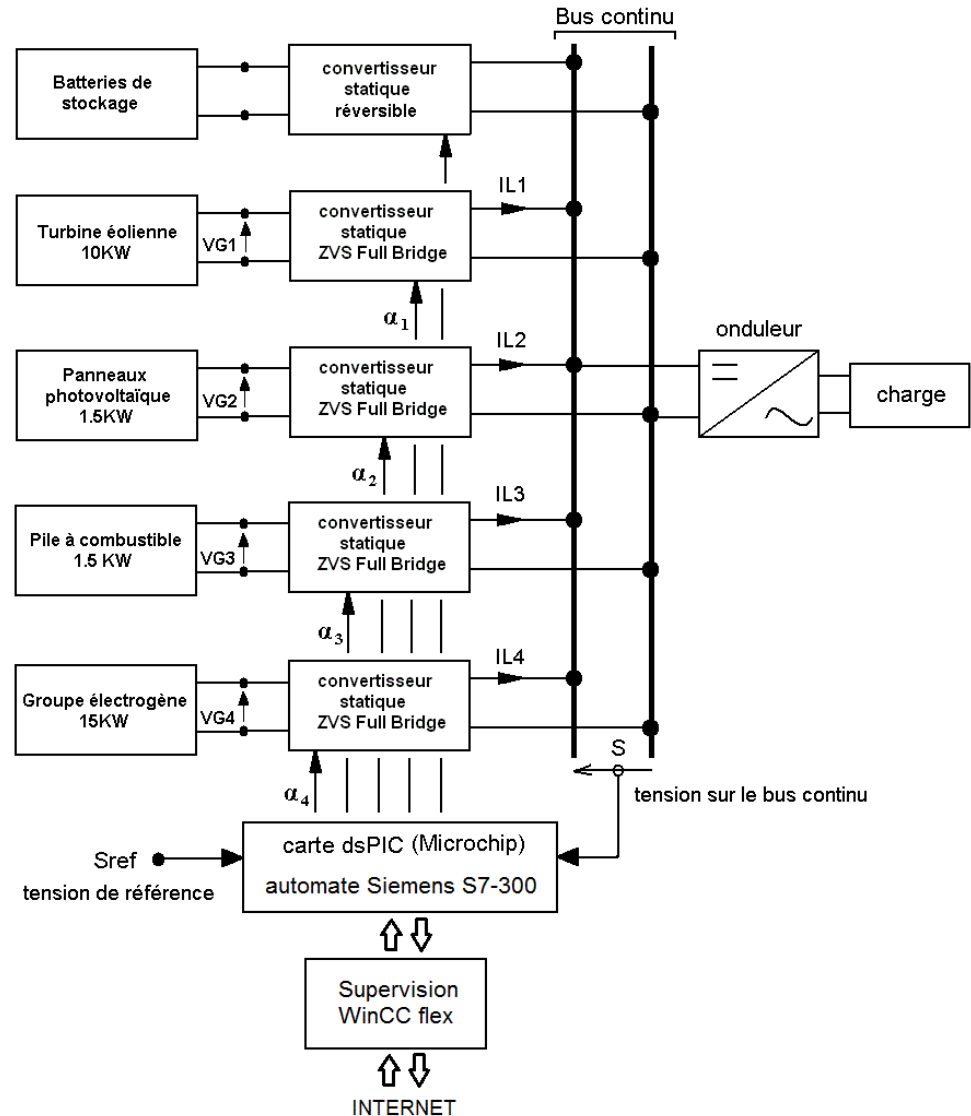
→ L'objectif de ce partenariat est de développer des lois de commande permettant d'optimiser les transferts d'énergie (et d'évaluer leurs performances) et de concevoir des outils de diagnostic et de supervision pour garantir la disponibilité des équipements et fiabiliser le niveau de service délivré (élaboration de commandes tolérantes aux fautes).

Composition des micro-centrales :

- batteries de stockage.
- turbine éolienne.
- panneaux photovoltaïques.
- pile à combustible.
- groupe électrogène diesel.
- convertisseurs statiques ZVS Full Bridge.
- convertisseur réversible Buck/Boost.
- onduleur monophasé ou triphasé.

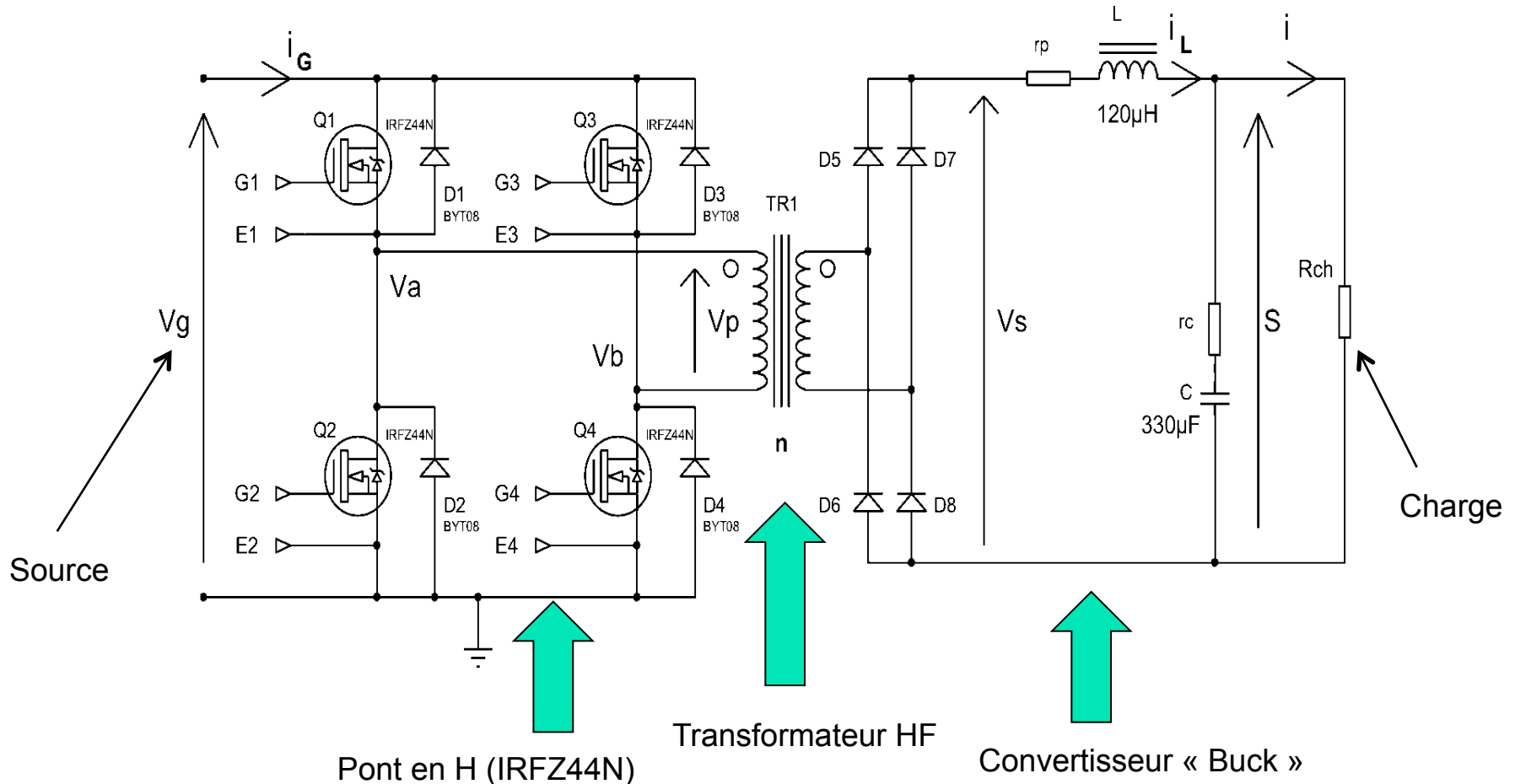
Commande et supervision :

- microcontrôleur dsPIC30F6010A (Microchip).
- automate programmable S7-300 (Siemens).



CONVERTISSEUR ZVS FULL BRIDGE

Convertisseur « Buck » commandé à travers un transformateur HF (isolation, élévation de la tension sur le bus continu) par un pont complet. La commande du pont en H est de type « phase shift » avec commutation de tensions nulles (ZVS).

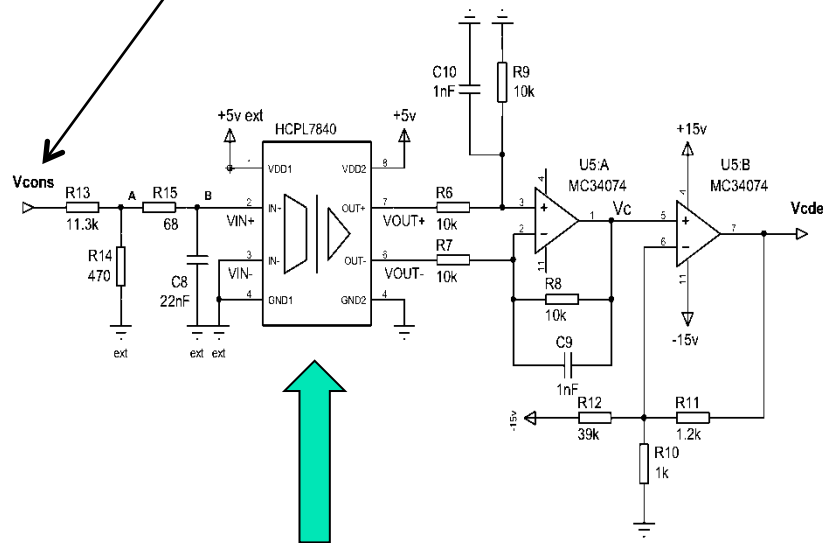


CONVERTISSEUR ZVS FULL BRIDGE

Tension de consigne

0v : tension de sortie S minimale

5v : tension de sortie S maximale



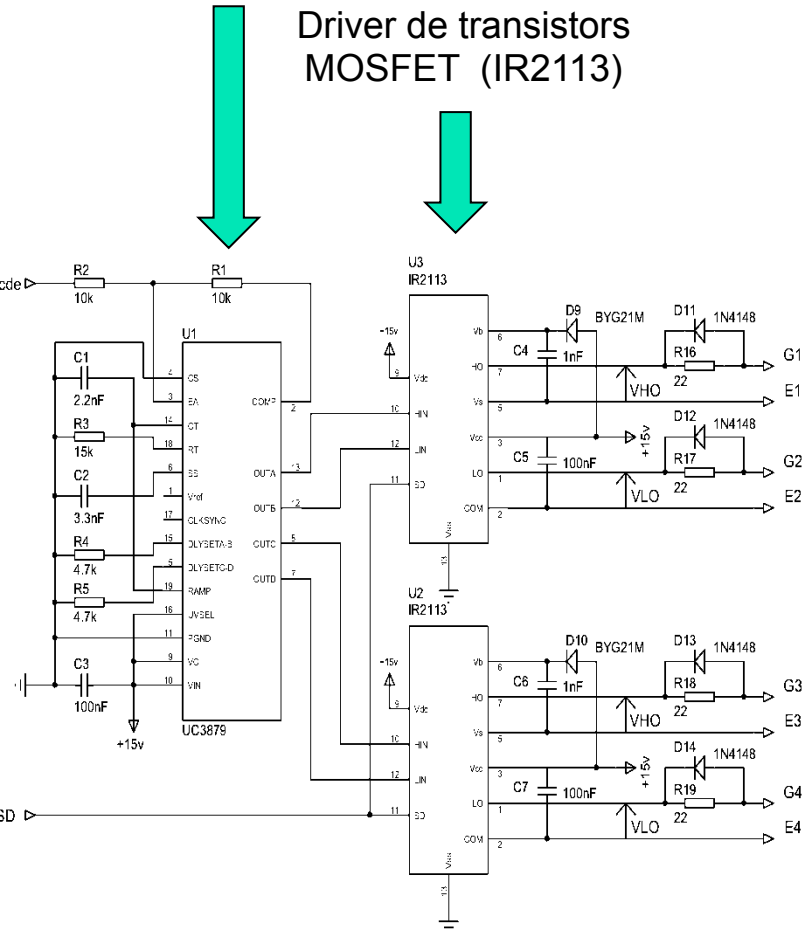
Amplificateur d'isolement
(HCPL 7840)

Commande Phase Shift
(UC3879)

Driver de transistors
MOSFET (IR2113)

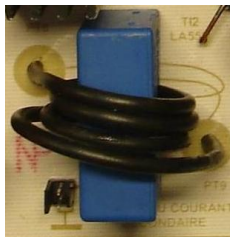
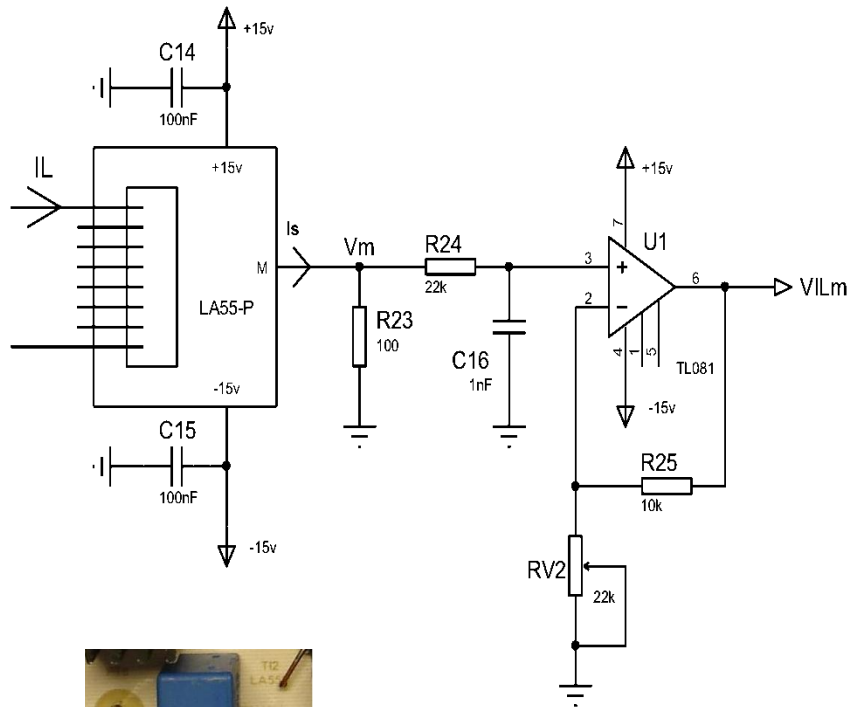
Shut Down

SD



CONVERTISSEUR ZVS FULL BRIDGE

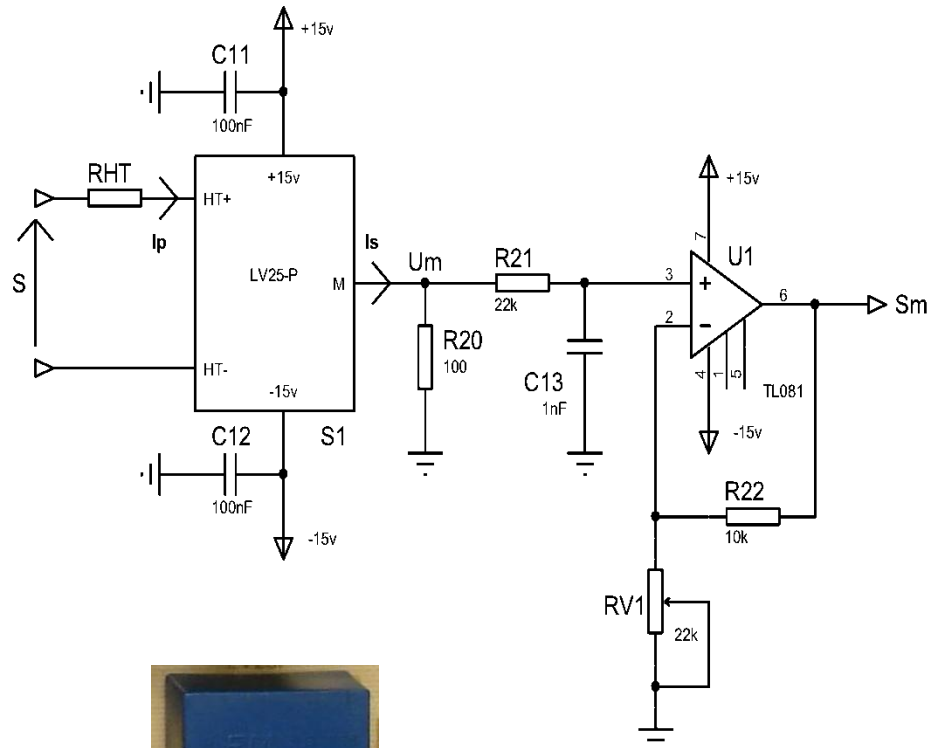
Mesure des courants I_G , I_L



LEM : LA55P

Etalonnage : 1V/1A

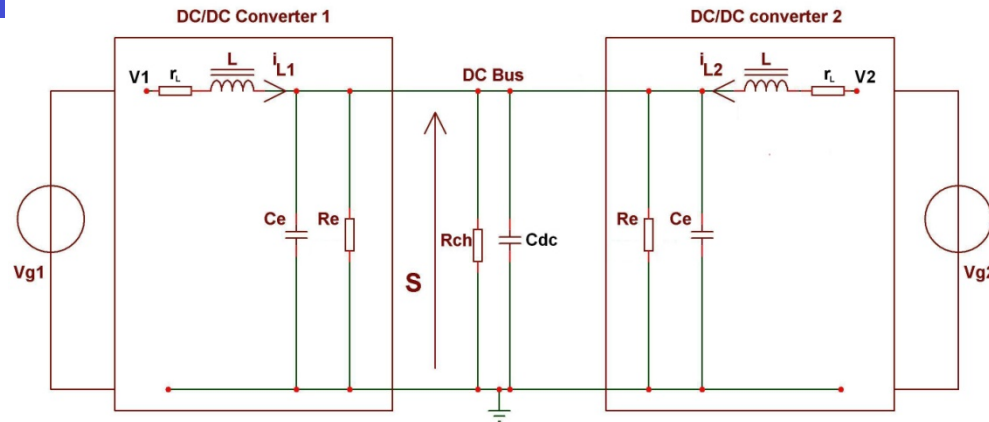
Mesure de la tension S



LEM : LV25P

Etalonnage : 2.5V/60V

MODELISATION (Représentation d'état)



$$R_{EQ} = (R_{CH} \cdot (Re/2)) / (R_{CH} + (Re/2))$$

$$C_{EQ} = 2C_e + C_{dc}$$

$$\underline{X}_M = [I_{L1}, I_{L2}, S]^T \quad \underline{U}_M = [V_{C1}, V_{C2}]^T \quad \underline{Y}_M = [I_{L1m}, I_{L2m}, S_m]^T$$

$$\dot{\underline{X}}_M = \underline{A}_M \cdot \underline{X}_M + \underline{B}_M \cdot \underline{U}_M$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{I}_{L1} \\ \dot{I}_{L2} \\ \dot{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_L}{L} & 0 & \frac{-1}{L} \\ 0 & \frac{-r_L}{L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C_{EQ}} & \frac{1}{C_{EQ}} & \frac{-1}{R_{EQ} \cdot C_{EQ}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_{PS} \cdot n \cdot V_{G1}}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix}$$

$$\underline{Y}_M = \underline{C}_M \cdot \underline{X}_M$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} I_{L1m} \\ I_{L2m} \\ S_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_I & 0 & 0 \\ 0 & \mu_I & 0 \\ 0 & 0 & \mu_V \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ S \end{bmatrix}$$

La charge (R_{EQ}) et la source ($V_{G1,2}$) évoluent de manière aléatoire, il s'agit d'un système linéaire variant dans le temps (LTV).

Kps: commande phase shift

μ_i, μ_v : conditionneurs de signaux (LA55P, LV25P)

1 : RÉGULER LA TENSION SUR LE BUS CONTINU.

2 : COMMANDER LE COURANT DELIVRE PAR CHAQUE SOURCE PAR UNE RÉPARTITION DE LA CHARGE (« LOAD SHARING »).

3 : SÉLECTIONNER AUTOMATIQUEMENT LES SOURCES LES PLUS APPROPRIÉES POUR ALIMENTER LA CHARGE.

Trois niveaux de commande ont été conçus :

COMMANDE DE BAS NIVEAU → réguler la tension sur le bus continu et réguler le courant délivré par chaque source (quelles que soient les fluctuations des sources et de la charge).

COMMANDE DE NIVEAU INTERMEDIAIRE → déterminer le taux de puissance délivré par chaque source.

COMMANDE DE HAUT NIVEAU → sélectionner automatiquement et en temps réel (en fonction des conditions environnementales), les sources les plus appropriées pour alimenter la charge.

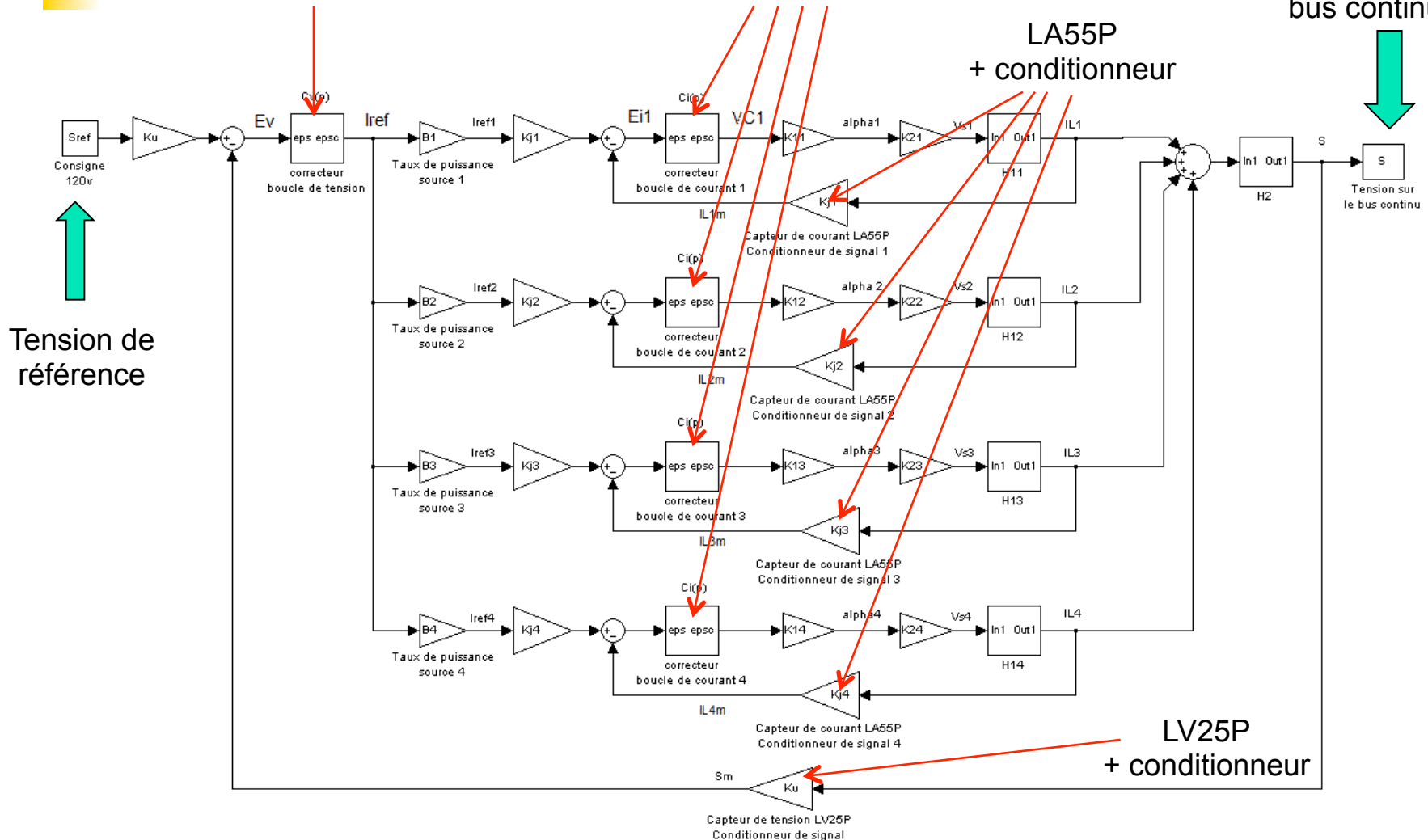
COMMANDE DE BAS NIVEAU

Correcteur PID généralisé
adaptatif

Correcteurs PID généralisés
adaptatifs

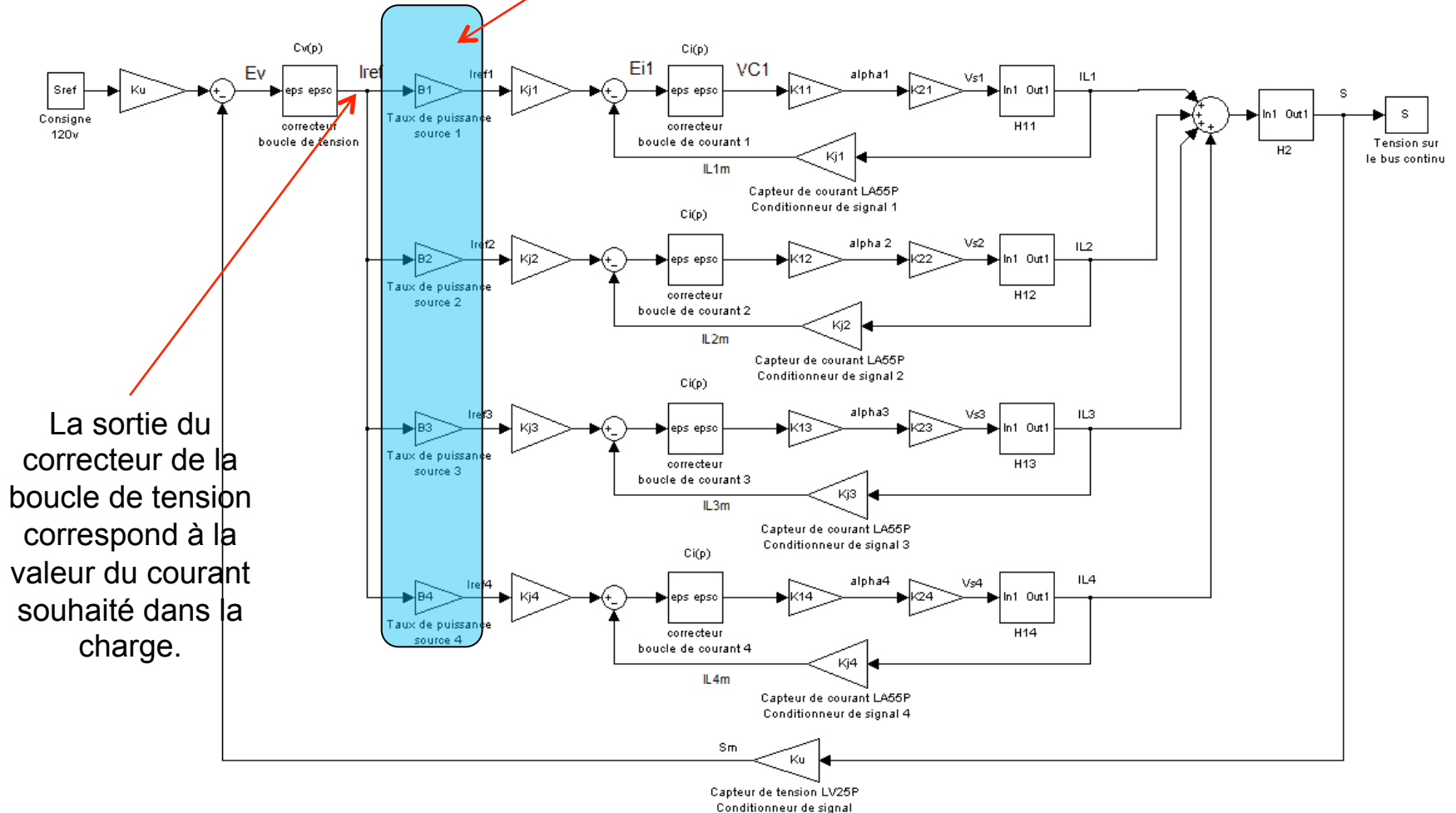
LA55P
+ conditionneur

Tension sur le
bus continu



COMMANDE DE BAS NIVEAU

En introduisant 4 gains adaptatifs (K_0, K_1, K_2, K_3), le courant délivré à la charge est partagé par les 4 sources. Il est indispensable que :
 $K_0 + K_1 + K_2 + K_3 = 1$

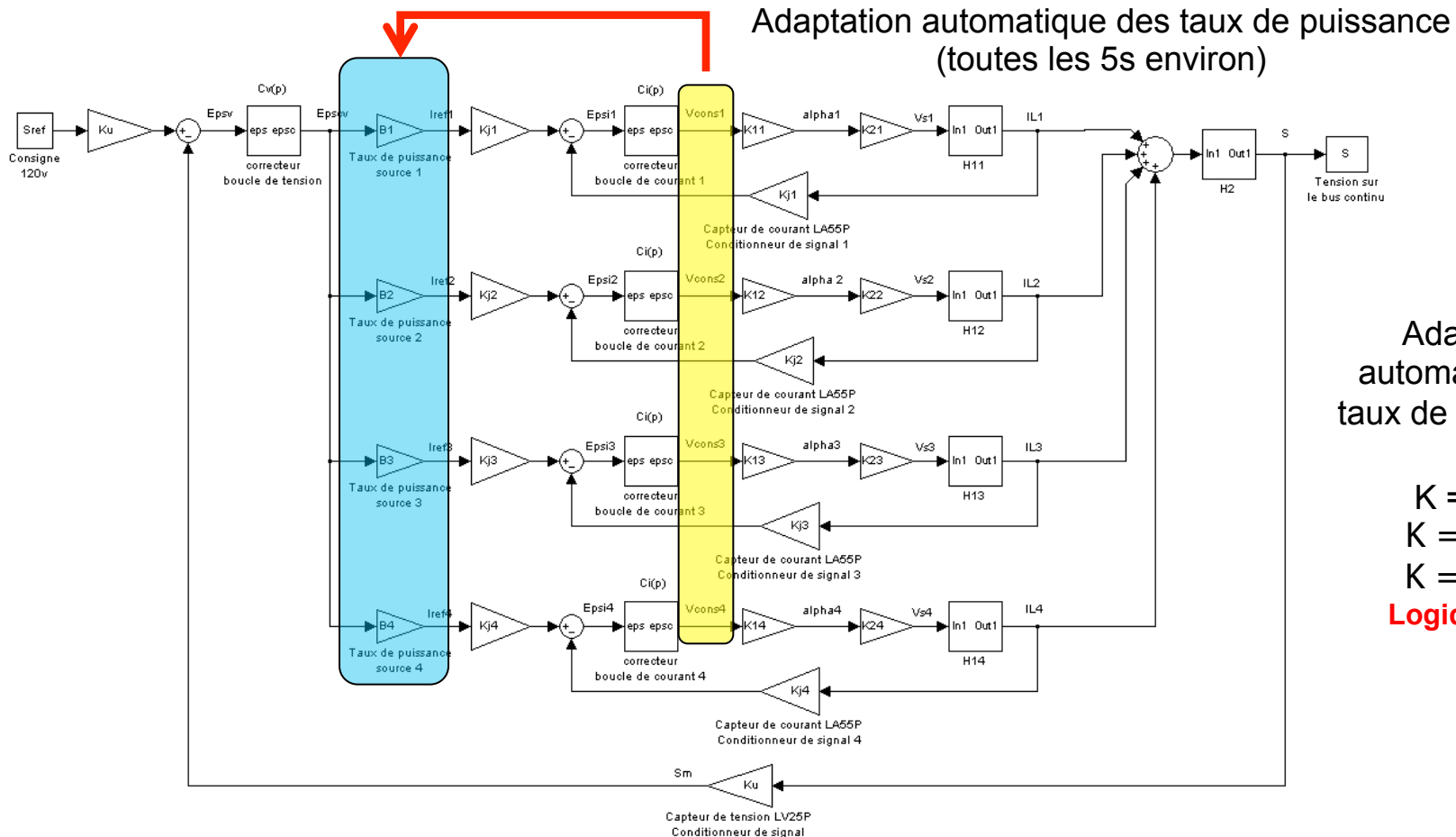


COMMANDE DE NIVEAU INTERMEDIAIRE

La consigne α donnée au convertisseur statique (image du rapport cyclique) est un excellent **indicateur de l'adéquation entre la source et la charge**.

Si la charge augmente ou si la source diminue $\rightarrow$ le rapport cyclique (consigne) augmente.

Si la charge diminue ou si la source augmente $\rightarrow$ le rapport cyclique (consigne) diminue.



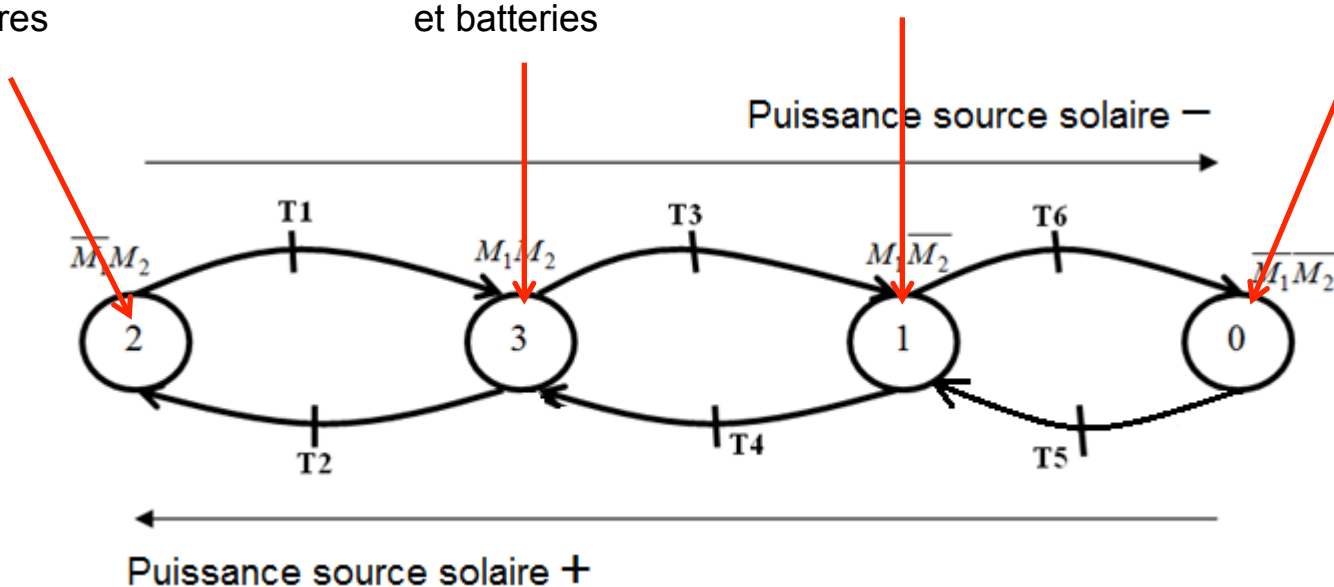
La consigne α donnée au convertisseur statique (excellent indicateur de l'adéquation entre la source et la charge) a également été choisie comme **critère de décision** (seuils) pour coupler ou non (avec un automate) une source sur le bus continu ce qui évite de recourir à des capteurs supplémentaires pour estimer la puissance des sources.

Mode 2
panneaux
solaires

Mode 3
panneaux solaires
et batteries

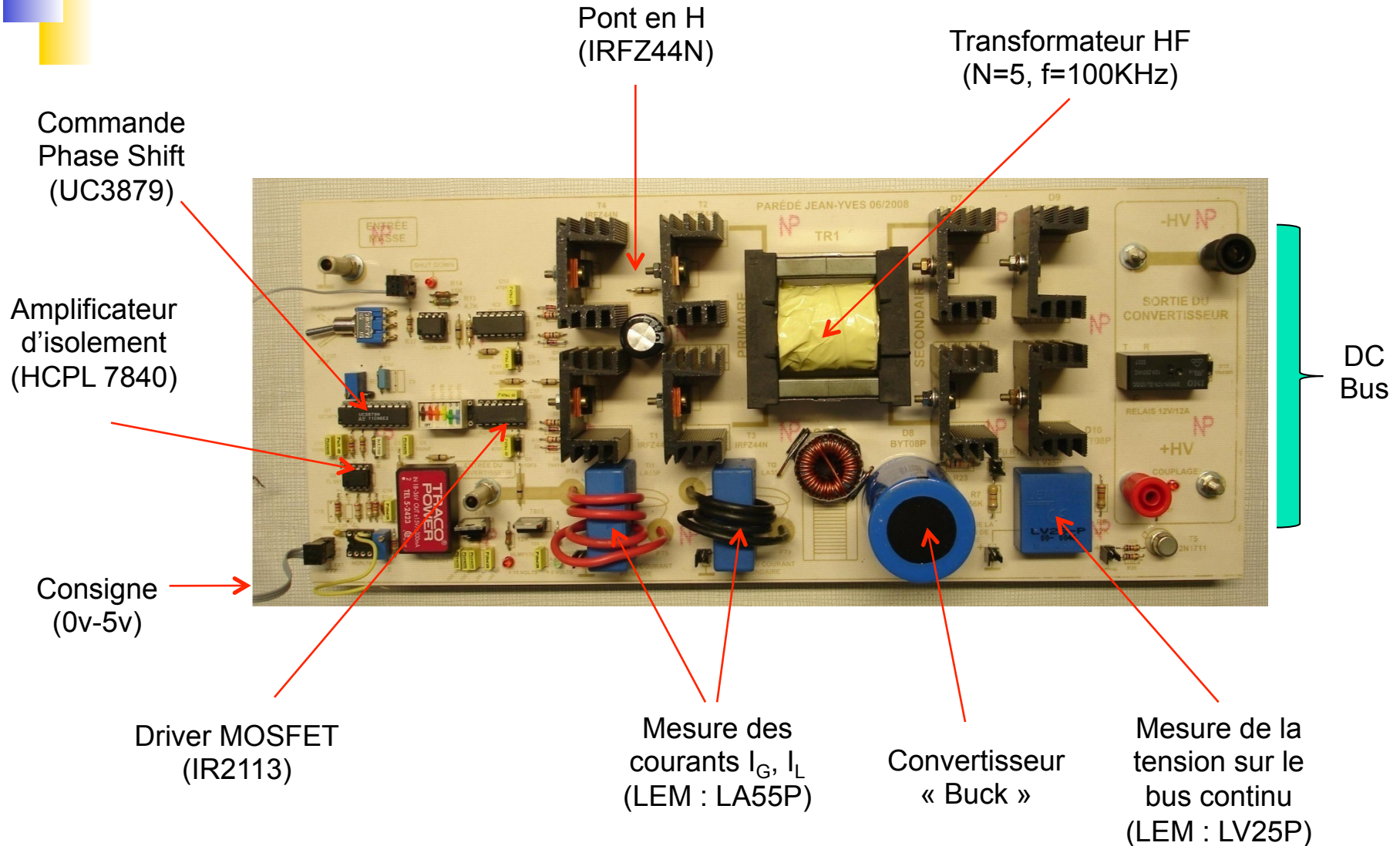
Mode 1
batteries

Mode 0
aucune source

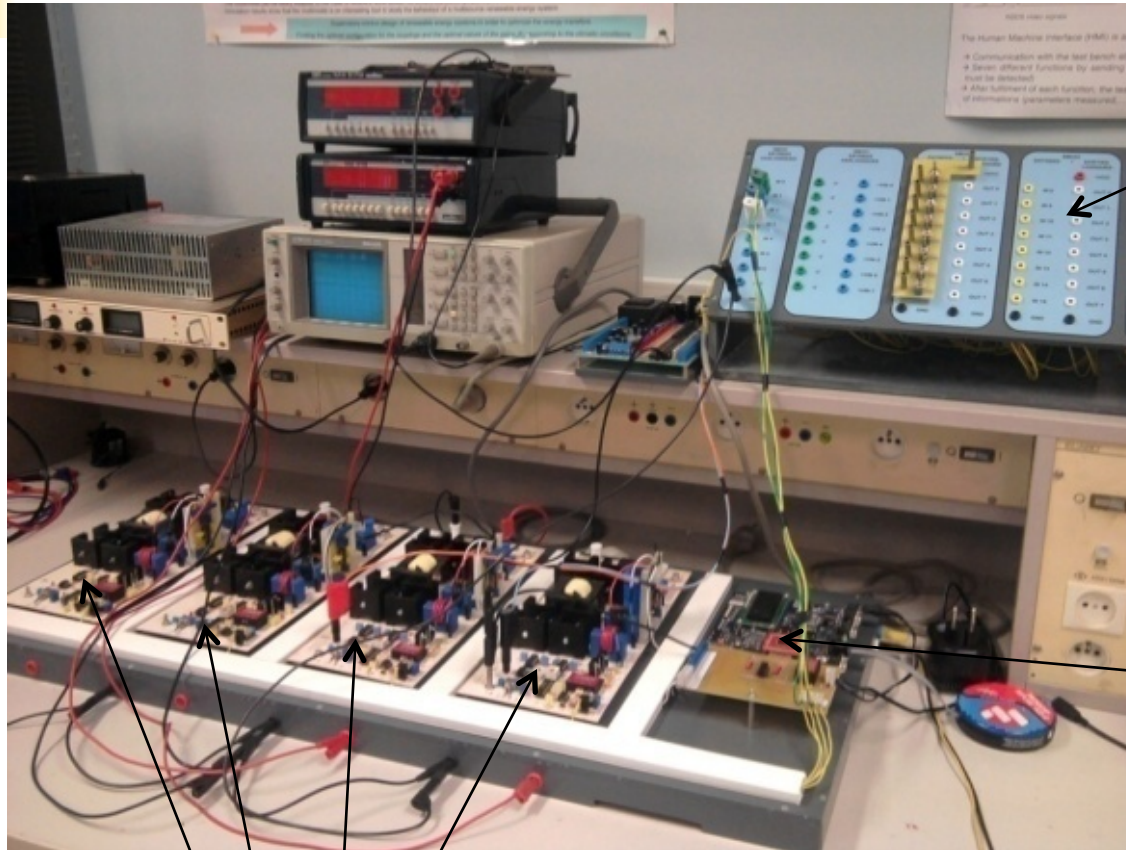


M1, M2 → "Shut Down" des convertisseurs statiques ZVS Full Bridge

BANC DE TEST



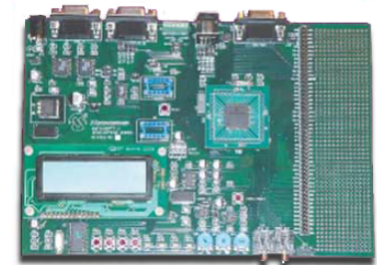
BANC DE TEST



Automate
Siemens S7-300



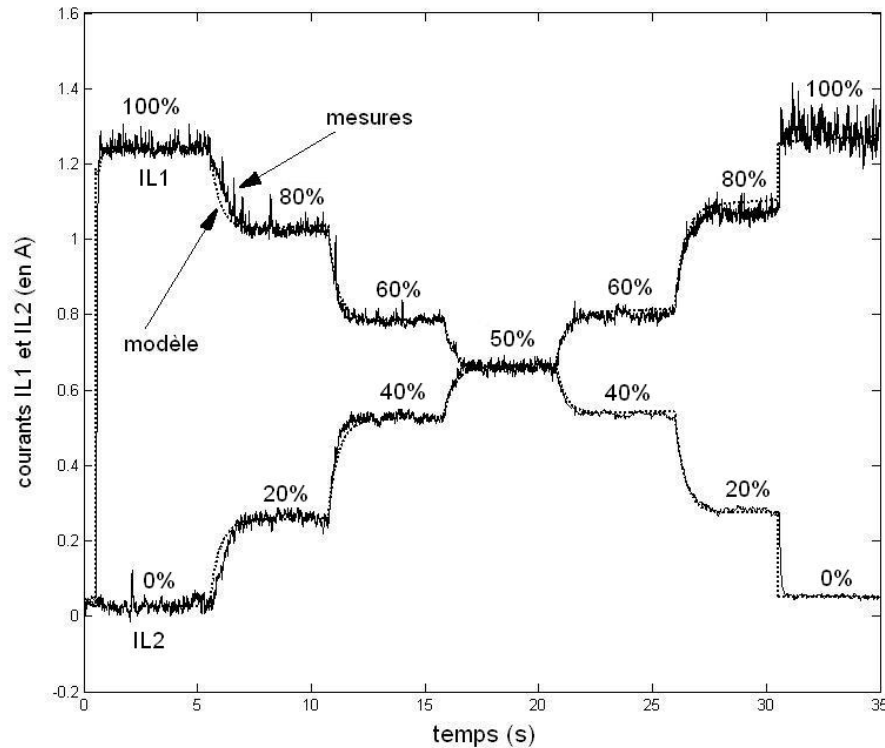
Microchip
dsPIC30F6010A



Convertisseurs statiques
ZVS Full Bridge

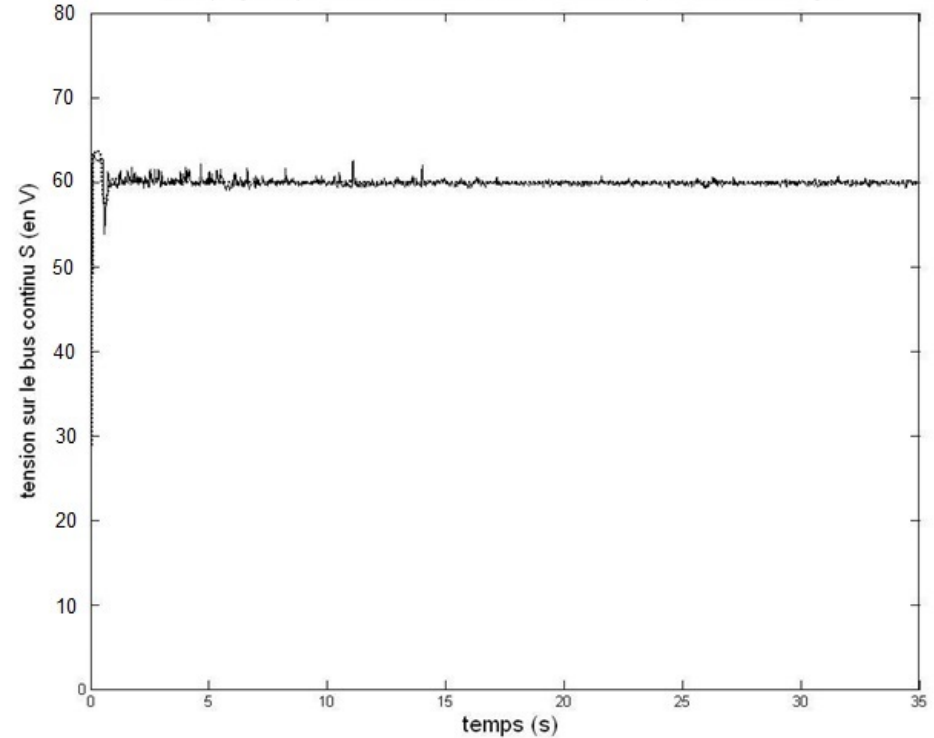
RESULTATS EXPERIMENTAUX (deux sources)

Couplage en parallèle de deux convertisseurs statiques ZVS Full Bridge



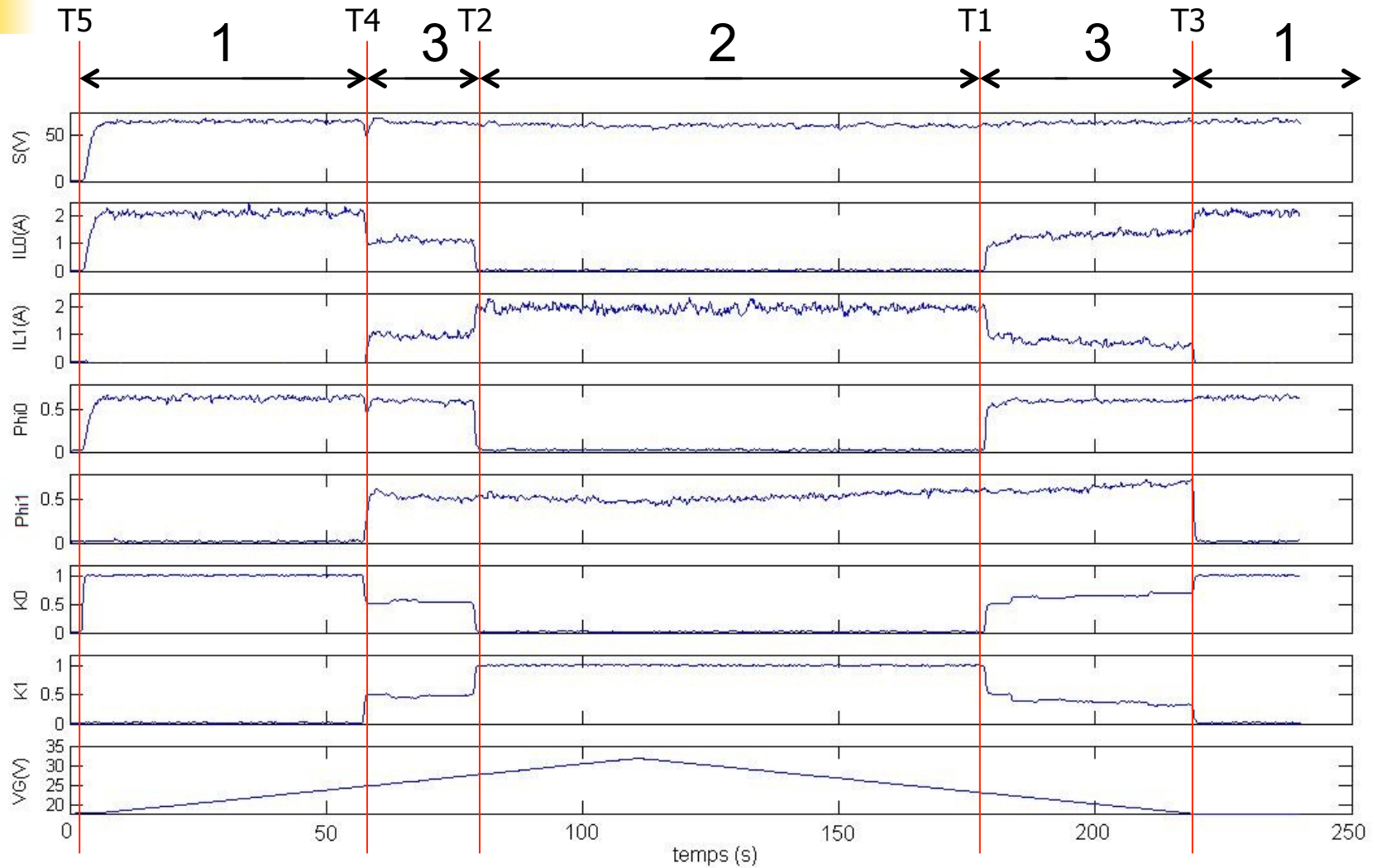
Courant délivré à la charge par chaque source (IL1, IL2)
Variation des taux de puissance K1, K2

Couplage en parallèle de deux convertisseurs statiques ZVS Full Bridge



Tension sur le bus continu (S)

RESULTATS EXPERIMENTAUX (deux sources)



A.B MBOUP, F.GUERIN, P.A NDIAYE, D.LEFEBVRE – “*Multimodel for the coupling of several dc/dc power converters on a dc bus*” - Proceedings of International Symposium on Industrial Electronics (IEEE-ISIE2008), Cambridge, England – 30 June, 02 July 2008.

A.B MBOUP, F.GUERIN, D.LEFEVRE, P.A NDIAYE – “*Control design for hybrid electrical energy systems based on dc/dc converters duty cycle value*” – Conférence et expositions internationales Véhicules Ecologiques et Energies Renouvelables (EVER09), Monaco – 26-29 March 2009.

A.B MBOUP, F.GUERIN, D.LEFEVRE, P.A NDIAYE – “*Petri nets control design for hybrid electrical energy systems*” - Proceedings of American Control Conference (ACC09), invited session on Petri nets : theory and applications - St. Louis, Missouri, USA, June 10-12, 2009.

A.B MBOUP, F.GUERIN, D.LEFEVRE, P.A NDIAYE – “*Three stages control strategy for hybrid electrical energy systems*” – IFAC Power Plants and Power Systems Control 2009 (IEEE-IFAC PP&PS) - Tampere, Finland, 5-8 July 2009.

A.B MBOUP, F.GUERIN, D.LEFEVRE, P.A NDIAYE – “*Control design for multisource systems based on DC/DC converters duty cycle value*” – International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL) – Vol 30, n°1, ISSN 0332-1649, 2011.

F.GUERIN, D.LEFEVRE, A.B MBOUP, JY.PAREDE, E.LEMAINS, P.A NDIAYE – “*Hybrid modeling for performance evaluation of multisource renewable energy systems*” – IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (TASE) – Vol 8, N°3, ITASC7, ISSN 1545-5955 – July 2011.

F.GUERIN, D.LEFEVRE, V.LOISEL - “*Supervisory control design for systems of multiple sources of energy*” - Control Engineering Practice 20 (2012) 1310–1324, 2012 Elsevier Ltd, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.07.006>

F.GUERIN, D.LEFEVRE - “Adaptive generalized PID controllers and fuzzy logic coordinator for load sharing in SMSE ” - Proceedings of IEEE CDC 2013, Florence, Italy, December 10-13, 2013.

F.GUERIN - SUJET D'AUTOMATIQUE DE L'AGREGATION DE GENIE ELECTRIQUE 2012.

- 1 : DETECTER LES DEFAUTS AFFECTANT LES CAPTEURS DE COURANT ET DE TENSION.
- 2 : DETECTER LES DEFAUTS AFFECTANT LE PONT EN H (PARTIE LA PLUS SENSIBLE).
- 3 : CONCEVOIR UN OUTIL DE SUPERVISION : WINCC FLEX (SIEMENS).

MODELE → CALCUL DE RESIDUS → ESPACE DE PARITE → Obtention de signatures binaires représentatives de chaque défaut.

Residuals	S ₁	S ₂	V _{g1}	V _{g2}	I _{g1}	I _{g2}	I _{L1}	I _{L2}	I _{M1}	I _{M2}	I _{r1}	I _{r2}
r ₁	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
r ₂	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
r ₃	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
r ₄	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
r ₅	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
r ₆	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
r ₇	1	0	0	0	0	0	1	1/0	0	0	0	0
r ₈	0	1	0	0	0	0	1/0	1	0	0	0	0
r ₉	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
r ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Signature	\$54	\$A8	\$10	\$20	\$01	\$02	\$D1 \$51	\$E2 \$A2	\$0101	\$0102	\$04	\$08
Detectability	3	3	1	1	1	1	3	3	2	2	1	1
Discernability	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2

Residuals for steady state and transients

$$r_1 = I_{G1} - \varphi_1 \cdot (n \cdot I_{L1} + I_{M1})$$

$$r_2 = I_{G2} - \varphi_2 \cdot (n \cdot I_{L2} + I_{M2})$$

$$r_3 = S_1 - Re \cdot Ir_1$$

$$r_4 = S_2 - Re \cdot Ir_2$$

Residuals for steady state

$$r_5 = S_1 - n \cdot \varphi_1 \cdot V_{G1} + 2 \cdot Vd + [r_L + r_S \cdot \varphi_1 + n^2 \cdot \varphi_1 \cdot (r_P + 2 \cdot r_{MOS})] \cdot I_{L1}$$

$$r_6 = S_2 - n \cdot \varphi_2 \cdot V_{G2} + 2 \cdot Vd + [r_L + r_S \cdot \varphi_2 + n^2 \cdot \varphi_2 \cdot (r_P + 2 \cdot r_{MOS})] \cdot I_{L2}$$

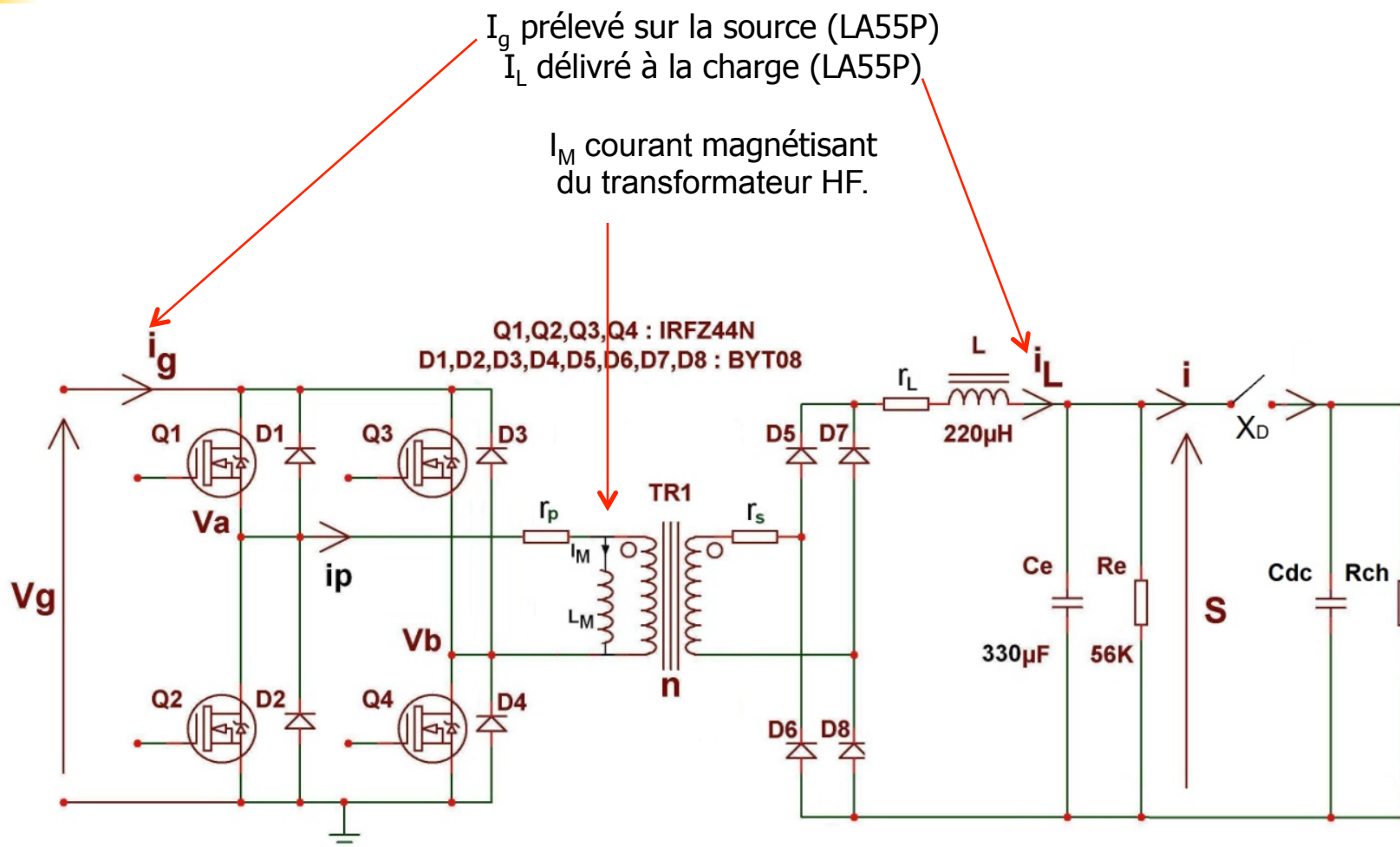
$$r_7 = S_1 - \overline{M_1} \cdot Re \cdot I_{L1} - M_1 \cdot \left[\overline{M_2} \cdot \frac{Re \cdot Rch}{Re + Rch} \cdot I_{L1} + M_2 \cdot \frac{Re \cdot Rch}{Re + 2 \cdot Rch} (I_{L1} + I_{L2}) \right]$$

$$r_8 = S_2 - \overline{M_2} \cdot Re \cdot I_{L2} - M_2 \cdot \left[\overline{M_1} \cdot \frac{Re \cdot Rch}{Re + Rch} \cdot I_{L2} + M_1 \cdot \frac{Re \cdot Rch}{Re + 2 \cdot Rch} (I_{L1} + I_{L2}) \right]$$

$$r_9 = I_{M1}$$

$$r_{10} = I_{M2}$$

Le calcul de certains résidus nécessite la mesure des courants :



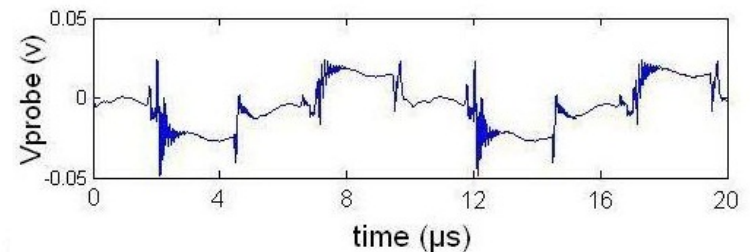
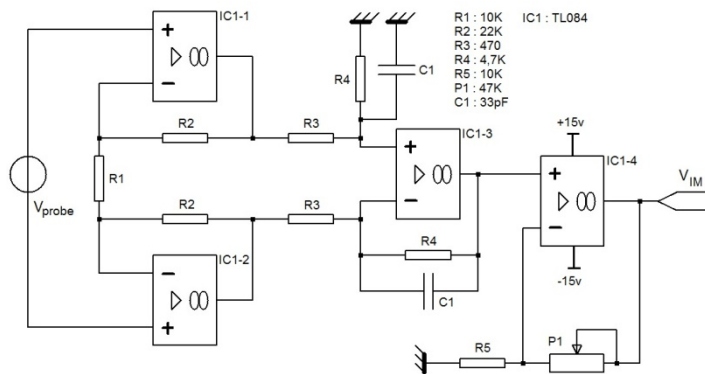
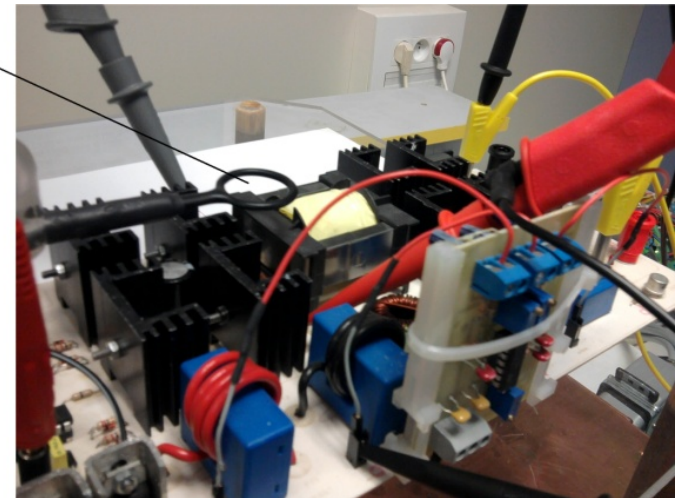
DIAGNOSTIC DU SYSTÈME MULTI-SOURCES

La mesure des composantes du champ magnétique proche est réalisée avec une sonde AFJ. Ces sondes mesurent (à fréquence fixe) le champ magnétique perpendiculaire à la boucle. **Le champ magnétique proche est l'image du courant magnétisant.** Les trois composantes du champ magnétique peuvent être obtenues en pivotant la sonde de 90° autour des axes X, Y et Z.

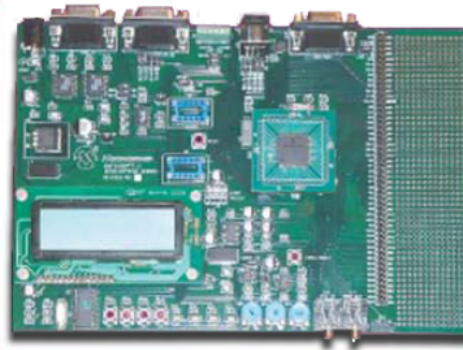
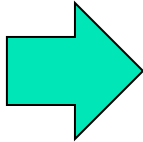


Sonde de mesure du champ magnétique proche (AFJ)

SONDE AFJ

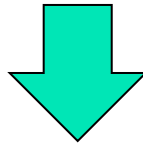


MESURES



Microchip dsPIC30F6010A

- Calcul des résidus
- Espace de parité



Signatures binaires



Supervision WinCC Flex (Siemens)

- Pages de supervision
- Alarmes horodatées
- Bases de données



Internet

F.GUERIN, D.LEFEVRE – "*Banc de résidus adaptatifs pour le diagnostic des systèmes de production d'énergie électrique multi-sources*" – Conférence Internationale Francophone d'Automatique (IEEE-CIFA2008), Bucarest, Roumanie –September 2008.

F.GUERIN, D.LEFEVRE – "*Residual analysis for the diagnosis of hybrid electrical energy systems*" – IFAC Safeprocess 2009, invited session on "Diagnosis and Environmental Issues" - Barcelona, Spain – 30 june, 3 July.

F.GUERIN, C.LABARRE, D.LEFEVRE – "*Magnetic near-field measurement for FDI of ZVS Full Bridge Isolated Buck Converter* »" – Proceedings of IEEE-SDEMPED 2011, Bologna, Italy –5-8 september 2011.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

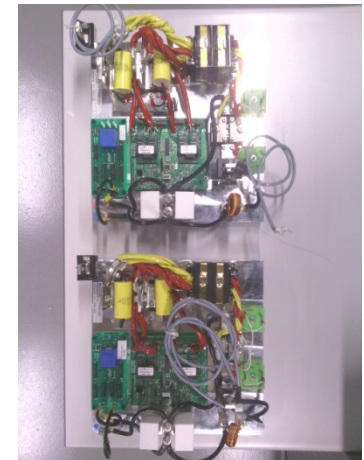
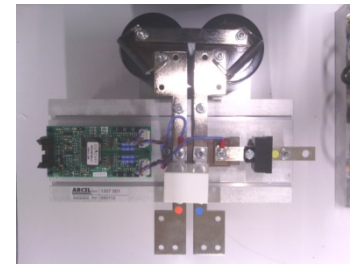
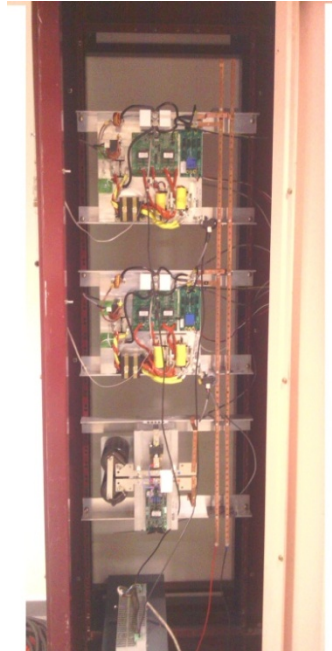
CONCLUSIONS

- 1 : Commande des transferts d'énergie pour les micro-centrales qui alimentent les sites isolés au Sénégal.
- 2 : Commande à trois niveaux hiérarchiques.
- 3 : Adaptation automatique des taux de puissance.
- 4 : Sélection des sources sur la base d'une mesure du rapport cyclique (consigne) avec un automate.
- 5 : Conception d'un système de détection automatique de défaillance (calcul de résidus, espace de parité).

PERSPECTIVES

- 1 : Etude approfondie de la commande de haut niveau (critères d'optimisation, prédictions).
- 2 : Acquisition de convertisseurs statiques industriels (ZVS Full Bridge, Buck-Boost).
- 3 : Concevoir un convertisseur statique ZVS Full Bridge avec possibilité d'introduire des défauts.
- 4 : Améliorer le système de détection automatique de défaillances.

COMMANDE ET SUPERVISION D'UN SYSTÈME DE
PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE MULTI-SOURCES
POUR L'ALIMENTATION DES SITES ISOLES



François Guérin, Dimitri Lefebvre

Université du Havre / GREAH

75 rue Bellot, CS80540, 76058 Le Havre Cedex (France)

{francois.guerin, dimitri.lefebvre}@univ-lehavre.fr