



HAL
open science

Modélisation, Commande et Simulation Temps-Réel Hybride des Systèmes de Génération Non Conventionnels

Dan Ocnasu

► **To cite this version:**

Dan Ocnasu. Modélisation, Commande et Simulation Temps-Réel Hybride des Systèmes de Génération Non Conventionnels. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2008. Français. NNT: . tel-00339664

HAL Id: tel-00339664

<https://theses.hal.science/tel-00339664>

Submitted on 18 Nov 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Ecole Doctorale : Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Spécialité : « *Génie Electrique* »

préparée au Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble

présentée et soutenue publiquement par :

Dan OCNASU

Ingénieur de l'Université Polytechnique de Bucarest

**Modélisation, Commande et Simulation Temps-Réel Hybride
des Systèmes de Génération Non Conventionnels**

Thèse dirigée par :

M. Seddik BACHA

M. Daniel ROYE

Soutenue le 2 Octobre 2008

Jury :

M. Gérard André CAPOLINO	, Président
M. Cristian NICHITA	, Rapporteur
M. Mohamed-Fouad BENKHORIS	, Rapporteur
M. Stéphane PLOIX	, Examineur
M. Seddik BACHA	, Directeur
M. Daniel ROYE	, Directeur

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab), au sein de l'équipe Systèmes et Réseaux Electriques (SYREL). A l'issue de ce travail je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à l'accomplissement de cette thèse.

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse : Seddik Bacha et Daniel Roye, pour leur encadrement, leur soutien et pour la confiance qu'ils ont eu dans moi et dans mon travail. Ils m'ont toujours traité comme un collègue, un ami, un des leurs enfants. Il a été un vrai plaisir de travailler et vivre avec eux.

J'adresse également mes sincères remerciements à M. Gérard André Capolino, professeur à l'Université de Picardie, à M. Cristian Nichita, professeur à l'Université du Havre, à M. Mohamed-Fouad Benkhoris, professeur à Polytech'Nantes et à M. Stéphane Ploix, maître de conférences à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury de soutenance.

Je tiens à remercier très chaleureusement à François Blache pour toutes les compétences techniques partagées, son rôle de « consultant linguistique », ainsi que pour sa grande amitié et pour le fait qu'il nous a inclus dans sa grande famille. Merci également à Joël Guiraud et à tous les autres ingénieurs et techniciens, pour toute leur aide dans la partie expérimentale de la thèse.

*Ensuite, un grand merci à tous mes collaborateurs lors des nombreuses applications réalisées et présentées dans ce manuscrit : à Christophe Gombert, pour m'avoir initié dans les « secrets » du temps-réel, à Nicolas Laverdure, Ana-Maria Andreica, Haizea Gaztañaga Arantzamendi, Erwan Le Pelleter, Denis Arnault et Bertrand Raison. Tous les échanges eus avec eux ont été très enrichissants et plaisants. Toute ma reconnaissance à mes partenaires sur le projet MULTISOL, spécialement à *Ghaith Warkotzek, Pham Thi Thu, Frederic Wurtz et**

Long. Egalement, mes remerciements pour tous les membres de l'équipe et du laboratoire qui ont contribué à cette atmosphère propice pour travailler en se sentant bien.

Avant de terminer je voudrais remercier, sincèrement et très chaleureusement, mes amis et ma famille, peu importe la distance et sans éliminer ceux qu'ont été déjà mentionnés. Merci donc à Diana et Octavian Craciun, à Adi Florescu, Cristi Jecu, Benjamin Vallet, pour toutes les moments inoubliables passés ensemble ces années. Un grand merci également à mes parents, pour leur encouragements et soutien.

Je ne peux pas trouver les mots pour remercier mon épouse Bianca, pour tout son support, sa patience et... son amour.

Un grand merci à vous tous. C'est grâce à vous que je suis là !

TABLE DE MATIERES

CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE	9
CHAPITRE 2. SIMULATION TEMPS-REEL.....	13
2.1. Introduction aux systèmes de simulation	13
2.1.1. Simulateurs hors temps-réel numériques	15
2.1.2. Simulateurs temps-réel analogiques	16
2.1.3. Simulateurs temps-réel numériques	17
2.1.3.1. ARENE URT.....	18
2.1.3.2. RT-LAB	20
2.1.4. Simulateurs temps-réel hybrides	23
2.2. Principes mathématiques et aspects pratiques de la simulation temps-réel	24
2.2.1. Pas de temps et contrainte temps-réel	24
2.2.2. Simulation aux taux d'échantillonnage différentes	27
2.2.3. Retards.....	30
2.2.4. Interface de puissance	32
2.2.5. Types de connexions	32
2.2.6. Notions d'acquisition des données	34
2.3. Synthèse sur Chapitre 2	39
CHAPITRE 3. APPLICATIONS AUX COMPOSANTS SYSTEMES DE GENERATION NON CONVENTIONNELS ET A LA GESTION DES FLUX ENERGETIQUES DANS LES RESEAUX	41
3.1. Introduction	41
3.2. Composants matériels au G2Elab	42
3.2.1. Interface de puissance	42
3.2.1.1. Amplificateur de puissance	42
3.2.1.2. Capteurs courant/tension	43
3.2.2. Banc « universel » pour la distribution électrique.....	45
3.3. Application aux systèmes de génération éolienne.....	47
3.3.1. Contexte de l'éolien	47
3.3.2. Principaux types de génératrices éoliennes étudiés.....	48
3.3.3. Etude d'une structure de type MASDA (Machine ASynchrone à Double Alimentation)	50
3.3.3.1. Description de la plateforme expérimentale.....	50
3.3.3.2. Résultats expérimentaux	54

3.3.4.	Etude d'une structure de type MS (Machine Synchrone)	58
3.3.4.1.	Description de la plateforme expérimentale.....	58
3.3.4.2.	Résultats expérimentaux	58
3.3.5.	Aide à la reprise au vol des systèmes à base de MAS (Machine ASynchrone) par un système de soutien shunt (STATCOM)	62
3.3.5.1.	Description de la plateforme expérimentale.....	64
3.3.5.2.	Résultats expérimentaux	67
3.3.6.	Aide à la reprise au vol des systèmes à base de MAS (Machine ASynchrone) par un système de soutien série (DVR)	68
3.3.6.1.	Description de la plateforme expérimentale.....	69
3.3.6.2.	Résultats expérimentaux	72
3.4.	Test d'onduleurs industriels pour l'interfaçage de générateurs photovoltaïques	73
3.4.1.	Description de la plateforme expérimentale.....	75
3.4.2.	Résultats expérimentaux	77
3.5.	Contrôle de flux de puissance par compensation série (DSSSC).....	79
3.5.1.	Description de la plateforme expérimentale.....	81
3.5.2.	Résultats expérimentaux	83
3.6.	Synthèse sur Chapitre 3	85
CHAPITRE 4. APPLICATIONS A DES SYSTEMES PLUS COMPLEXES.....		87
4.1.	Introduction à l'habitat	87
4.2.	MULTISOL.....	90
4.2.1.	Raisons du choix	90
4.2.2.	Besoins	91
4.2.3.	Classification et identification des équipements	94
4.2.4.	Architecture matérielle	98
4.2.4.1.	Module de production électrique.....	99
4.2.4.2.	Module de distribution électrique	101
4.2.4.3.	Mesures	104
4.2.5.	Architecture logicielle	105
4.2.6.	Modélisation.....	109
4.2.6.1.	Modélisation des sources	109
4.2.6.1.1.	Système photovoltaïque.....	109
4.2.6.1.2.	Réseau	118
4.2.6.2.	Modélisation des charges	119
4.2.6.2.1.	Eclairage	120
4.2.6.2.2.	Table de cuisson et four électrique	121

4.2.6.2.3. Four à micro-ondes	123
4.2.6.2.4. Bouilloire, Grille-pain, Cafetière	124
4.2.6.2.5. Téléviseur et Ordinateur	124
4.2.6.2.6. Lave-linge	125
4.2.6.2.7. Sèche-linge.....	127
4.2.6.2.8. Lave-vaisselle	127
4.2.6.2.9. Chauffage.....	128
4.2.6.2.10. Chauffe-eau.....	132
4.2.6.2.11. Réfrigérateur et Congélateur.....	133
4.2.6.3. Validation et adaptation des modèles.....	135
4.2.7. Méthodologie de contrôle/commande.....	135
4.2.7.1. Mécanisme anticipatif.....	136
4.2.7.2. Mécanisme réactif.....	136
4.2.8. Validation du système sur démonstrateur temps-réel hybride.....	137
4.2.8.1. Phases de développement du démonstrateur temps-réel hybride.....	138
4.2.8.2. Cas d'étude.....	140
4.2.8.3. Réalisation de la liaison de communication.....	141
4.2.8.4. Scénarios de validation.....	143
4.3. Concept des microréseaux résidentiels ilotables.....	144
4.3.1. Description de la plateforme expérimentale.....	145
4.3.2. Résultats expérimentaux	148
4.4. Synthèse sur Chapitre 4.....	150
CHAPITRE 5. CONCLUSIONS GENERALES.....	151
PUBLICATIONS	155
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	157
ANNEXE A. Valorisation des compétences des docteurs : «un nouveau chapitre de la thèse ®» [ABG 08].....	163
ANNEXE B. Détails sur l'amplificateur de puissance	175
ANNEXE C. Structure de commande de l'interfaçage d'un système éolien à base de MASDA	177
ANNEXE D. Influence des grandeurs d'entrée et des paramètres du modèle PV sur les caractéristiques de courant (V-I) et de puissance (V-P).....	179
ANNEXE E. Ensemble des charges électriques du cas d'étude choisit pour la validation du système MULTISOL.....	181

CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE

Avant de rentrer dans le cœur de mon sujet, je vous propose un rappel sur ce qu'il s'est passé le 28 septembre 2003 en Italie. Il s'agit d'une panne généralisée d'électricité, ou « black-out », mais peu importe l'appellation, le bilan est le même : *56 millions d'habitants dans le noir*. A l'origine de cet événement reste l'incompatibilité persistante entre la raison commerciale et les lois physiques. Ainsi, la nuit, l'Italie préférait arrêter une partie de ses propres centrales pour importer du courant électrique meilleur marché. Aucun souci jusqu'à ce qu'une des grandes lignes électriques qui assurait l'alimentation de l'Italie par la Suisse ait « claqué ». Encore un événement sans importance évidente, mais qui, ajouté à d'autres petites erreurs, a mené par un effet de domino au collapse du système électrique italien

Au lendemain du black-out, de nombreuses entités, comme l'UCTE (Union de Coordination du Transport Electrique) ou des ONG environnementales, ont commencé à plaider pour de plus petites capacités de production décentralisées et régionales pour réduire les distances de transit. Nous nous approchons ainsi du contexte de mon travail

Il y a quelques années (*Figure 1.1(a)*), il y avait que des grands producteurs (centrales nucléaires, centrales au charbon ou au gaz, etc.) qui étaient connectés à la très haute tension, au niveau du réseau de transport. De l'autre côté, juste quelques grands consommateurs industriels étaient connectés au même réseau, quant à la majorité, elle était raccordée à des tensions plus basses, sur les réseaux de distribution.

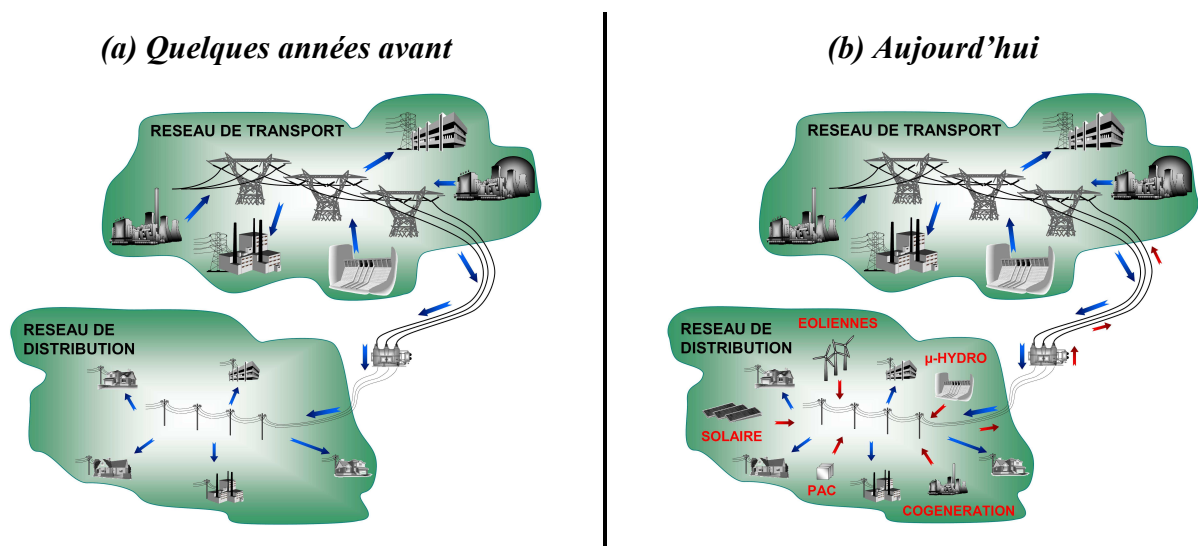


Fig. 1.1 : Contexte général du travail

Aujourd'hui (*Figure 1.1(b)*), avec l'ouverture des marchés d'énergie électrique, en raison des problèmes environnementaux et suite à la diminution des ressources disponibles,

de nombreux petits productions d'origine renouvelable (éoliennes, photovoltaïque, petites centrales hydrauliques, pile à combustible, etc.) viennent se connecter au niveau du réseau de distribution. L'avantage principal de ces énergies est le fait qu'elles soient propres, c'est-à-dire, qu'elles sont supposées avoir un faible impact environnemental. Leur principale limitation est leur caractère intermittent car la puissance de sortie dépend en tout instant de la disponibilité de la source primaire. Ainsi, cette forte pénétration peut avoir de lourdes conséquences sur le fonctionnement d'ensemble du système électrique, diverses interactions étant présentes entre les différents acteurs :

- 🔄 impact des producteurs sur le réseau : principalement dû au caractère intermittent de certaines sources primaires, comme le vent ou le soleil ;
- 🔄 impact du réseau sur les producteurs : certains producteurs sont sensibles aux perturbations qui peuvent apparaître dans les points de raccordement ;
- 🔄 interaction entre les différents producteurs.

C'est pour cette raison que nous avons besoin de développer des outils de simulation et d'étude, bien adaptés à la complexité et à la dynamique de ces domaines !

C'est dans ce contexte que mon travail se situe, son but principal étant le développement et la mise en oeuvre d'une ***nouvelle plateforme de recherche, d'enseignement et de démonstration***, basée sur un simulateur temps-réel hybride. En d'autres termes, l'idée est d'allier des outils de simulation numériques (sur ordinateur) avec des éléments analogiques, réels, afin d'arriver à étudier le comportement de certains dispositifs, dans des conditions réelles de fonctionnement. Cette plateforme est au cœur des activités de l'équipe SYREL (SYstèmes et Réseaux ELectriques) et constitue un support essentiel pour les activités de recherche qui sont menés.

Toujours sur la thématique des énergies renouvelables, en parallèle avec la mise en place de cette plateforme, un projet industriel a constitué aussi le sujet de ma thèse - *MULTISOL*. Plus précisément, il s'agit d'un projet de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) portant sur la gestion optimale de l'énergie dans un habitat photovoltaïque. Le but de ce projet est de réaliser un outil qui, à partir de prévisions (conditions météorologiques, prix de l'énergie, comportement de l'utilisateur), gère de manière optimale la totalité des charges et des sources disponibles, sans affecter le confort de l'utilisateur.

Dans la première partie de ce manuscrit (*CHAPITRE 2*), nous passerons en revue les principaux types des simulateurs disponibles pour les études réseau, afin de justifier notre choix d'un simulateur temps-réel hybride. Ensuite seront présentés les aspects essentiels (théoriques et pratiques) à prendre en compte lors de la conception, la mise en place et l'utilisation d'un tel outil. Dans le même chapitre nous ferons une première présentation

succincte des deux simulateurs temps-réel numériques qui constituent la base du simulateur hybride du G2Elab : ARENE URT et RT-LAB.

Le 0 commencera par une présentation des principales briques constitutives de la plateforme temps-réel hybride conçue au G2Elab. Ensuite nous passerons à l'utilisation de cet outil et à la validation de ses capacités via plusieurs applications temps-réel hybrides. Ces applications porteront sur le domaine des systèmes de génération non-conventionnels (éoliennes et photovoltaïques) et celui de la gestion des flux énergétiques dans les réseaux électriques de distribution. En sus des dispositifs destinés à la gestion des flux énergétiques, le thème de l'électronique de puissance sera abordé. Celle-ci assure l'interfaçage des systèmes de génération ou sera également utilisée comme systèmes de soutien pour la reprise au vol des éoliennes à base de génératrices à vitesse fixe. Pour ce dernier cas, des solutions shunt et série seront proposées et étudiées.

Le 0 fera le passage vers des systèmes encore plus complexes par l'intermédiaire des deux applications portant sur l'habitat ou sur un ensemble d'habitats. La première application consistera en présenter les travaux menés jusqu'au présent dans le cadre du projet industriel MULTISOL, mentionné plus haut. Ainsi seront présentés des aspects liés à :

- la modélisation des sources et des charges électriques ;
- la conception des architectures matérielles et logicielles capables à assurer toutes les fonctionnalités envisagées par les algorithmes de gestion optimale ;
- la mise en place d'un outil de validation basé sur le simulateur temps-réel.

La deuxième application reposera sur le cas d'un microréseau résidentiel îlotable, concept introduit afin de faciliter l'insertion des systèmes de génération non-conventionnels caractérisés par des sources primaires intermittentes (vent, soleil, eau, etc.).

Nous mentionnons aussi la présence dans la première annexe de ce mémoire d'un bilan non technique de cette thèse, en l'analysant toute mon activité au sein du G2Elab comme un projet de recherche. Des aspects de gestion de projet seront ici présentés comme : l'étude du déroulement du travail, la gestion des ressources matérielles et humaines, le coût et la répartition de la charge financière entre les différents contributeurs, etc.

Si cette introduction est arrivé à capter votre attention, je vous invite à rentrer dans le sujet de ma thèse et à commencer, comme mentionné ci-dessus, avec une synthèse sur les simulateurs destinés aux études des systèmes et réseaux électriques.

CHAPITRE 2. SIMULATION TEMPS-REEL

2.1. INTRODUCTION AUX SYSTEMES DE SIMULATION

Un réseau électrique en fonctionnement peut subir une grande variété de perturbations ou d'incidents, que sont:

- les variations de la charge au cours de la journée
- les manoeuvres
- les déclenchements d'unités de productions ou de grandes charges
- les impacts de foudre sur les lignes
- les courts-circuits

Ces perturbations provoquent des phénomènes physiques très variés au sein du réseau, tels que :

- la propagation d'ondes de surtension
- la circulation de courants de court-circuit
- les oscillations d'angle interne des alternateurs et la perte du synchronisme
- les creux de tension
- les fluctuations de fréquence
- les déséquilibres
- les harmoniques de tension et/ou courant

Afin de bien déterminer l'impact de ces phénomènes sur les équipements électriques, des outils de simulation ont été développés. Toutefois, il est pratiquement impossible de réaliser un simulateur unique pour l'étude de tous ces phénomènes, car ils mettent en jeu des constantes de temps très différentes allant de la microseconde à l'heure.

Dans le *Tableau 2.1* sont indiquées les constantes de temps des phénomènes physiques ainsi que les applications correspondantes [MEY 98], [BAR 97].

Les systèmes de simulation peuvent être subdivisés en deux grandes classes en fonction de leur échelle de temps : « hors temps-réel » et « temps-réel » (*Figure 2.1*). Afin d'appréhender la différence entre les deux, on pourra prendre comme exemple l'étude du comportement d'un réseau électrique sur une durée de 2 heures. Cette étude sera réalisée en quelques minutes sur le simulateur hors temps-réel, tandis qu'en temps-réel cela se déroulera sur exactement 2 heures, en suivant à chaque instant le comportement du système réel.

Phénomènes Physiques	Foudre											
	Surtension de manœuvre											
	Courts-circuits											
	Ferrerésonance											
	Oscillations rotoriques											
	Tenue de la tension											
	Tenue de la fréquence											
	fréquence	1 MHz	100 kHz	10 kHz	1 kHz	100 Hz	10 Hz	1 Hz	10 ⁻¹ Hz	10 ⁻² Hz	10 ⁻³ Hz	10 ⁻⁴ Hz
période [s]	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
Applications	PROTECTION											
							CONDUITE					
							REGLAGE					
	TEST D'EQUIPEMENTS											

Tableau 2.1: Constantes de temps des différents phénomènes et applications correspondantes

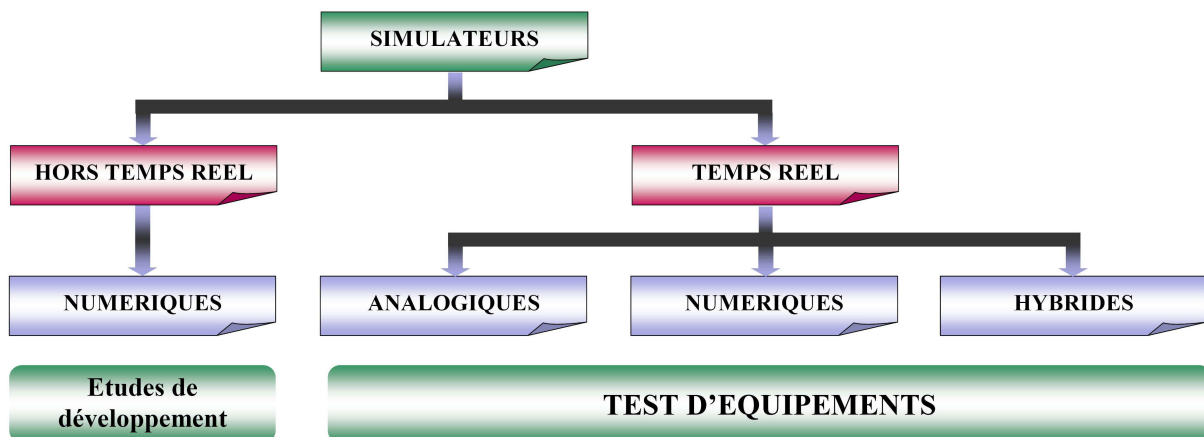


Figure 2.1. Classification des simulateurs

Les applications de type « test d'équipements de réseaux » peuvent être effectués en utilisant des simulateurs temps-réel, qu'ils soient analogiques [DOI 90], numériques [YUN 04], [GOM 06] ou hybrides (c'est-à-dire associant analogique et numérique) [STE 04], [OCN 07]. La plage fréquentielle qui doit être assurée pour l'étude de ces systèmes est comprise entre 10⁻¹Hz et 1MHz. Ainsi, ces simulateurs nécessitent des puissances de calcul élevées et des méthodes adaptées aux fréquences des phénomènes à étudier.

Dans les paragraphes suivants sont présentés les divers types de simulateurs. Une mise en évidence de leurs principaux avantages et inconvénients est effectuée afin de justifier le choix du simulateur hybride temps-réel.

2.1.1. Simulateurs hors temps-réel numériques

➔ Les avantages généraux des simulateurs numériques sont :

- la souplesse : pour un simulateur analogique, le circuit physique devra être adapté tandis que pour un simulateur numérique, de simples modifications de paramètres dans le programme informatique suffiront
- la réduction des dangers de manipulations
- une bonne représentation des phénomènes haute fréquence
- une plus grande facilité dans l'introduction de nouveaux modèles

Les simulateurs numériques hors temps-réel servent en général à des études de conception d'équipements, aux réglages de systèmes tels que les boucles d'asservissement et à l'analyse de phénomènes transitoires tels que ceux causés par les courts-circuits ou les enclenchements de charge. L'objectif de ce type de simulation est d'obtenir le résultat le plus précis possible en un minimum de temps. Il est alors possible d'utiliser un pas de temps variable qui s'adapte à la dynamique des grandeurs simulées (*Figure 2.2*).

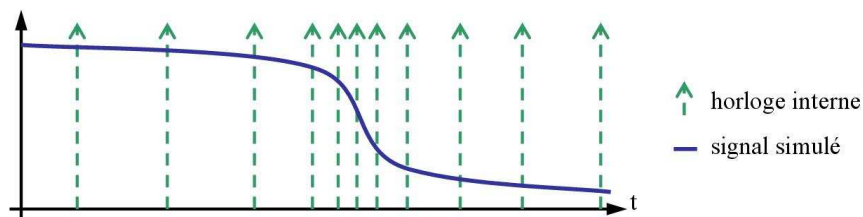


Figure 2.2. Principe d'adaptation du pas variable

L'utilisation du pas de temps variable présente de nombreux avantages, comme par exemple, la bonne détection des commutations des éléments d'électronique de puissance, ou alors, les discontinuités causées par les éléments non-linéaires d'un réseau. Cependant, afin de synchroniser les signaux échangés avec l'équipement testé, un pas de temps fixe est requis par le simulateur temps-réel. Cela peut être problématique pour la simulation de certains dispositifs comme les systèmes à MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion) [GOM 05a].

On peut citer quelques exemples de simulateurs hors temps-réel pour les études de réseau : **EMTP** (ElectroMagnetic Transient Program) développé par la Bonneville Power Administration (Etats-Unis), **EMTDC** et **PSCAD** développés par Manitoba HVDC (Canada), ou **ARENE PCNRT** et **EUROSTAG** développés par Electricité de France et Tractebel Energy Engineering (Belgique). Pour les études de systèmes à base d'électronique de puissance : **SPICE**, **SABER** et multi-physiques : **MATLAB / SIMULINK**.

2.1.2. Simulateurs temps-réel analogiques

Les premiers simulateurs analogiques utilisés dans le génie électrique comportaient des modèles réduits de réseaux (des générateurs, des transformateurs, des lignes, des câbles, des convertisseurs, des charges, etc.), connectés suivant le schéma du réseau réel. Ils permettaient de mieux prévoir ou de connaître le comportement du système en régime dynamique et de tester des équipements comme par exemple : des régulations, des protections ou des systèmes à base d'électronique de puissance ayant des fréquences de commutations élevées [GOM 03].

➤ Les avantages des simulateurs analogiques sont :

- un fonctionnement naturel en temps-réel, puisque basés sur des composants physiques
- la reproduction physique de la réalité (en valeurs réduites et/ou à facteur d'échelle respecté)
- des grandeurs physiques d'un réseau électrique (les courants et les tensions) réelles (en valeurs réduites et/ou à facteur d'échelle respecté)

➤ Ils présentent les inconvénients suivants :

- la limitation dans la taille des réseaux représentés
- le manque de souplesse quant aux changements de topologie, bien que des systèmes de connexion automatique aient été réalisés
- l'encombrement important lié à la taille des réseaux modélisés
- les coûts élevés d'exploitation et de maintenance
- la nécessité de réaliser du matériel spécifique (mise à l'échelle)

Ces divers inconvénients font que ces outils sont de plus en plus remplacés par des simulateurs numériques temps-réel. Toutefois plusieurs simulateurs analogiques sont encore utilisés pour des applications spécifiques où les simulateurs numériques montrent leurs limites (fréquences de découpage élevées, systèmes trop complexes à modéliser, etc.) :

1. Des études sur des équipements de type FACTS (Flexible AC Transmission Systems) ont été effectuées sur un simulateur analogique à Stockholm en 2002. [MAG 00]

➤ En 2002, Chubu Electric Power Company (CEPCO) a exécuté, en collaboration avec Fujian Electric Power Company, une analyse de système sur un simulateur analogique conçu en 1993. Le réseau des îles Fuji a été simulé avec 29 générateurs, 73 lignes de transport, 33 transformateurs et 34 charges. Les modèles fonctionnent à la tension nominale de 50V et avec

un courant nominal de l'ordre de 0,25A. Ont été étudiées la stabilité transitoire du système, la stabilité de fréquence et les surcharges en cas de contingence. [CAO 02]

➤ En 2002, un modèle de PSS (Power System Stabiliser) adaptatif a été testé sur un simulateur analogique comportant 2 génératrices, un nœud d'équilibre, 4 lignes de transport et une charge. [MOT 02]

➤ En 2004, une plateforme d'essais à échelle réelle a été conçue en Danemark pour le test d'un système de contrôle pour une turbine éolienne de 11kW. [TEO 04]

2.1.3. Simulateurs temps-réel numériques

Contrairement aux simulateurs hors temps-réel, le temps que dure une simulation est rigoureusement le « temps-réel » physique. Pour synchroniser les données échangées avec l'équipement testé, le pas de temps de simulation de ces simulateurs est fixe et ne peut pas évoluer dans le temps (*Figure 2.3*).

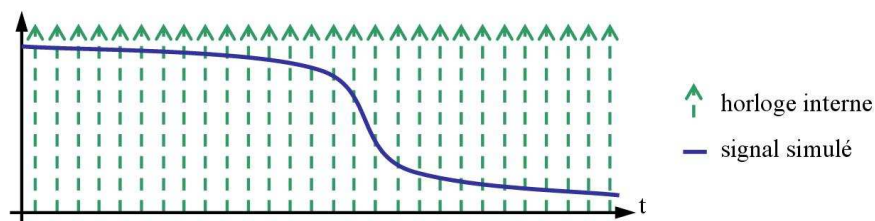


Figure 2.3. Principe du pas constant

Un simulateur temps-réel dédié à la simulation de réseaux électriques peut être amené à tester des équipements tels que :

- les systèmes de protection de défauts [JUN 00], [NIM 00], [HUE 01] et [KRE 04];
- les systèmes électriques de puissance : dans ce cas, il faut amplifier les signaux en sortie du simulateur pour tester les équipements de puissance (simulateur hybride) [OCN 04], [STE 04];
- les systèmes de contrôle de dispositifs à base d'électronique de puissance : FACTS et les contrôleurs de systèmes d'interfaçage de producteurs d'énergie (systèmes éoliens, photovoltaïque...) [GOM 05a], [YUN 04] : dans ce cas, les signaux en entrée du simulateur sont les ordres de commandes des interrupteurs d'électronique de puissance en tout ou rien (0,1) ;

➤ les systèmes de régulation : par exemple, les systèmes permettant de contrôler la tension en un point du réseau par l'injection d'énergie réactive (excitation des alternateurs...), les systèmes permettant de réguler la fréquence par action sur la puissance active injectée au réseau (producteurs d'énergie, vitesse des alternateurs...) [CHA 04].

Parmi les simulateurs numériques temps-réel utilisés dans le monde, on peut citer les suivants, illustrés par quelques références donnant des exemples d'applications :

- **RT-LAB** (Opal-RT Technologies, Canada) [PAP 00], [DUF 02], [PAQ 07]
- **ARENE URT** (EDF R&D, France) [NIM 00], [HUE 01], [GOM 06], [OCN 07]
- **RTDS** (RTDS Inc., Manitoba/Canada) [JUN 00], [FOR 01], [FOR 04], [YUN 04]
- **HYPERSIM** (HydroQuebec, Canada) [KHO 99], [BAR 00], [CHA 04]
- **NETOMAC** (SIEMENS, Allemagne) [JAK 99], [KRE 04].

Nous développerons ci-dessous des éléments relatifs à deux simulateurs numériques temps-réel : ARENE URT et RT-LAB, qui ont servi à plusieurs études au cours de cette thèse.

2.1.3.1. ARENE URT

ARENE URT (URT : Unix Real-Time) est un simulateur temps-réel numérique utilisé au G2Elab pour de nombreux projets de recherche. Développé et mis au point par EDF R&D (Electricité de France - Recherche & Développement) pour les études des réseaux électriques, il comprend trois parties principales (*Figure 2.4*) [ARE 02] :

- une interface graphique optimisée et un code de simulation de réseaux électriques permettant d'exploiter les divers niveaux de parallélisme
- une plateforme UNIX installée sur un ordinateur parallèle J-5600 Hewlett-Packard à bi-processeur dont la fréquence d'horloge est 552 MHz
- des cartes d'acquisition et de restitution pouvant être numériques ou respectivement numériques / analogiques (CNA) et analogiques / numériques (CAN). Ces cartes sont installées dans une armoire industrielle appelée « baie VME »

L'interface graphique optimisée permet l'échange de données avec l'utilisateur comme suit :

- la création des modèles d'équipements électriques et du réseau (mode PREPROCESSEUR)
- la configuration des cartes d'entrées-sorties temps-réel (mode I/O's)

- la sélection du pas de temps de simulation et l'initialisation du réseau en régime permanent (load-flow) (mode INITIALISATION)
- l'élaboration des scénarios (ouverture de disjoncteurs, court-circuits, etc.) et la sélection des grandeurs à tracer (mode SIMULATION)
- l'affichage des résultats de simulation (mode POST-PROCESSEUR)
- la réalisation d'une série de tests de manière automatique en faisant varier des paramètres en cours de simulation (mode « Batch-Testing »).

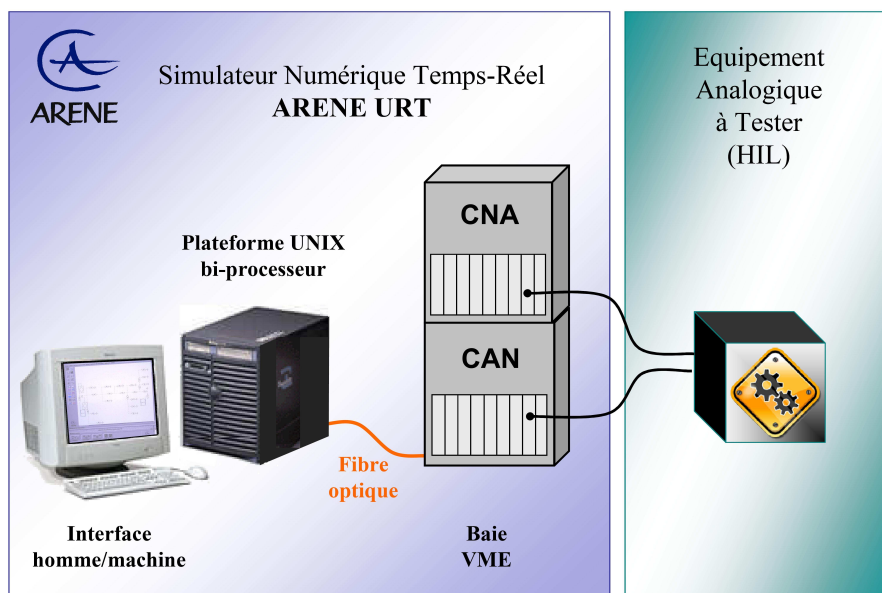


Figure 2.4. La structure du simulateur ARENE URT

De nombreux travaux ont été réalisés au niveau de notre laboratoire, au cours de différentes thèses ou stages, soit au stade du développement de nouveaux concepts [GOM 05b], [GAZ 06], au stade de la validation des algorithmes de contrôle/commande [GAZ 07], [LEP 07], ou bien pour le test de dispositifs analogiques industriels [ARN 07]. Les thématiques abordées sont très variées :

- *systèmes de protection* [OCN 07]
- *systèmes de production d'énergie renouvelable*, comme :
 - des systèmes éoliens à base de machine asynchrone à double alimentation [OCN 05]
 - des systèmes éoliens à base de machine asynchrone à cage [GAZ 06]
 - des systèmes éoliens à base de machine synchrone [AND 06]
 - des systèmes photovoltaïques [ARN 07]

- des piles à combustible [TRI 07]
- *systèmes à base d'électronique de puissance* :
 - interfaçage de systèmes de génération [OCN 05], [AND 06], [ARN 07]
 - régulation de l'énergie transmise, ou compensation de l'énergie réactive : des solutions shunt (ex. D-STATCOM) ou série (DVR, DSSSC) [GAZ 06], [LEP 07] ont été étudiés
- *les μ -réseaux* [GAZ 06]

Une grande partie de ces applications sera présentée dans le troisième chapitre.

2.1.3.2. RT-LAB

Un deuxième simulateur temps-réel utilisé à G2Elab, depuis juin 2007, est RT-LAB, développé par Opal-RT Technologies (Montreal, Canada). Une de ses caractéristiques essentielles est l'intégration parfaite avec MATLAB/Simulink. RT-LAB permet de convertir des modèles Simulink en temps réel via Real-Time Workshop (RTW) et de les exécuter sur un ou plusieurs processeurs. Ce procédé est particulièrement utile pour la simulation hybride ou Hardware-In-the-Loop (HIL) et le prototypage rapide de systèmes de contrôle/commande. RT-LAB régit la synchronisation, les interactions avec l'utilisateur, l'interfaçage avec le matériel à l'aide de cartes E/S ainsi que les échanges de données pour une exécution distribuée, de façon transparente pour l'utilisateur.

La plateforme matérielle de RT-LAB comporte deux parties principales (*Figure 2.5*) :

- une ou plusieurs **stations de commande** - nommées aussi hôtes, qui peuvent avoir deux fonctions :
 - *conception et développement* – réalisation et validation des modèles, génération de code, analyse du système hors temps-réel
 - *monitoring* – visualisation et interaction avec le système
- une ou plusieurs **stations de calcul** – nommées aussi cibles, qui permettent d'exécuter les simulations en temps-réel. La configuration distribuée (plusieurs cibles) permet à des modèles complexes d'être distribués sur une grappe de PC fonctionnant en parallèle. Les cibles de la grappe communiquent ensemble avec des protocoles de communication tels que FireWire, SignalWire ou InfiniBand qui sont suffisamment rapides pour assurer une communication fiable en temps-réel. La grappe temps-réel est reliée aux stations de commande par un réseau TCP/IP. Il est possible d'assembler et d'agrandir la grappe au besoin, puis de redéployer les PC pour d'autres applications

lorsque la simulation est terminée. RT-LAB peut gérer jusqu'à 64 cibles s'exécutant en parallèle.[RTL UG]

- les *cartes d'entrées/sorties* – sont incluses dans les stations de calcul. Leur nombre et leur type dépendent des applications envisagées. Ainsi, ils existent des cartes numériques/analogiques, analogiques/numériques ou numériques/numériques. Il faut aussi mentionner l'existence de cartes actives, c'est-à-dire des cartes avec des processeurs FPGA intégrés, qui permettent par programmation directe l'obtention de modèles pouvant être exécutés à des pas de temps même inférieurs à la microseconde.



Figure 2.5. La structure du simulateur RT-LAB

La configuration du système présent au G2Elab comporte :



- un nombre illimité de licences « postes de commande », ce qui permet la conception simultanée des modèles par plusieurs utilisateurs. En terme de matériel, actuellement la conception peut être effectuée sur deux postes : Intel Core Duo (2 CPU) à 2,13GHz et 3GB de mémoire vive, ayant comme système d'exploitation Windows XP Professional.
- la cible (station de calcul) consiste en une station disposant de deux processeurs Intel Core2 XEON Quatro (8 CPU) à 2,33GHz et 2GB de mémoire vive, ayant comme système d'exploitation QNX, qui supporte l'exécution en temps-réel du modèle compilé. En terme d'interconnexion HIL, le système comporte :
 - 32 convertisseurs A/N à 16-bits, dont 16 sur carte active (FPGA)
 - 32 convertisseurs N/A à 16-bits, dont 16 sur carte active (FPGA)

- 64 entrées/sorties numériques, dont 32 sur carte active (FPGA)
- deux modules de conditionnement d'entrée courant fort / haute tension (OP 5511), permettant chacun de convertir jusqu'à 4 signaux de courant et 4 signaux de tension en un niveau de tension sur ± 10 V. Les entrées de courant sont configurables jusqu'à 50 A continu (choix : 5, 15, 25 et 50 A) et les gammes de tensions mesurables sont configurables par cavalier jusqu'à 600V. Ces modules sont utilisés pour la fermeture des boucles temps-réel dans le cas des applications hybrides en puissance (v. § 2.1.4)

RT-LAB apporte à Matlab/Simulink des modules spécifiques comme :

- **ARTEMIS** - une suite d'algorithmes et de méthodes qui optimisent les modèles de systèmes électromécaniques créés dans Simulink, à l'aide de SimPowerSystems, en les adaptant aux contraintes temps-réel. Contrairement à SimPowerSystems, ARTEMIS a été conçu pour supporter l'implémentation temps-réel de simulations de systèmes électriques, ce qui améliore considérablement la vitesse de simulation tout en préservant la précision. C'est la seule façon d'obtenir des performances temps-réel de haute précision avec les modèles de SimPowerSystems.
- **RT-EVENTS** - est une librairie de blocs qui fonctionnent avec MATLAB et Simulink MC pour améliorer l'efficacité et la précision des simulations continues et discrètes de systèmes dont la dynamique varie du fait d'évènements discrets. Sa principale caractéristique est qu'il compense les erreurs introduites lorsque les évènements arrivent entre les pas de calcul (l'effet Jitter, voir § 2.2.3 – Figure 2.13).
- **RTeDRIVE** - Blockset Simulink de convertisseurs et modèles moteur pour simuler des moteurs électriques en temps-réel. Ce module inclut des convertisseurs de puissance DC-AC intégrant une technique d'interpolation temps-réel (TSB) pour améliorer la précision des simulations.
- **RT-LAB.XSG** (Xilinx System Generator) - Outils de développement pour concevoir des modèles avec le Blockset Xilinx et les exécuter sur cartes actives FPGA Opal-RT avec processeur Xilinx. Une autre librairie, XSGeDRIVE comporte des blocs Xilinx précompilés pour simuler des commandes d'électronique de puissance sur FPGA.

L'interface avec l'utilisateur de RT-LAB est conçue de manière à parvenir à l'exécution en temps-réel en 6 clics :

-  permet l'ouverture d'un modèle déjà crée en Matlab/Simulink (.mdl)
-  permet l'édition du modèle ouvert en vue de son adaptation pour le calcul en temps-réel sous RT-LAB ; ce mode conserve également la compatibilité avec la simulation hors temps-réel standard

Compile	permet la génération automatique du code temps-réel et prépare son transfert vers la cible
Assign Nodes	permet de spécifier exactement sur quel nœud de calcul (cible) sera exécuté chaque sous-système ; permet aussi l'activation du mode XHP (§ 2.2)
Load	permet le transfert du code par protocole ftp (internet) vers les nœuds sélectionnés ; les différents sous-systèmes sont chargés sur chaque cible et la communication est établie
Execute	permet de lancer la simulation temps-réel en parallèle sur tout les nœuds.

2.1.4. Simulateurs temps-réel hybrides

Les simulateurs hybrides temps-réel sont constitués de deux parties distinctes : un simulateur numérique temps-réel et une partie comportant des dispositifs analogiques. Ils allient par ailleurs les avantages des simulateurs analogiques et numériques.

En fonction des grandeurs qui sont échangées entre les parties constituantes, nous pouvons identifier deux classes distinctes de simulateurs hybrides temps-réel (*Figure 2.6*) :

- *simulateur hybride temps-réel « classique »* ou **HIL (Hardware-In-the-Loop)** - Dans ce cas, les grandeurs échangées entre les deux composantes ne sont que des signaux de contrôle/commande ou de mesure, booléens ou non. Ainsi, la connexion peut se réaliser directement.
- *simulateur hybride temps-réel en puissance* ou **PHIL (Power-Hardware-In-the-Loop)** - Dans ce cas la partie analogique comporte des équipements qui ont besoin d'échanger de la puissance. Cela signifie que de vrais courants et de vraies tensions vont être présents entre les deux parties, ce qui rend nécessaire une interface de puissance (des amplificateurs de puissance et des capteurs de tensions ou courants).

La partie analogique d'un simulateur hybride peut permettre de simuler un équipement difficilement modélisable numériquement (par exemples des dispositifs à base d'électronique de puissance ayant des fréquences de commutations élevées, des machines tournantes, etc.). Ces simulateurs permettent aussi d'étudier des dispositifs industriels pouvant être traités comme des « boîtes noires ».

Les simulateurs hybrides permettent de pallier un autre inconvénient des simulateurs numériques qui est leur manque de « réalisme ». En effet, la partie analogique peut être constituée de machines tournantes, de tensions et de courants réels, là où un simulateur entièrement numérique n'est capable que de générer des fichiers de données.

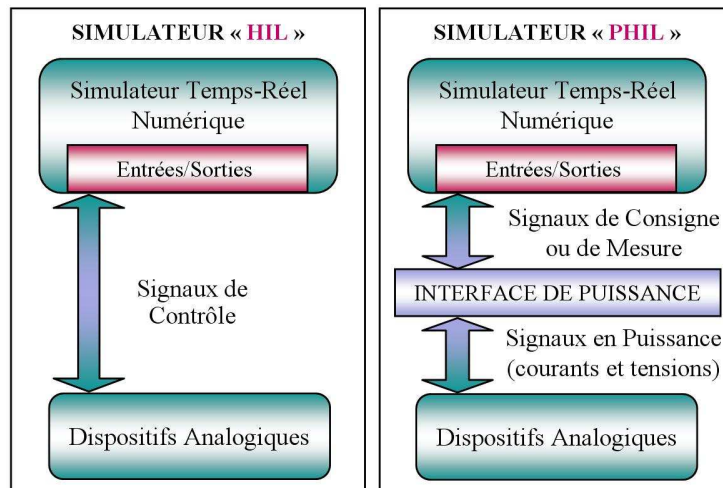


Figure 2.6. Les deux classes de simulateurs hybrides temps-réel

Par ailleurs, les simulateurs hybrides éliminent aussi les inconvénients des simulations analogiques, car les dimensions des réseaux simulés numériquement peuvent être plus importantes. De plus, il est simple de réaliser des modifications de paramètres et de créer des perturbations sur un réseau numérique comme par exemple des court-circuits, des creux de tension, des variations de fréquence, etc.

Tous les simulateurs numériques temps-réel mentionnés dans le paragraphe § 2.1.3 peuvent permettre la connexion de dispositifs analogiques directement ou via une interface de puissance. Toutefois, peu de simulateurs hybrides ont été développés pour des raisons de difficulté de réalisation : maîtrise de l'aspect temps-réel, coût relativement important de la mise en œuvre, etc.

2.2. PRINCIPES MATHÉMATIQUES ET ASPECTS PRATIQUES DE LA SIMULATION TEMPS-REEL

2.2.1. Pas de temps et contrainte temps-réel

La contrainte temps-réel constitue la principale difficulté pour la simulation en temps-réel et pour le test d'équipements réels. Afin de comprendre de quoi il s'agit quand nous parlons de ce terme, il faut analyser « l'anatomie » d'un pas de temps. Nous regarderons par la suite le cas d'étude d'un modèle simple en RT-LAB, comportant un seul sous-système [RTL T6]. Dans cette hypothèse, le pas de temps peut être divisé en quatre parties, comme dans la Figure 2.7(a) :

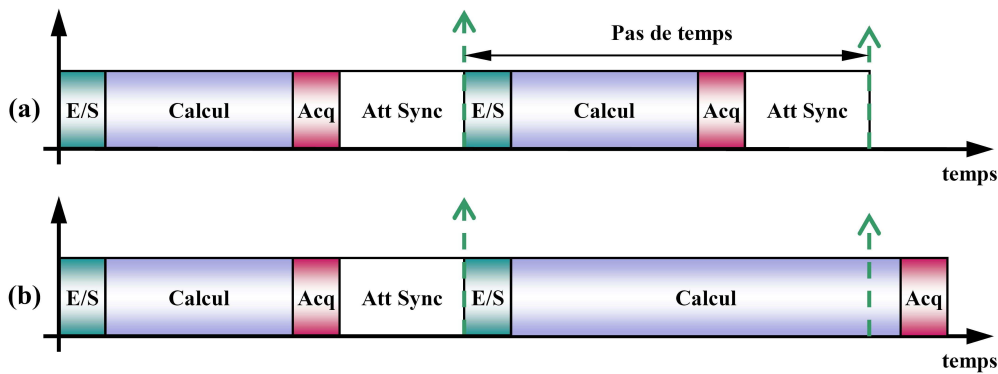


Figure 2.7. Anatomie d'un pas de temps type

- i) **Exécution des blocs d'entrées/sorties** – Le simulateur effectuera dans un premier temps toutes les sous-routines d'entrée/sortie pour tous les blocs marqués comme « synchronisés ». Ceci garantit que toutes les lectures successives seront réparties uniformément dans le temps. D'autres sous-routines d'entrée/sortie seront appelées seulement pendant la durée du calcul proprement dit (phase suivante).
- ii) **Calcul des équations du modèle simulé** – Il s'agit de l'étape la plus importante, le simulateur effectue ici le calcul des équations du modèle mathématique.
- iii) **Mise à jour des paramètres/signaux d'acquisition** – Dans cette partie s'effectue la collecte des données à envoyer vers les systèmes hôte (Figure 2.5) ou vers les cartes d'entrées/sorties du système et leur inscription dans le buffer d'acquisition. Dans cette même partie, le simulateur met à jour les valeurs des paramètres et des signaux qui ont été modifiés par l'interface homme/machine.
- iv) **Attente du signal de synchronisation** – Le processus libère le processeur, en attendant le prochain pas de temps. Pendant cette étape, le simulateur peut effectuer d'autres tâches de fond (par exemple l'écriture des données sur le disque dur).

Pour que la **contrainte temps-réel** soit garantie, il faut que la durée totale des premières trois étapes soit strictement inférieure au pas de temps de simulation. Si cette condition n'est pas assurée (Figure 2.7(b)), alors la restitution des signaux en sortie du simulateur ne pourra s'effectuer avant la fin d'un pas de temps de simulation. La simulation en temps-réel ne pourra alors pas être réalisée, comme c'est le cas pour certains simulateurs, comme ARENE URT. Pour d'autres, comme RT-LAB, ces violations seront comptabilisées comme des « overruns » et en fonction du niveau de précision que l'utilisateur désire, les résultats pourront être acceptés ou pas.

Dans le cas où les temps nécessaires pour l'acquisition et la restitution des données sont pratiquement constants (car ils ne dépendent que des cartes d'entrées/sorties du simulateur temps-réel), le temps de calcul peut varier en fonction de la puissance de calcul du simulateur

utilisé et de la dimension mathématique du système simulé numériquement. Par ailleurs, si la complexité ou la taille du schéma simulé augmente, le pas de temps doit alors être augmenté pour satisfaire la contrainte temps-réel [GOM 05a].

Afin de diminuer le temps nécessaire pour le calcul, des méthodes propres aux simulateurs temps-réel ont été développées, telles que :

➤ l'utilisation de méthodes de discrétisation des équations différentielles propres à la simulation numérique temps-réel. L'objectif est de diminuer le temps de calcul et d'obtenir la précision souhaitée. Deux méthodes sont principalement utilisées : la méthode des trapèzes et la méthode d'Euler régressive, ou une méthode mixte : « Euler-Trapèzes » [STR 99], [WAT 03];

➤ l'utilisation du parallélisme, qui consiste à répartir les tâches de calculs sur plusieurs processeurs différents, connectés suivant une architecture parallèle, afin d'optimiser le temps de calcul de l'ensemble [DUR 93].

Le pas de temps des simulateurs temps-réel est toujours fixe et n'évolue pas pendant la simulation (*Figure 2.3*). Le choix du pas de temps de simulation doit être réalisé par l'utilisateur avant de lancer la simulation. Une très grande attention doit être donnée à cette étape car plusieurs aspects essentiels doivent être pris en compte:

a) Un pas de temps trop grand :

➤ peut conduire à un manque de précision dans les résultats de simulation ;

➤ peut augmenter les retards dans la boucle temps-réel et conduire à l'instabilité de la simulation. (§ 2.2.3) ;

➤ peut réduire la plage d'étude fréquentielle des phénomènes étudiés. En effet, le pas de temps de simulation fixe la fréquence d'échantillonnage des signaux en entrée. La plage d'étude fréquentielle de la simulation temps-réel peut être définie par le théorème de Shannon, lequel demande une fréquence d'échantillonnage d'un signal égale au moins au double de la fréquence maximale de ce dernier (*éq 2.1*). Par exemple, un pas de temps de simulation typique de 50µs permet l'étude de domaines fréquents compris entre 0Hz et 10kHz. Pour un pas de 100µs le domaine fréquentiel est réduit à 0Hz – 5kHz.

$$\text{bande passante} = \frac{1}{2 \times \text{pas de temps}} \quad (\text{éq 2.1})$$

b) Un pas de temps trop petit :

➤ peut faire que la contrainte temps-réel n'est plus assurée - *Figure 2.7(b)*.

2.2.2. Simulation aux taux d'échantillonnage différentes

Dans le paragraphe précédent a été montrée l'anatomie d'un pas de temps pour un système fonctionnant à un taux d'échantillonnage unique. Certains simulateurs (ex. : Matlab/Simulink) permettent la simulation de modèles plus complexes ayant des composantes qui fonctionnent à des taux d'échantillonnage multiples, « *multi-rate* » [RTL T6]. Un exemple d'un tel cas peut être la simulation d'un réseau électrique comportant des machines tournantes et de l'électronique de puissance. Nous pourrions désirer de simuler la partie réseau/machines à un pas de temps de 50 μ s, la partie électronique de puissance à 10 μ s et la partie contrôle/commande à 100 μ s, et tout cela en temps-réel. Nous verrons par la suite si ce type de simulation est possible et dans quelles conditions.

Ainsi, nous pouvons être amenés à réaliser des modèles avec des composants qui nécessitent d'être simulés à des taux d'échantillonnage différents. La conception de ces modèles diffère en fonction de l'architecture et du type de simulateur utilisé, en fonction :

➤ *Du nombre de processeurs :*

- simulation monoprocesseur
- simulation multiprocesseurs

➤ *De la possibilité de réaliser plusieurs tâches :*

- ***simulation mono-tâche (single-thread)*** – la simulation mono-tâche implique que tous les calculs sont effectués dans la même instance de code ; ainsi, dans le cas de modèles multi-rate, la même instance est bouclée à chaque pas de temps, tandis que certains blocs sont exécutés juste une fois à X pas de temps
- ***simulation multi-tâche (multi-thread)*** – la simulation multi-tâche suppose qu'il y a plusieurs instances de code en exécution ; une instance sera exécutée à chaque échantillon défini par le sous-système ; ces instances partageront le processeur (si unique) en fonction de leur priorité et de l'état des autres instances.

Afin de mieux comprendre, prenons l'exemple d'un modèle comportant deux parties A et B, comme dans la *Figure 2.8*. En fonction du type du simulateur et du modèle nous pouvons rencontrer trois situations :

- (a) *simulation mono-tâche d'un modèle « single-rate »* (comportant une fréquence d'échantillonnage unique) - Ce cas est identique au cas de base montré dans la *Figure 2.7*, la même anatomie du pas de temps étant présente. Les deux sous-systèmes sont appelés à chaque pas.

- (b) *simulation mono-tâche d'un modèle « multi-rate »* (le sous-système A a une fréquence d'échantillonnage de $50\mu\text{s}$ tant que B doit être simulé à $100\mu\text{s}$) - Dans ce cas, le sous-système B fonctionne à une fréquence deux fois plus petite que celle de A, ainsi il sera calculé juste une fois sur deux pas, alors que A sera calculé à chaque pas. Si la taille du pas de temps est insuffisante pour le calcul des deux parties, la contrainte temps-réel sera violée et donc la simulation ne sera plus possible ou bien des « overruns » apparaîtront.
- (c) *simulation multi-tâche d'un modèle « multi-rate »* - Dans ce cas, le calcul B sera effectué comme une instance de code séparé. Cette instance sera exécutée quand le processeur n'est pas occupé avec l'instance de calcul A. Si le calcul B n'est pas fini dans le temps libre du premier pas il débordera sur le deuxième. Ainsi l'avantage de ce type de simulation est qu'elle permet la distribution du calcul sur tous les pas de temps, au lieu de tout « forcer » dans un seul pas.

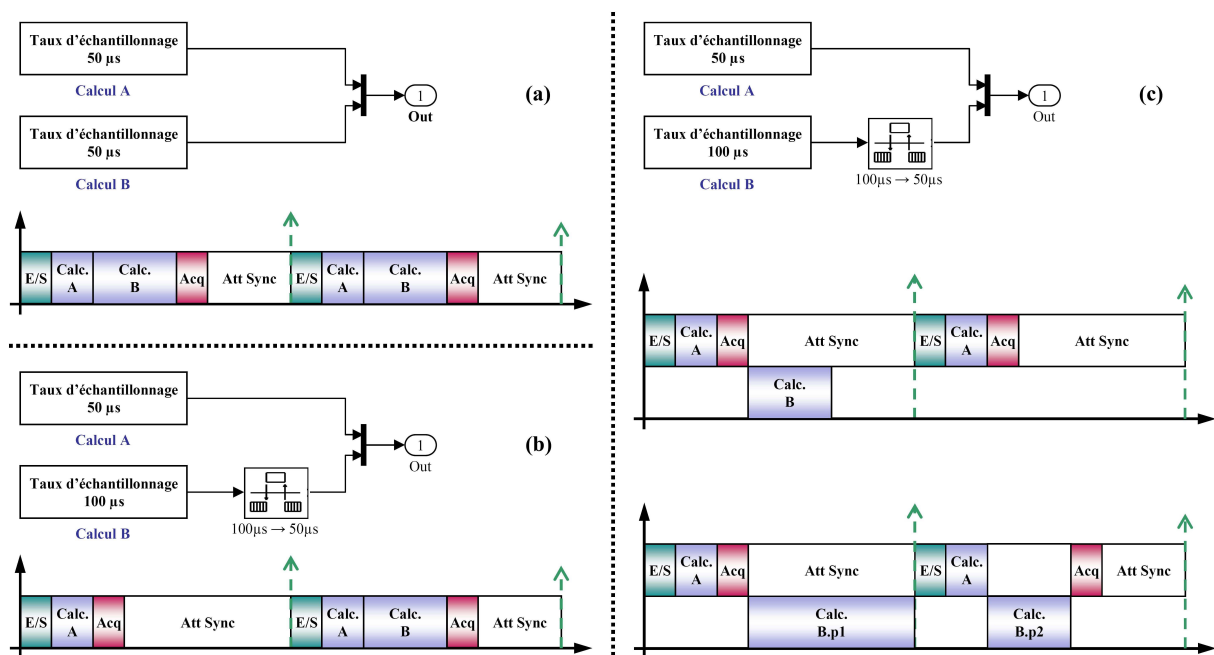


Figure 2.8. Anatomie d'un pas de temps en fonction du type du simulateur et du modèle

Dans le cas des simulateurs multiprocesseurs, des méthodes de résolution adaptées au calcul en parallèle sont utilisées. Un des processeurs sera le maître et synchronisera tout les autres. La possibilité de simuler à des pas de temps différents reste valable en fonction du simulateur. Afin de montrer l'avantage de la simulation multiprocesseur, la Figure 2.9 représente la performance temps-réel, c'est-à-dire le temps nécessaire pour le calcul, en fonction du nombre de processeurs utilisés. Nous pouvons remarquer que si nous doublons le

nombre de processeurs, le temps nécessaire pour le calcul diminue plus que de moitié.
[PAQ 07]

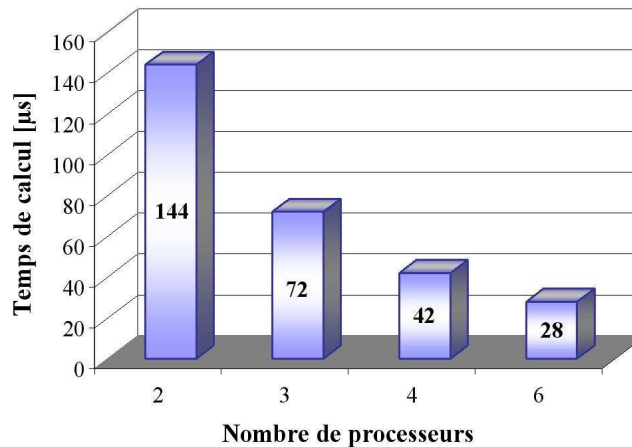


Figure 2.9. Performance temps-réel

Le « *eXtreme High Performance* » (XHP), est un mode de simulation particulier utilisé par RT-LAB, qui permet de désactiver l'ordonnanceur du système d'exploitation et de prévenir toute intervention d'une autre tâche sur le processeur. Quand en mode XHP, le modèle attend dans une boucle vide pour son prochain pas de temps programmé, au lieu d'attendre d'être réveillé par le système d'exploitation.

En fonction de l'application envisagée, ce mode de simulation peut représenter un impact aussi positif que négatif :

➤ *Avantages du mode XHP :*

- Il permet d'éliminer les latences dues aux changements de contexte et aux appels des fonctions non-prioritaires.
- Il permet une exécution plus stable et précise des modèles avec des pas de temps inférieurs à 50μ s.
- Il permet la maximisation du calcul qui peut être effectué dans un pas de temps inférieur à 50μ s.
- Il permet aux sous-systèmes d'être simulés sur plusieurs processeurs sans l'effet négatif du Jitter (v. Figure 2.13).

➤ *Inconvénients du mode XHP :*

- A cause du fait qu'il suspend toutes les tâches de fond, tout code qui n'est pas implémenté dans le modèle lui-même ne sera jamais exécuté.

2.2.3. Retards

Les retards d'un simulateur temps-réel sont directement liés au pas de temps de simulation (PT). Ces retards peuvent être perçus en étudiant le temps entre lequel un signal est échantillonné en entrée, traité par le simulateur et restitué en sortie (*Figure 2.10*).

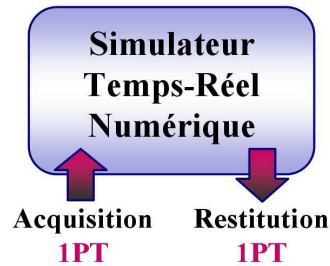


Figure 2.10. Retards du simulateur temps-réel

Des essais ont été réalisés pour le simulateur ARENE URT (*Figure 2.11*), montrant un retard minimal d'environ deux pas de temps mais qui peut aller jusqu'à trois pas de temps, pour le cas d'ARENE URT.

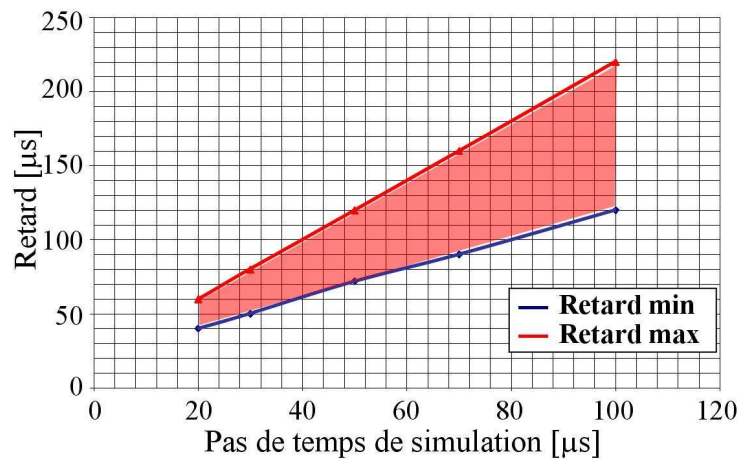


Figure 2.11. Retards mesurés en fonction du pas de temps de simulation

Afin de mieux comprendre, sur la *Figure 2.12* sont présentés les résultats expérimentaux (courbes oscilloscope) obtenues avec RT-LAB pour un pas de temps de 50µs. Les deux retards mentionnés ci-dessus peuvent être facilement observés.

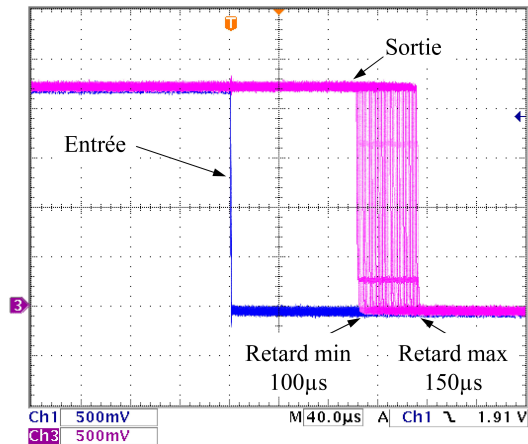


Figure 2.12. Exemple de retards mesurés sur oscilloscope

Le retard minimal, de deux pas de temps, est dû à l'acquisition et la restitution du signal. La différence entre le retard maximal et le minimal peut être expliquée par la présence de l'effet Jitter. Ce phénomène est caractéristique de simulations avec pas de temps fixe et il se manifeste par la déformation du signal échantillonné (Figure 2.13). [DEK 02]

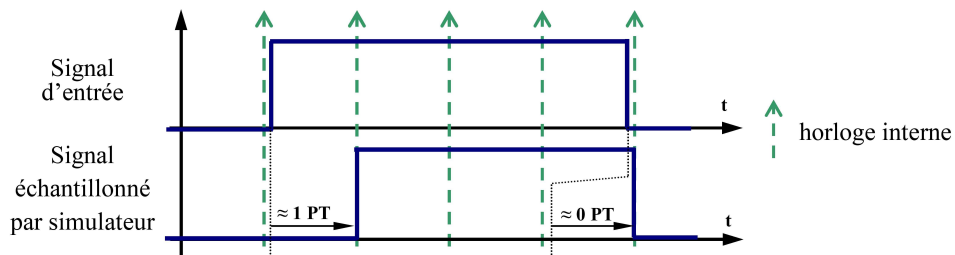


Figure 2.13. Représentation de l'effet Jitter causé par le pas de temps fixe

Du à son caractère aléatoire, la compensation de ce délai n'est pas précise et il est presque impossible de l'éliminer entièrement. Néanmoins, il existe des méthodes et des outils proposés afin de réduire sa valeur, donc son influence, comme par exemple le module RT-EVENTS du simulateur RT-LAB [RTE RG] (voir § 2.1.3.2).

Les retards présentés ci-dessus peuvent avoir de graves conséquences dans les applications nécessitant une précision élevée au niveau de l'acquisition. C'est le cas des applications d'électronique de puissance, comme par exemple un onduleur de tension en pleine onde fonctionnant en STATCOM, où l'influence d'un retard, même très faible sur un des signaux de commande peut avoir de lourdes conséquences sur la précision des résultats [PET 97].

2.2.4. Interface de puissance

Comme mentionné dans le paragraphe § 2.1.4, un des éléments clé d'une plateforme temps-réel hybride en puissance est *l'interface de puissance*. Cette partie, composée d'amplificateurs de puissance et de différents capteurs (courant, tension, vitesse etc.) peut avoir une architecture variable, en fonction du type des dispositifs analogiques à tester.

Plusieurs critères doivent être pris en compte afin de bien choisir les éléments de l'interface de puissance, qu'il s'agisse d'amplificateurs de puissance ou de capteurs :

➤ Leurs *données nominales*, qui doivent être parfaitement connues afin de bien dimensionner la partie analogique. Il doit y avoir concordance entre *les tensions et les puissances nominales* de l'amplificateur, du capteur et des autres dispositifs (charges, appareils de mesure, câblage...). Si cette concordance n'est pas assurée, il peut se produire, par exemple, des saturations dues aux protections de ces dispositifs sur les signaux de simulations et cela entraînerait des perturbations sur la simulation temps-réel.

➤ La *compatibilité entre les gammes de tensions de la partie analogique et de la partie numérique doit être assurée* : les gains des capteurs, de l'amplificateur et de la simulation numérique doivent être en cohérence (conversion de l'homothétie).

➤ Chaque élément doit avoir une *bonne linéarité* sur tout son domaine de fonctionnement.

➤ La *bande passante* de chaque élément doit correspondre au domaine fréquentiel d'étude.

➤ Il faut aussi bien connaître les *retards* que ces éléments introduisent. Les déphasages correspondant à ces retards peuvent être difficilement compensables et peuvent entraîner l'instabilité de la simulation temps-réel. Si le système est stable, le retard se traduit comme un déphasage supplémentaire entre le courant capté et la tension amplifiée.

➤ En fonction des applications visées, une autre contrainte importante peut être la *réversibilité* de l'amplificateur de puissance, autrement dit, l'amplificateur doit pouvoir fonctionner sur quatre quadrants, ce qui a une répercussion non négligeable sur le coût.

2.2.5. Types de connexions

N'importe quel dispositif électrique peut être modélisé dans la simulation temps-réel hybride en puissance (PHIL) par une source de courant ou tension, en fonction de son type de

connexion au réseau. Il existe deux façons de connecter un dispositif électrique : shunt ou série (Figure 2.14).

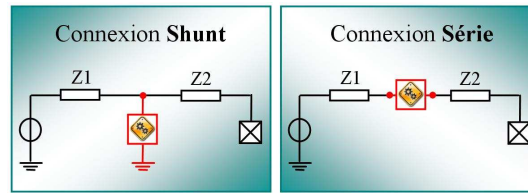


Figure 2.14. Modélisation des connexions Shunt et Série

La connexion **shunt** est habituellement adoptée afin de modéliser :

- des sources ou des charges, comme par exemple des générateurs non conventionnels (éolien, photovoltaïque, etc.)
- des dispositifs à base d'électronique de puissance pour la gestion de l'énergie réactive et de la tension (STATCOM, etc.)
- des appareils de filtrage actif, réduction de l'effet flicker, équilibrage de charges.

Afin d'obtenir une telle configuration dans une simulation PHIL, l'amplificateur de puissance doit être piloté en tension et des capteurs de courant sont utilisés pour la fermeture de la boucle temps-réel (Figure 2.15). Sur la partie numérique, le dispositif analogique est modélisé par une source de courant pilotable connectée en shunt, le signal de contrôle venant directement des capteurs de courant via les convertisseurs analogique/numérique (CAN).

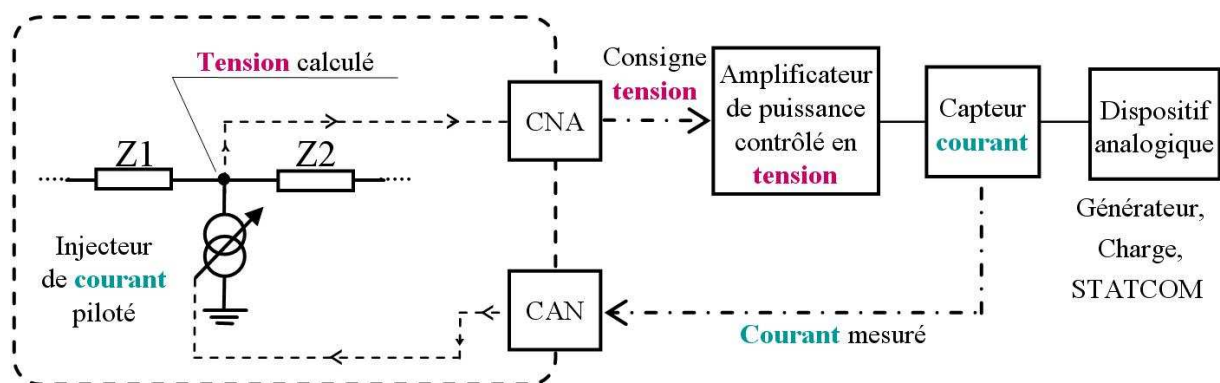


Figure 2.15. Modélisation de la connexion Shunt dans une simulation PHIL

La connexion **série** est utilisée pour la modélisation des :

- systèmes de gestion des flux de puissance (par exemple : DSSSC – Distribution Static Series Synchronous Compensator, ou UPFC – Unified Power Flow Controller)

- systèmes de réduction des creux de tension au niveau des charges sensibles
- systèmes de réduction des déséquilibres
- systèmes de compensation des harmoniques de tension

Cette configuration est obtenue en pilotant en courant l'amplificateur de puissance et en utilisant des capteurs de tension (*Figure 2.16*). Sur la partie numérique, le dispositif analogique est modélisé par une source de tension pilotable connectée en série.

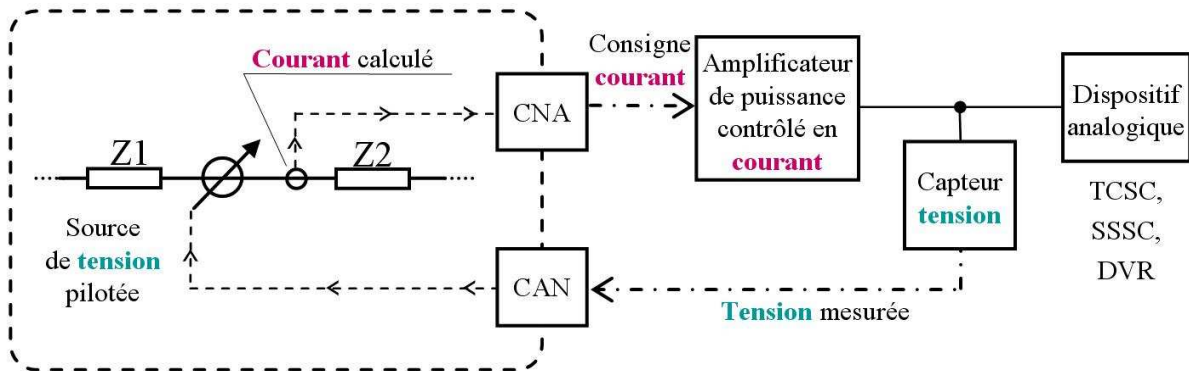


Figure 2.16. Modélisation de la connexion Série dans une simulation PHIL

2.2.6. Notions d'acquisition des données

Les considérations exposées dans ce paragraphe font référence au cas de l'échange des données entre les stations de calcul et les stations de commande du simulateur RT-LAB [RTL T4]. Ces considérations seront néanmoins valables pour tout système de transfert des données et aideront à la compréhension de leur fonctionnement et des causes de certaines pertes de données.

Nous développons par la suite la manière dont est réalisé un transfert d'informations en utilisant deux mémoires tampons (buffer) à 12 bits. Dans la partie gauche de la *Figure 2.17* est présenté ce transfert en conditions normales de fonctionnement. Ainsi :

- 1 *le 8^{ème} pas de temps* – La simulation du modèle a commencé et l'acquisition stocke dans le premier buffer les valeurs collectées à chaque pas de temps.
- 2 *le 12^{ème} pas de temps* – Le premier paquet de données (le premier buffer) est prêt. Nous signalons à l'expéditeur qu'il peut envoyer, dès qu'il est possible, le premier paquet vers le destinataire.
- 3 *le 15^{ème} pas de temps* – Pendant l'attente, la deuxième mémoire tampon est préparée. L'expéditeur n'a pas eu encore l'occasion d'envoyer le premier paquet.

- 4 *le 20^{ème} pas de temps* – L'expéditeur a envoyé, en tâche de fond, le premier paquet de données. Le deuxième paquet est encore en cours de préparation sur le deuxième buffer.
- 5 *le 24^{ème} pas de temps* – Le deuxième paquet de données est prêt. Nous signalons à l'expéditeur qu'il peut l'envoyer.
- 6 *le 27^{ème} pas de temps* – Pendant ce temps un nouveau paquet est en cours de préparation dans le premier buffer. Et ainsi de suite...

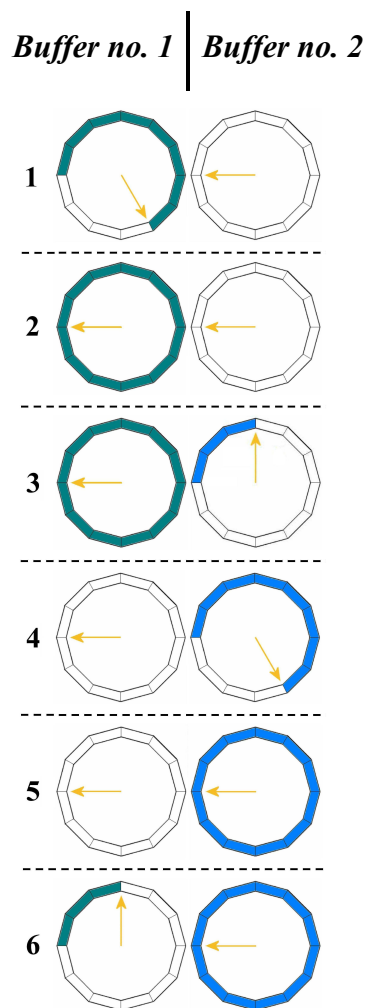


Figure 2.17. Principe du transfert de données en utilisant deux mémoires tampon (buffer)

- régime normal de fonctionnement

Dans notre cas particulier (transfert de données entre la station de calcul et la station de commande de RT-LAB), l'acquisition et la transmission des données se répercuteront uniquement sur l'interface avec l'utilisateur et jamais sur l'exécution de la simulation.

Cependant, dans d'autres applications, une perte de données peut engendrer des erreurs importantes, voire des fonctionnements défectueux. Ainsi il faut toujours accorder une grande importance à la configuration du transfert.

Si nous revenons à notre exemple, il y a trois paramètres permettant de configurer la quantité des données à acquérir avant de l'envoyer vers la station de commande :

- **Le facteur de décimation (DF)** – définit à quelle fréquence nous récupérons une donnée issue de la station de calcul, afin de la mettre en mémoire tampon (buffer).

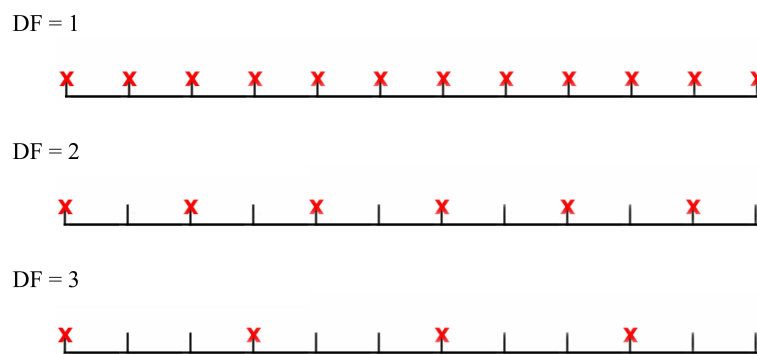


Figure 2.18. L'influence du facteur de décimation

- **Le nombre d'échantillons par signal (NE/S)** – représente la taille de la fenêtre d'acquisition. Il définit combien de données seront acquises avant de les envoyer vers la station de commande.

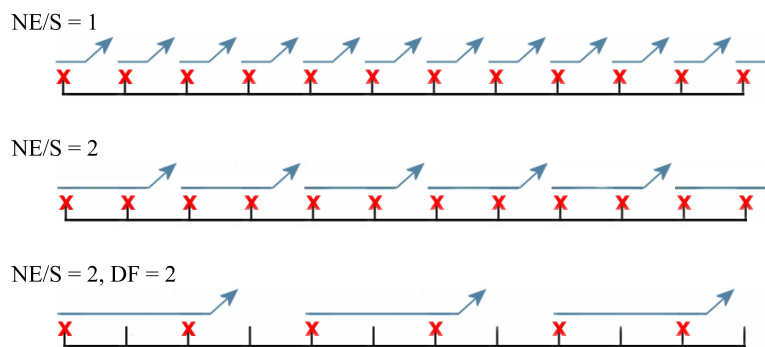


Figure 2.19. L'influence du nombre d'échantillons par signal

- **La durée** – est une autre façon de choisir le nombre d'échantillons à acquérir avant l'envoi. Au lieu de spécifier le nombre de données, la durée spécifie la taille de la fenêtre en unités de temps (ms). L'équation générale est la suivante :

$$\text{Durée} = DF \times NE/S \times PT \quad (\text{éq 2.2})$$

Où : PT est le pas de temps de la simulation.

Tous ces paramètres déterminent la quantité d'informations qui seront acquises avant d'être envoyées vers la station de commande. *Trop d'informations*, et l'affichage sera actualisé dans des paquets visibles, *trop peu d'informations* et apparaîtra le risque de surcharger la station de calcul et de perdre des données (Figure 2.20).

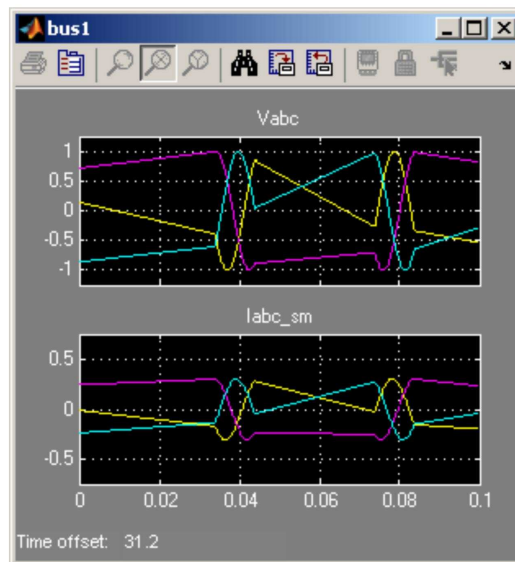


Figure 2.20. Exemple d'acquisition mal configuré (console)

Ainsi nous arrivons à la question : comment surviennent les pertes des données ? Afin de répondre à cette question, regardons la Figure 2.21, où les trois premières phases sont identiques comme dans régime normal de fonctionnement (Figure 2.17). Ainsi :

- 4 le 20^{ème} pas de temps – L'expéditeur n'a pas eu encore l'occasion d'envoyer le premier paquet. Le deuxième est toujours en cours de préparation sur le deuxième buffer.
- 5 le 24^{ème} pas de temps – Le deuxième paquet est prêt aussi. Pour une raison x , l'expéditeur est toujours en retard. Nous commençons à perdre des données !
- 6 le 27^{ème} pas de temps – Pendant qu'on attend que le premier buffer soit transmis, les données du deuxième buffer sont écrasées. 3 échantillons ont été perdus.
- 7 le 29^{ème} pas de temps – Le premier paquet a été envoyé. Nous recommençons l'acquisition des données dans le premier buffer. En tout, nous avons perdu 5 échantillons. Le deuxième paquet n'est toujours pas transmis.
- 8 le 32^{ème} pas de temps – Le deuxième paquet a été aussi envoyé. Le fonctionnement est redevenu normal.

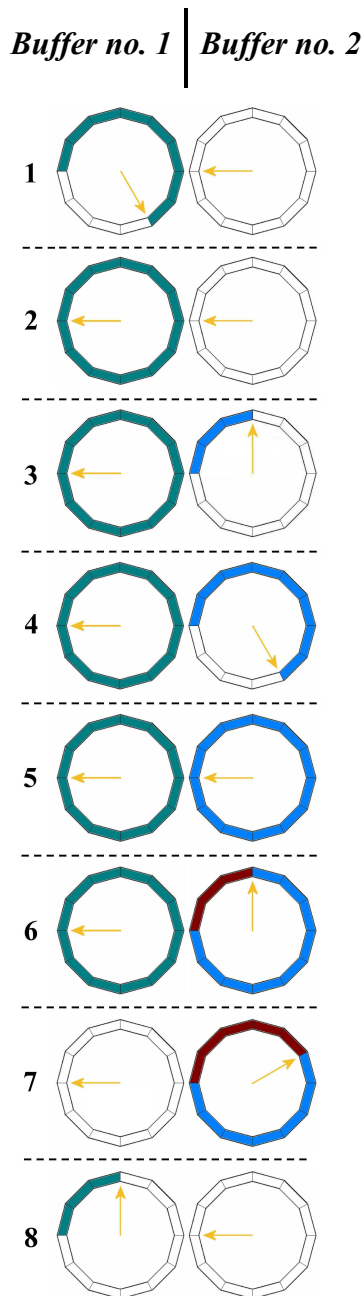


Figure 2.21. Principe du transfert de données en utilisant deux mémoires tampon (buffer)
- régime de fonctionnement avec perte de données

Il y a trois motifs qui peuvent causer la perte des données entre les stations de commande et les stations de calcul :

- ✦ **La station de calcul n'est pas disponible** – L'expéditeur n'a pas l'occasion de libérer la mémoire tampon. Une solution à ce problème sera d'augmenter le pas de temps du modèle ou d'augmenter la puissance de calcul du système. Il est aussi possible d'agrandir la fenêtre d'acquisition (NE/S).

- ***La bande passante du réseau est dépassée*** – L'expéditeur essaie d'envoyer mais le réseau est congestionné et la transmission échoue. L'expéditeur réessaiera jusqu'à ce qu'il réussisse. Afin de résoudre ce conflit, nous pouvons augmenter le facteur de décimation (DF) ou, si possible, utiliser des réseaux plus rapides.
- ***La station de commande n'est pas disponible*** – Dans ce cas, il faut arriver à augmenter la puissance de calcul du processeur et utiliser des IHM (interfaces home/machine) plus rapides.

2.3. SYNTHÈSE SUR CHAPITRE 2

Nous avons montré dans ce chapitre que le simulateur temps-réel hybride, soit HIL ou PHIL, est un outil très flexible et performant pouvant être utilisé pendant toutes les étapes de développement d'un nouveau concept ou dispositif : conception, validation, prototypage rapide ou essais de dispositifs industriels. Toutes ces opérations seront réalisées dans des conditions réelles de fonctionnement, à échelle réduite ou normale.

Afin d'utiliser d'une manière efficace un simulateur temps-réel, il faut trouver un compromis général entre le pas de temps de simulation, la précision des résultats, la stabilité de fonctionnement en temps-réel, la plage de fréquence étudiée, la taille du réseau et la complexité des modèles utilisés dans la simulation.

Le simulateur temps-réel hybride représente un instrument de recherche, de test et validation, utilisable non seulement dans le domaine des réseaux électriques classiques mais aussi dans l'automobile, l'aéronautique et la mécatronique.

Les travaux présentés par la suite dans cette thèse ont été effectués en utilisant deux simulateurs temps-réel différents. La plupart des applications ont été réalisées avec ARENE URT, pour passer ensuite à RT-LAB, un simulateur encore plus puissant et flexible.

CHAPITRE 3. APPLICATIONS AUX COMPOSANTS SYSTEMES DE GENERATION NON CONVENTIONNELS ET A LA GESTION DES FLUX ENERGETIQUES DANS LES RESEAUX

3.1. INTRODUCTION

Le réseau électrique actuel se trouve devant deux problématiques connexes qui sont l'intégration à large échelle des systèmes à base de renouvelable, d'une part et d'autre part à une insertion massive de génération distribuée.

Les générateurs à base d'énergie renouvelable sont les générateurs dont la source primaire est inépuisable. L'avantage principal de ces énergies est le fait qu'elles soient propres, c'est-à-dire, qu'elles supposent avoir un faible impact environnemental. Leur principale limitation est leur caractère intermittent car la puissance de sortie dépend en tout instant de la disponibilité de la source primaire. Les systèmes à base de renouvelable les plus répandus (sources primaires réparties et largement disponibles) sont les générateurs éoliens et les générateurs photovoltaïques.

L'augmentation envisagée de la pénétration des unités de production d'énergies décentralisées raccordées au réseau de distribution amène à revoir l'architecture physique et algorithmique de ce dernier. En effet, une insertion massive avec le schéma de réseau tel qu'il apparaît aujourd'hui, impliquera des problèmes au niveau du plan de tension, du schéma de protection, voire de la stabilité. L'électronique de puissance trouve là un champ fertile d'applications notamment pour tout ce qui est régulation de la circulation des flux énergétiques et réglage du plan de tension.

Ce chapitre est dédié à la simulation temps réel hybride - TRH- (Power Hardware In the Loop : PHIL) de ces systèmes de production et de contrôle. Dans un premier temps, nous analyserons certains constituants essentiels de la plateforme PHIL expérimentale réalisée, pour passer ensuite à des applications concrètes portant sur les thématiques d'actualité citées plus haut. Ainsi, nous nous intéresserons à la génération éolienne, avec les particularités engendrées par tous les trois types de machines les plus usitées (machine asynchrone à double alimentation, machine synchrone, machine asynchrone à cage), à la génération solaire photovoltaïque, avec son système d'interfaçage et enfin aux systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la conduite des réseaux et microréseaux (compensation, contrôle de flux, protections...)

3.2. COMPOSANTS MATERIELS AU G2ELAB

3.2.1. Interface de puissance

Comme mentionné dans le *Paragraphe § 2.1.4*, un des éléments qui différencie la simulation temps-réel hybride en puissance, PHIL, par rapport à la simulation temps-réel hybride classique, HIL, est l'interface de puissance (*Figure 2.6*). Quelques caractéristiques clés de ses composants (amplificateurs de puissance, capteurs) ont été présentées dans le *Paragraphe § 2.2.4*. Par la suite nous rentrerons plus dans le détail en présentant le matériel utilisé au G2Elab.

3.2.1.1. Amplificateur de puissance

L'amplificateur de puissance est le composant de l'interface qui transforme les signaux de sortie du simulateur temps-réel numérique (habituellement signaux en tension $\pm 10V$) en tensions et/ou courants réels (jusqu'à $180V_{eff}$ entre phases et $80A$ en transitoire). Plus de détails sur cet élément peuvent être trouvés dans l'*ANNEXE B* et le *Tableau 3.1* qui contient les caractéristiques nominales de sortie.

V_{sortie} nominal	I_{sortie} nominal	P_{sortie} nominal	I_{sortie} max
$180 V_{eff}$	$20 A_{eff}$	2000 W	$80 A_{eff}$

Tableau 3.1. Caractéristiques nominales en sortie de l'amplificateur PUISSANCE+ (pour une voie)

L'analyse des caractéristiques de l'amplificateur a été en partie effectuée avant sa fourniture par son fabricant [PUI 05b], montrant une bonne linéarité et une bande passante à -3dB d'environ 30kHz. En conséquence, en utilisant ce dispositif, il est possible de représenter des phénomènes fréquentiels compris entre le continu et 30kHz.

L'amplificateur de puissance peut être commandé en tension ou en courant pour représenter le type de connexion de la partie analogique désiré (respectivement : série ou shunt, voir § 2.2.5). Ainsi :

➤ **En mode U** : l'amplificateur régule en tension, quelque soit la charge, dans la limite du domaine d'utilisation.

➤ **En mode I** : l'amplificateur régule en courant, quelque soit la charge, dans la limite du domaine d'utilisation.

En fonction de l'application souhaitée l'amplificateur peut être amené soit à injecter, soit à dissiper de la puissance. Ainsi, l'idéal est de disposer d'un amplificateur quatre cadrans. C'est le cas de l'amplificateur PUISSANCE+ présenté ci-dessus, le domaine d'utilisation (tension/courant) étant donné dans la *Figure 3.1*.

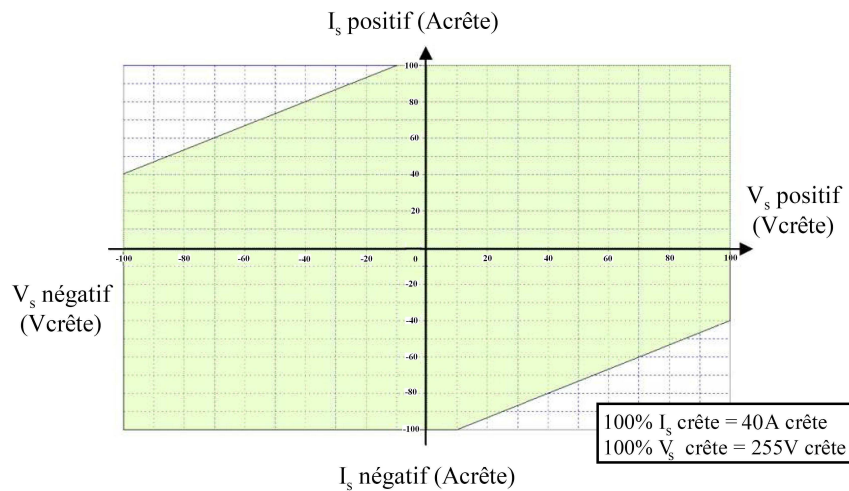


Figure 3.1. Domaine d'utilisation de l'amplificateur de puissance

Comme mentionné auparavant, l'amplificateur est piloté par un signal de consigne en tension dans la gamme $\pm 10V$. Cela correspond à la gamme de tension de sortie du convertisseur numérique/analogique d'ARENE URT : par conséquent, la compatibilité avec ce simulateur est assurée. Dans le cas de RT-LAB, les sorties analogiques sont en $\pm 16V$, ainsi une grande attention doit être attribuée au dimensionnement des gains de sortie de manière à ne pas générer des saturations.

D'autres amplificateurs, type KEPCO BOP 36-12M, ont été aussi utilisés pendant les phases de validation de la plateforme temps-réel hybride en fonction des applications choisies.

3.2.1.2. Capteurs courant/tension

Un deuxième élément essentiel de l'interface de puissance est le capteur. Son rôle est également important car il permet de mesurer les courants, tensions ou autres grandeurs, qui seront utilisés par la suite par le simulateur numérique temps-réel. Il accomplit par conséquent la fermeture de la boucle temps-réel hybride.

Dans la plupart des applications réalisées au G2Elab, et en particulier pour les essais effectués avec ARENE URT, un capteur construit au laboratoire a été utilisé (*Figure 3.2*). Le

dispositif peut être exploité en tant que capteur courant ou capteur tension. Il permet la transformation de quatre canaux et ce, en vue d'avoir la possibilité de travailler sur des systèmes triphasés avec neutre. Trois calibres sont disponibles (20A, 50A et 100A) en fonction de la gamme de courant à mesurer. Pour la capture de tension la valeur maximale est de 500V. Si les grandeurs à mesurer sont trop faibles par rapport au calibre choisi, les erreurs peuvent devenir inacceptables. Par contre, si les entrées sont supérieures à la limite du calibre, le signal de sortie du capteur va être saturé. Cela entraînera des perturbations importantes sur la simulation temps-réel et les résultats obtenus ne représenteront plus la réalité. Toute la difficulté est de pouvoir estimer pour chaque signal, avant la simulation temps-réel, les valeurs de régime permanent ainsi que celles des transitoires. Parfois, plusieurs simulations hors temps-réel sont nécessaires afin de choisir les bons calibres.

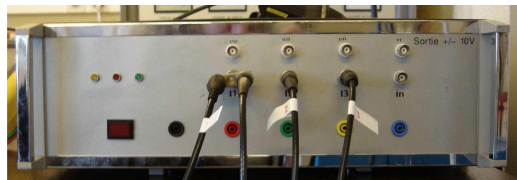


Figure 3.2. Capteur de courant/tension utilisé.

Les signaux de sortie du capteur sont compris également entre $\pm 10V$. Par conséquent, la compatibilité avec les cartes d'entrée d'ARENE URT (les convertisseurs analogique/numérique) est toujours assurée.

Pour RT-LAB l'entrée peut aller jusqu'à 100V, ainsi le capteur précédent est compatible avec ce simulateur aussi. Néanmoins, simultanément avec le système RT-LAB ont été acquis deux modules de conditionnement d'entrée courant fort/haute tension, OP5511 (Figure 3.2). Ceux-ci permettent de convertir jusqu'à 4 signaux de courant et 4 signaux de tension en un niveau de tension sur $\pm 10 V$. Les entrées de courant sont configurables en usine jusqu'à 50 A continu (choix : 5, 15, 25 et 50 A). Les gammes de tensions mesurables sont configurables par cavalier jusqu'à 600V (50V, 10V, 200V, 400V, et 600V).



Figure 3.3. Module de conditionnement courant/tension (OP5511)

Ainsi, comme les systèmes de conditionnement présentés sont compatibles avec les deux simulateurs, l'interface de puissance fournit une grande flexibilité. Des éléments supplémentaires peuvent être rajoutés afin d'augmenter la gamme de puissance de la plateforme temps-réel hybride ainsi conçue : résistances d'absorption, autotransformateurs, etc.

3.2.2. Banc « universel » pour la distribution électrique

Une baie d'électronique de puissance a été conçue et réalisée au G2Elab dans le cadre d'un projet ambitieux, avec l'objectif d'obtenir un *Banc Universel pour la Distribution Electrique* (Figure 3.4). En effet, il est possible d'utiliser ce banc pour étudier les différentes possibilités de connexion au réseau des onduleurs de tension : connexion série, shunt ou universelle.



Figure 3.4. Banc « universel » pour la distribution électrique

Le synoptique complet de la baie de puissance est donné sur la Figure 3.5.

Deux grands domaines d'applications sont alors envisageables en utilisant ce banc :

- ⚡ Applications type interfaces ou émulateurs pour la génération d'énergie : dans ce cas-là, l'électronique de puissance permet d'interfacer une source primaire sur le réseau électrique (génération éolienne [OCN 05][AND 06], hydrolienne [AND 08], photovoltaïque, etc.) ou d'émuler une source primaire (panneaux photovoltaïques, pile à combustible [TRI 07], micro turbine [GAZ 06]).
- ⚡ Applications type compensateurs pour l'amélioration de la qualité d'énergie : l'interface est utilisée ici pour compenser des harmoniques (filtrage actif [LEP 07]) ou des creux de tension (DVR ou autres systèmes D-FACTS [GAZ 06]).

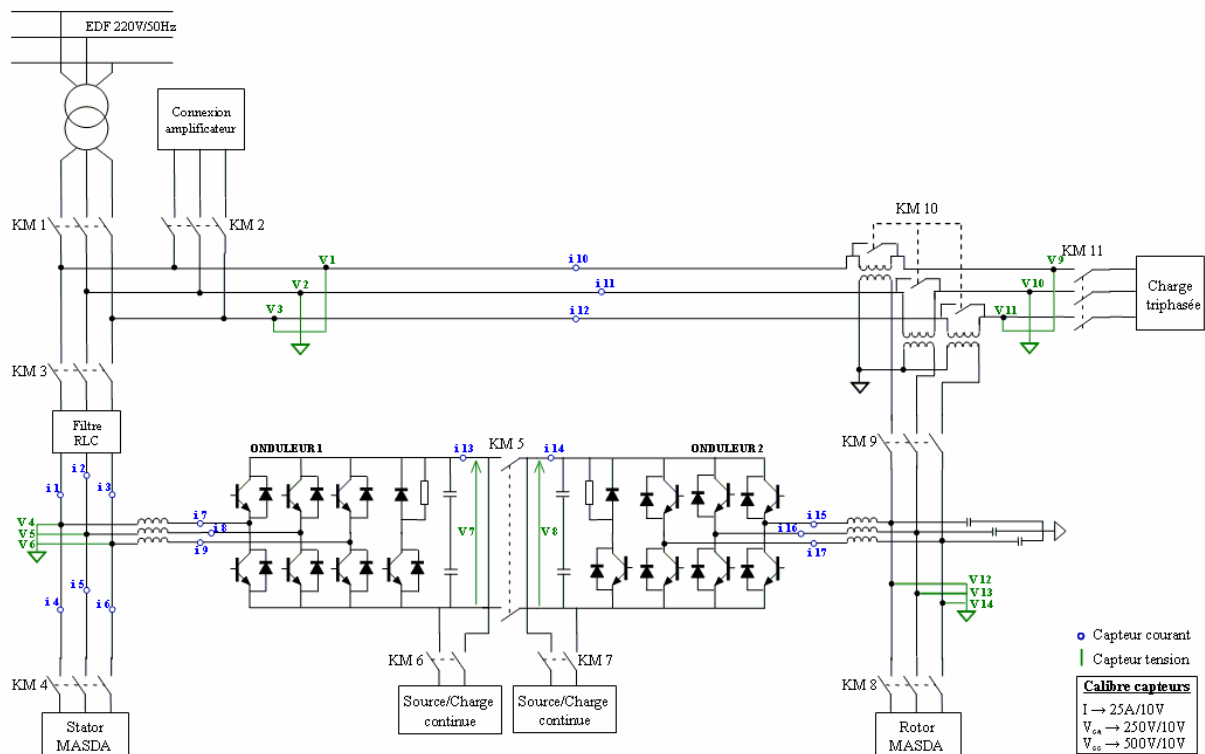


Figure 3.5. Synoptique exact du banc « universel » pour la distribution électrique

Si nous revenons au synoptique présenté dans la Figure 3.5, en fonction de l'état des interrupteurs, il est possible de connecter différents types de machines et de réaliser les applications mentionnées auparavant. Le banc peut être connecté soit au réseau d'EdF (en arrière du contacteur KM1), soit à l'amplificateur de puissance (en arrière du contacteur KM2). Néanmoins, dans tous les exemples présentés par la suite, nous considérons que le banc est connecté à l'amplificateur de puissance. De plus, KM10 reste toujours fermé pour shunter les enroulements du transformateur. Pour d'autres applications, il peut être ouvert. Afin de montrer la flexibilité en terme de connectique de ce banc, nous présentons ci-dessous 4 configurations :

🌀 Connexion d'une machine asynchrone à double alimentation (MASDA)

- le stator branché côté KM4 et le rotor côté KM8 ;
- KM3, KM4, KM5, KM8 fermés ;
- KM6, KM7, KM9, KM11 ouverts.

🌀 Connexion d'une machine asynchrone à cage

- le stator branché côté KM4 ;
- KM4 fermé ;

- KM3, KM5, KM6, KM7, KM8, KM9, KM11 ouverts.

- ☞ Connexion d'une machine synchrone

- le stator branché côté KM8 ;
- KM3, KM5, KM8 fermés ;
- KM4, KM6, KM7, KM9, KM11 ouverts.

- ☞ Configuration SVG (Static VAr Generator)

- une source de tension continue branchée côté KM6 et une charge côté KM4 ;
- KM3, KM4, KM6 fermés ;
- KM5, KM7, KM8, KM9, KM11 ouverts.

En ajoutant à ce banc un simulateur numérique temps-réel, le potentiel des simulations hybrides temps-réel pouvant être réalisées prend toute sa valeur.

3.3. APPLICATION AUX SYSTEMES DE GENERATION EOLIENNE

3.3.1. Contexte de l'éolien

Jusqu'à ces dernières années, l'objectif des génératrices éoliennes était unique : produire de l'électricité en présence de vent. Les projets se sont multipliés et leur connexion au réseau s'est généralisée au niveau du réseau de distribution, réseau non prévu pour une circulation bidirectionnelle d'énergie. Ainsi, certains problèmes ont commencé à apparaître à cause de la multiplication des projets éoliens : détérioration de la qualité de l'énergie, problèmes de plan de tension, protections de découplage, tenue aux creux de tension, etc. Par ailleurs, même le réseau de transport n'est pas indemne, comme par exemple les problèmes de déconnexions massives lors d'un court-circuit [LED 01].

Pour résoudre ces problèmes, des normes ont été rédigées, contraignant les éoliennes à respecter des règles nouvelles, comme par exemple une obligation de tenue aux creux de tension pour certains gabarits de creux. Dans le cadre d'un projet traitant de l'intégration des éoliennes dans les réseaux faibles ou insulaires [LAV 04], des études en simulation ont été menées pour mettre en évidence les possibilités offertes par les trois différentes structures de génératrices éoliennes (présentées dans §3.3.2) pour répondre aux nouveaux critères imposés par les normes.

Parallèlement, un banc expérimental analogique a été développé au laboratoire pour valider certains résultats trouvés en simulation (séquences de fonctionnement, réglage de correcteurs, recherche du point optimal de fonctionnement). Cependant, l'obstacle pour

valider l'ensemble des études concerne la possibilité de recréer des perturbations sur le réseau, comme des creux de tension, des déséquilibres, des harmoniques, etc. La mise en place d'un simulateur temps-réel hybride a permis de résoudre ce problème. Les caractéristiques du schéma hybride conçu seront détaillées par la suite et les premiers résultats seront donnés.

3.3.2. Principaux types de génératrices éoliennes étudiés

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes:

➤ *au niveau de la turbine (rotor)* qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique ;

➤ *au niveau de la génératrice et de son éventuelle interface d'électronique de puissance éventuel* qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

En fonction de la machine utilisée comme génératrice il est possible de différencier trois types de systèmes, chacun avec ses avantages et problématiques :

➤ *Machine asynchrone à cage (MAS) – Système à vitesse fixe (Figure 3.6)*

Appelée aussi « concept danois », elle est simple et robuste. La MAS est connectée directement au réseau, nécessitant la présence d'un convertisseur statique de type gradateur pour limiter le fort appel de courant dû à la magnétisation brutale au moment du couplage. Il faut noter aussi la présence d'un multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice. Le principal avantage de la structure est son faible coût, dû au caractère standard de la machine et à l'absence d'électronique de puissance d'interfaçage. L'inconvénients sont la puissance extraite non optimisée, la maintenance de la boîte de vitesse, l'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur.

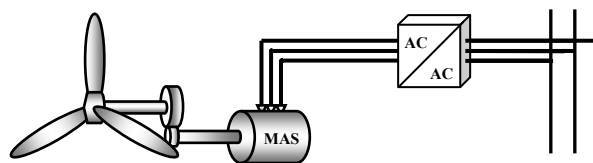


Figure 3.6. Machine asynchrone à cage (MAS)

Ce premier système consiste en un générateur à induction à cage directement connecté au réseau. La fréquence du réseau (et le nombre de pôles) détermine, au glissement près, la vitesse du générateur, ainsi que celle de la turbine. Le multiplicateur permet d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à la fréquence électrique souhaitée. Par conséquent, la vitesse de rotation de la turbine est pratiquement fixée pour n'importe quelle vitesse du vent. C'est pour cette raison que cette structure correspond à un générateur éolien à vitesse fixe. Un générateur asynchrone à cage consomme toujours de la puissance réactive. Cette énergie réactive est indésirable, et est généralement compensée, en partie ou entièrement, par des bancs de condensateurs ou autres compensateurs de réactif.

Certains aspects liés à ce type de structure ont été étudiés en collaboration avec Haizea GAZTAÑAGA ARANTZAMENDI [GAZ 06], [GAZ 07] et seront présentés dans les paragraphes §3.3.5 et §3.3.6.

➤ ***Machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants (MS) – Système à vitesse variable (Figure 3.7)***

La machine utilisée est une machine synchrone spécifique multipolaire permettant de supprimer, ou de réduire, le multiplicateur de vitesse. Comme la fréquence et l'amplitude de la tension délivrée par cette génératrice dépendent de sa vitesse de rotation, une interface d'électronique de puissance est intercalée avant la connexion au réseau. Les avantages de la structure sont le fonctionnement à vitesse de rotation variable sur toute la plage de vitesse du vent, la puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens, la connexion de la machine plus facile à gérer, l'absence de boîte de vitesse. De plus, si les convertisseurs sont surdimensionnés, la machine peut participer aux services système. Le plus grand inconvénient est le prix dû à la spécificité de la machine et au prix de l'électronique de puissance (dimensionnée à 100% de P_n). De plus, la machine comporte un fort diamètre (de l'ordre de 4m à 6m pour 1,5 MW, 10m pour 4,5 MW) du fait du grand nombre de pôles.

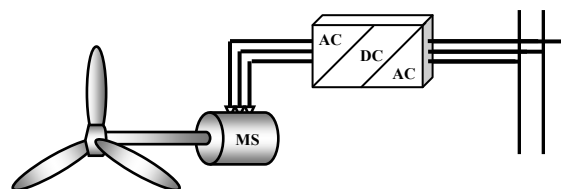


Figure 3.7. Machine synchrone (MS)

Des études ont aussi été effectuées sur ce système, en collaboration avec Ana Maria ANDREICA [AND 06], plus de détails étant présentés dans le paragraphe §3.3.4.

➤ **Machine asynchrone à double alimentation (MASDA) – Système à vitesse variable (variation de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme) (Figure 3.8)**

Dans ce cas-là, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors que l'enroulement rotorique triphasé bobiné avec bagues collectrices est connecté à ce même réseau via une interface d'électronique de puissance. Le multiplicateur de vitesse est présent dans ce cas aussi. Ce système est un compromis entre les deux cas présentés auparavant. Ses principaux avantages sont le fonctionnement à vitesse variable (environ $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme, pour une puissance apparente de l'électronique de puissance égale à 30% de la puissance du générateur), l'optimisation de la puissance extraite pour les vents faibles et moyens. De plus, les prix sont moins élevés par rapport au générateur synchrone car l'électronique de puissance est dimensionnée seulement à 30% de P_n . Les inconvénients sont la maintenance de la boîte de vitesse et le contrôle/commande plus complexe.

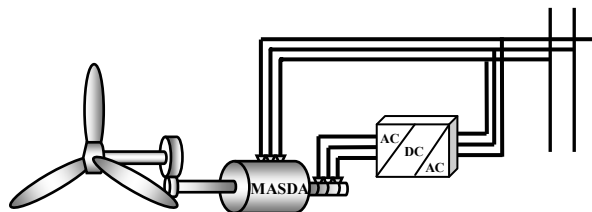


Figure 3.8. Machine asynchrone à double alimentation (MASDA)

Cette architecture a été chronologiquement la première application temps-réel hybride en puissance réalisée à G2Elab [OCN 05] et une première européenne. Les considérations liées à cette étude sont décrites dans le paragraphe §3.3.3, ci-dessous.

Il faut noter que des études ont été réalisées [NICH02], [NICH06], [MOK 06], portant essentiellement sur l'émulation des systèmes de génération éolienne (dans le but de se rapprocher le plus possible du comportement réel) et sur leur contrôle optimal. Néanmoins, ces applications ne portent pas sur l'émulation d'un réseau par un simulateur temps-réel hybride.

3.3.3. Etude d'une structure de type MASDA (Machine ASynchrone à Double Alimentation) [OCN 05][GOM 05b][LAV 05]

3.3.3.1. Description de la plateforme expérimentale

Le schéma hybride utilisé dans le cadre de cette étude (Figure 3.9) comporte deux parties distinctes :

- le simulateur hybride comportant le simulateur temps-réel ARENE URT et l'interface de puissance (v. § 2.2.4). Un réseau de distribution fonctionnant à 20kV a été modélisé sous ARENE URT ;
- le banc éolien comportant un générateur éolien (MASDA) entraîné par une machine à courant continu en régime moteur (MCC) modélisant la turbine.

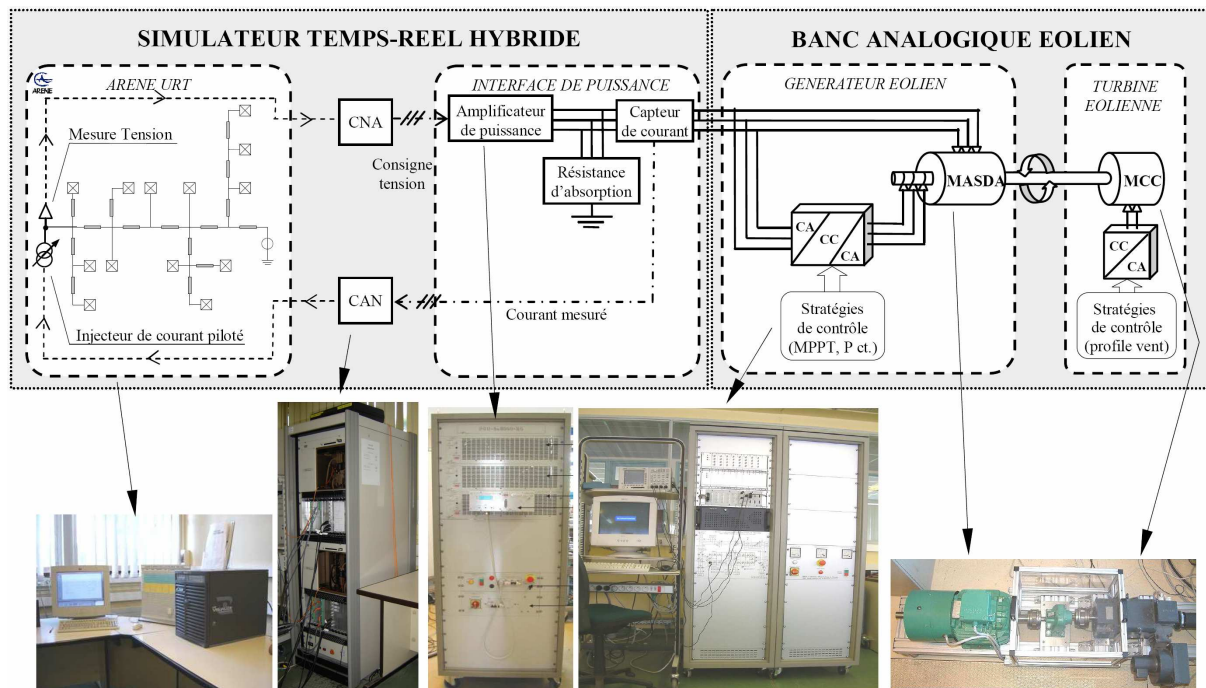


Figure 3.9. Schéma de la connexion hybride pour application éolienne MASDA

Le réseau simulé

Le réseau de distribution utilisé est le réseau GIE IDEA (HTFD_IDEA04) qui a été modifié pour nos besoins (en terme de puissance de calcul d'ARENE URT). Le réseau fonctionne sous 20kV et comporte : 1 nœud infini, 15 lignes, 13 charges et l'équivalent de la génératrice éolienne (Figure 3.10).

Les lignes sont modélisées par des impédances de type RL. Les paramètres ont été choisis à partir de la référence [MAR 01] en considérant que chaque tronçon a une longueur de 5km. Les valeurs utilisées sont par ailleurs : $R_{lig} = 1\Omega$ et $L_{lig} = 12mH$. Les charges sont également de type RL, avec : $R_{ch} = 800\Omega$ et $L_{ch} = 1274mH$ (chaque charge a une puissance d'environ 0,4MW). Le générateur éolien est émulé par un injecteur de courant (v. § 2.2.5). Une méthode simple pour obtenir des perturbations réseau (creux de tension, variation de fréquence, etc.) est de piloter la source de tension modélisant le nœud infini.

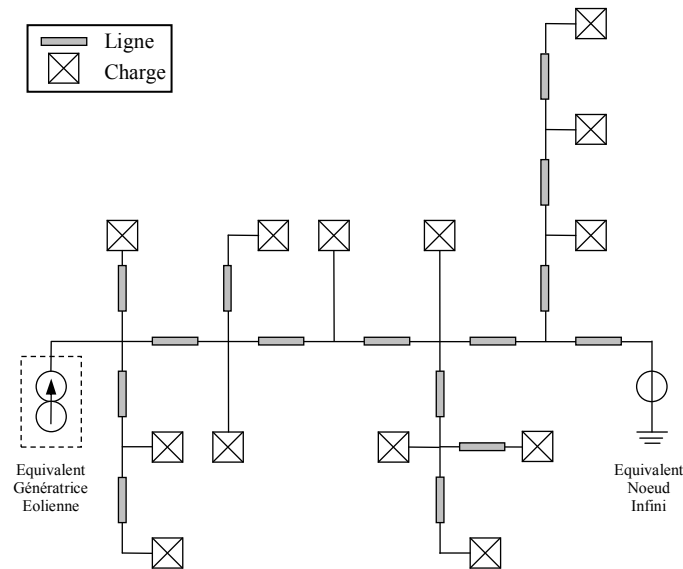


Figure 3.10. Réseau utilisé pour essais MASDA

➤ *L'interface de puissance*

Les éléments de l'interface de puissance ont été décrits plus haut dans ce chapitre. En plus de l'amplificateur de puissance et du capteur de courant, et afin de palier les éventuelles limitations de capacité de dissipation de l'amplificateur, une résistance d'absorption est utilisée (Figure 3.9).

➤ *Le banc analogique éolien*

Le banc d'essais de génération éolienne constituant la partie analogique, a été mis en place et validé au laboratoire avant le début de ce projet. Il comporte une machine à courant continu (MCC) en régime moteur qui aura pour rôle de reproduire le couple éolien et une machine asynchrone à double alimentation (MASDA) en régime génératrice qui représentera le générateur éolien. Chaque machine dispose d'une baie de puissance avec ses propres asservissements (Figure 3.11).

La puissance développée au niveau de la turbine se traduit par un couple éolien Γ_T sur l'arbre de transmission, ramené normalement à l'arbre de la génératrice, mais ici au réducteur physique. Ce couple est généré par une machine à courant continu, commandée en courant par un hacheur 4 quadrants. Le schéma général de contrôle est donné par la Figure 3.12, où on peut remarquer :

- ⚡ L'étage de génération du couple éolien par DSP
- ⚡ L'étage d'adaptation des gains (de couple et de vitesse) pour passer d'une turbine modélisée de 1.5MW à la puissance du banc (6.4kW)

🔄 La MCC pilotée en courant par un hacheur 4 quadrants.



Figure 3.11. Présentation du banc analogique éolien MASDA

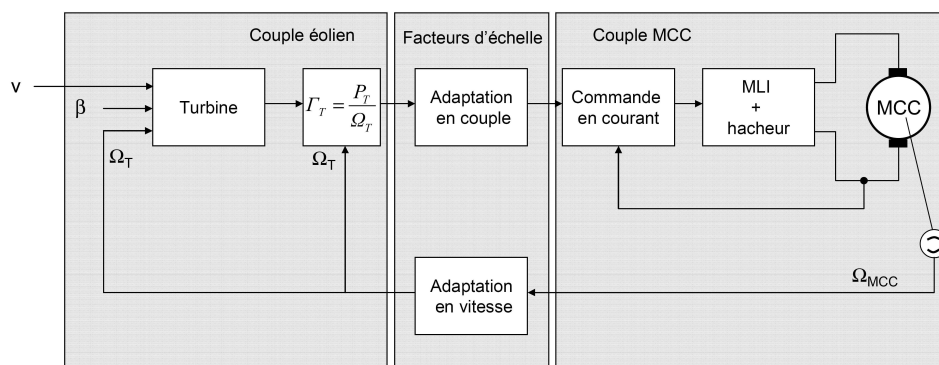


Figure 3.12. Pilotage de la MCC en couple éolien

Côté MASDA, la baie de puissance afférente est constituée par la baie d'électronique de puissance présentée auparavant, dans la *Figure 3.4*. En terme de configuration détaillée du synoptique, elle est présentée dans le même paragraphe (§3.2.2) et peut être visualisée dans la *Figure 3.5*. L'amplificateur est connecté avant le disjoncteur KM2. Le passage de la configuration antérieure du schéma (liaison directe au réseau d'EdF) à celle désirée pour cette application se fait simplement par l'ouverture de KM1 et la fermeture de KM2.

Le générateur éolien fonctionne à une tension de 140V entre phase et neutre. La tension de sortie de l'amplificateur peut aller jusqu'à 180V, il est donc tout à fait possible de connecter ces deux éléments entre eux.

3.3.3.2. Résultats expérimentaux

L'amplificateur de puissance étant relativement limité en absorption par rapport à la puissance de l'éolienne testée, les essais réalisés ont été effectués avec une puissance active générée par l'éolienne, réduite (3,7kW).

A cause de cette limitation en puissance active absorbée par l'amplificateur, la partie réactive du courant qui est absorbée par l'éolienne pour la magnétisation de la MASDA est plus élevée que le courant actif fourni au réseau, ce qui n'est pas classiquement le fonctionnement réel de ce système éolien. Toutefois, la machine asynchrone à double alimentation permet de magnétiser le stator par le rotor, ainsi une diminution de la puissance réactive fournie par l'amplificateur est possible mais cela n'a pas été réalisé dans les essais présentés ci-dessous.

➤ *Fonctionnement de l'éolienne avec vent variable*

Les conditions de l'essai sont les suivantes :

- Amplitude de la tension au nœud de connexion constante ;
- Fréquence de la tension au nœud de connexion constante ;
- Vitesse du vent variable, avec une valeur moyenne d'environ 7m/s.

Sur la *Figure 3.13* a été représenté un exemple de résultats de cet essai. La courbe rouge représente le vent. En gris a été illustré le courant injecté au réseau par le générateur équivalent (l'injecteur de courant).

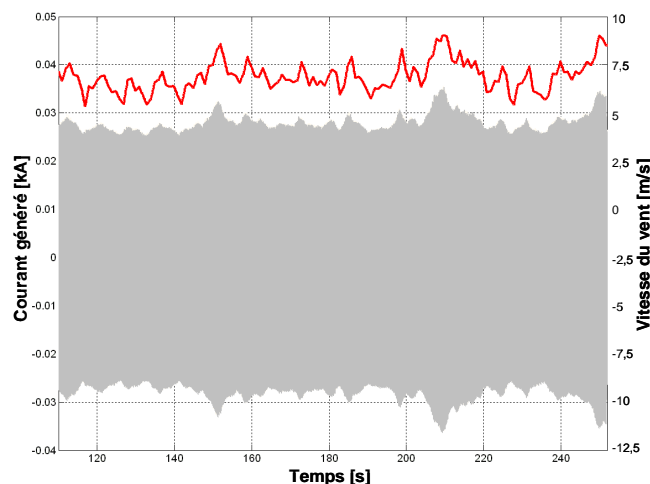


Figure 3.13. Comportement du système temps-réel hybride pour un vent variable

Le courant sinusoïdal généré suit parfaitement le profil du vent. Ce comportement s'explique par le fait qu'un algorithme permettant d'extraire la puissance maximum du vent (algorithme MPPT « Maximum Power Point Tracking » [SPE 94]) a été utilisé pour piloter les asservissements en courants de la génératrice. Cet algorithme est favorable du point de vue du producteur (car il génère la puissance maximum possible) mais n'est pas favorable du point de vue du réseau (car la fluctuation de puissance reste relativement importante).

Il faut noter que dans le cas de cette application, le réseau émulé n'est pas exploité car la tension réseau est maintenue constante en amplitude et fréquence. Néanmoins, comme le profil du vent impose le couple de la machine à courant continu, les résultats montrent comment le réseau « virtuel » voit les variations qui se produisent sur la partie analogique.

➤ *Creux de tension côté réseau*

Les conditions de l'essai sont les suivantes : amplitude de la tension au nœud de connexion variable (profondeur : 30%, moment d'apparition : $t = 180s$, durée : 20s) ; fréquence de la tension au nœud de connexion constante ; vitesse du vent constante.

Sur la *Figure 3.14* ont été représentées les courbes de tension au nœud de connexion et celles du courant généré.

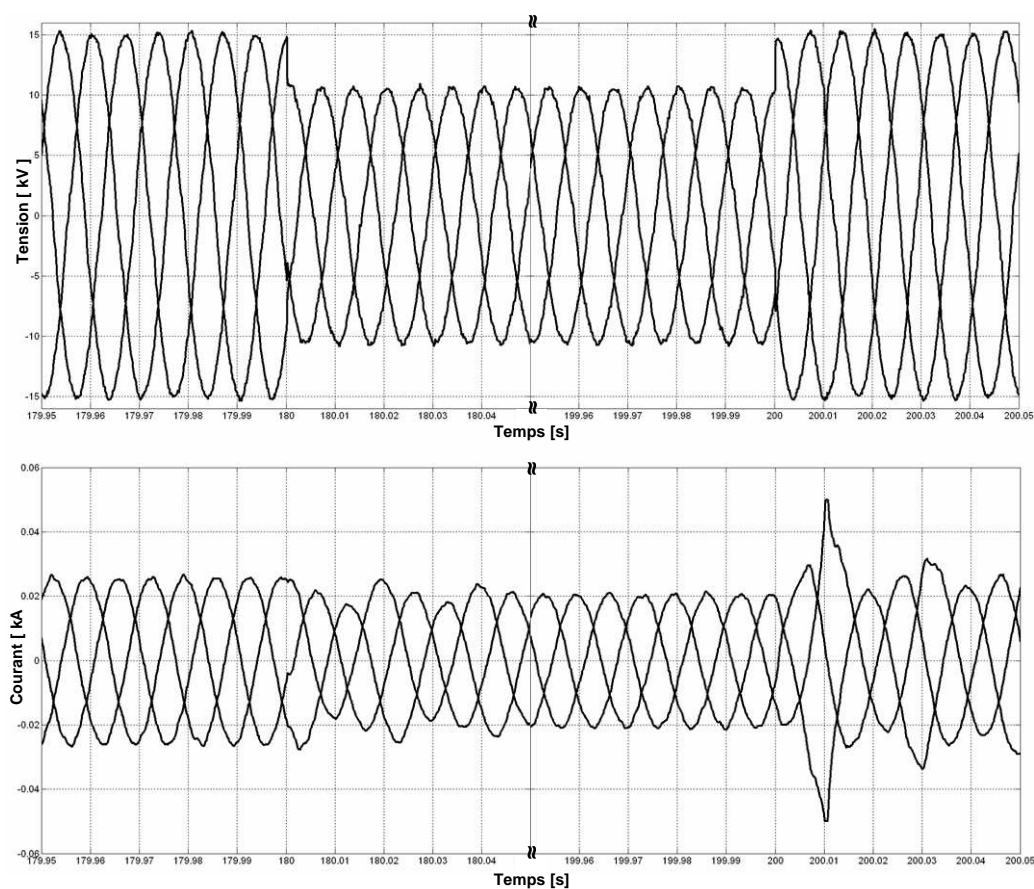


Figure 3.14. Comportement du système temps-réel hybride pendant un creux de tension

Le graphique comporte une césure de l'axe des abscisses afin de mieux observer les formes d'ondes dans la proximité des deux transitoires (la décroissance de la tension à 180s et la croissance à 200s).

La figure précédente montre que la décroissance de tension cause aussi une décroissance de courant. Dans le fonctionnement classique du système, un creux de tension implique habituellement une augmentation de courant. Afin de mieux en comprendre la cause une transformation de Park a été réalisée sur le courant (Figure 3.15).

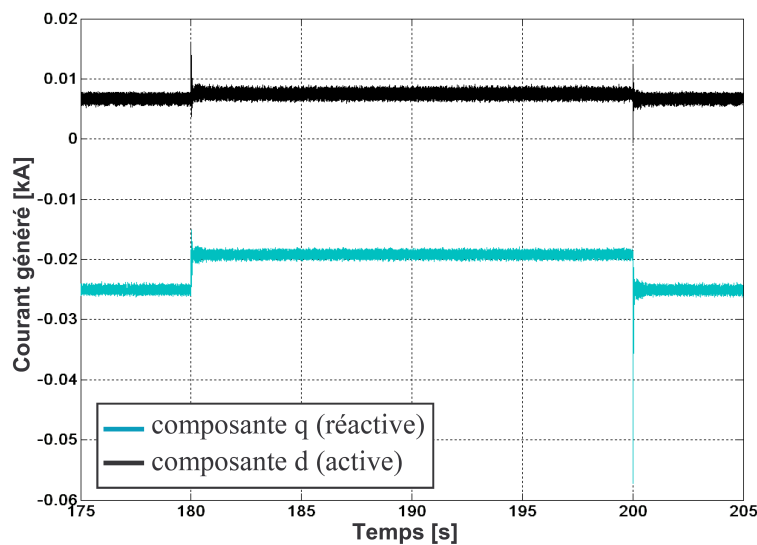


Figure 3.15. Décomposition de Park du courant généré par MASDA

Dans les applications présentées dans ce paragraphe, les asservissements de la MASDA sont conçus pour maintenir une puissance active injectée dans le réseau constante. Ainsi quand la tension du réseau diminue, le système éolien a tendance à augmenter la quantité de courant actif produit pour compenser la diminution de puissance active qui en résulte.

La diminution de la tension aux bornes de la MASDA a comme effet de diminuer sa magnétisation et donc de diminuer la quantité de courant réactif qu'elle absorbe. Pour l'application considérée, la quantité de courant réactif est bien plus importante que la quantité de courant actif. Ainsi, la baisse de tension provoque dans l'ensemble, une diminution significative du courant car touchant la partie réactive. Dans les applications classiques, la puissance active injectée devrait être bien plus importante que la puissance réactive absorbée. Ainsi, le courant dans son ensemble devrait augmenter.

Le pic de courant important qui apparaît sur la *Figure 3.14* à l’instant de la fin du creux de tension est dû à la re-magnétisation de la MASDA.

➤ *Variation de fréquence côté réseau*

Les conditions de l’essai sont les suivantes : amplitude de la tension au nœud de connexion constante ; fréquence de la tension au nœud de connexion variable (profondeur : 4%, moment d’apparition : $t = 180s$, durée : 20s) ; vitesse du vent constante.

La marge habituelle dans laquelle peut varier la fréquence sur les réseaux réels est seulement de 1% [ANN 99]. Un creux de 4% a été adopté dans cet essai afin de pouvoir observer un changement de point de fonctionnement plus prononcé (pour des variations plus petites aucune modification n’a été visible).

Compte tenu des bonnes performances des asservissements utilisés [LAV 05], la vitesse de rotation de la machine n’a pratiquement pas varié. Seule a changé la valeur du courant (*Figure 3.16*). Côté rotor, à cause de la présence du convertisseur, la variation de la fréquence n’engendre pas de perturbations. Par ailleurs, la faible variation de courant vient du côté stator, où une modification de la fréquence réseau provoque une modification du glissement et conduit à une faible variation de puissance active.

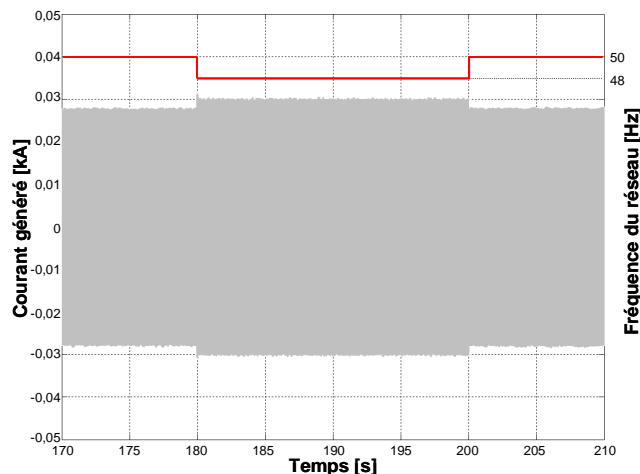


Figure 3.16. Comportement du système hybride temps-réel pendant une variation de fréquence.

Ces deux derniers essais (creux de tension et creux de fréquence) montrent comment l’éolienne réagit face aux perturbations du réseau émulé. Le comportement du système éolien est bien visible en regardant le courant injecté, soit à l’intérieur du simulateur via les graphiques, soit à l’extérieur grâce à des mesures directes sur la machine.

3.3.4. Etude d'une structure de type MS (Machine Synchrone) [AND 06]

3.3.4.1. Description de la plateforme expérimentale

Cette application est basée sur la même plateforme temps-réel hybride utilisée dans le cadre de l'étude précédente. Par conséquent, la structure de base de ce deuxième exemple est quasiment identique, comme nous pouvons le remarquer dans la Figure 3.17.

Néanmoins, des différences apparaissent lorsque nous entrons plus dans le détail au niveau de l'interface de puissance et du banc analogique. Ainsi, la résistance de dissipation n'est plus présente (puissance transitée entre les deux parties est d'environ 1,5kW) et la configuration de la baie afférente MS est modifiée, suite aux particularités de ce type de machine (stator connecté au réseau via une interface d'électronique de puissance, v. §3.3.2).

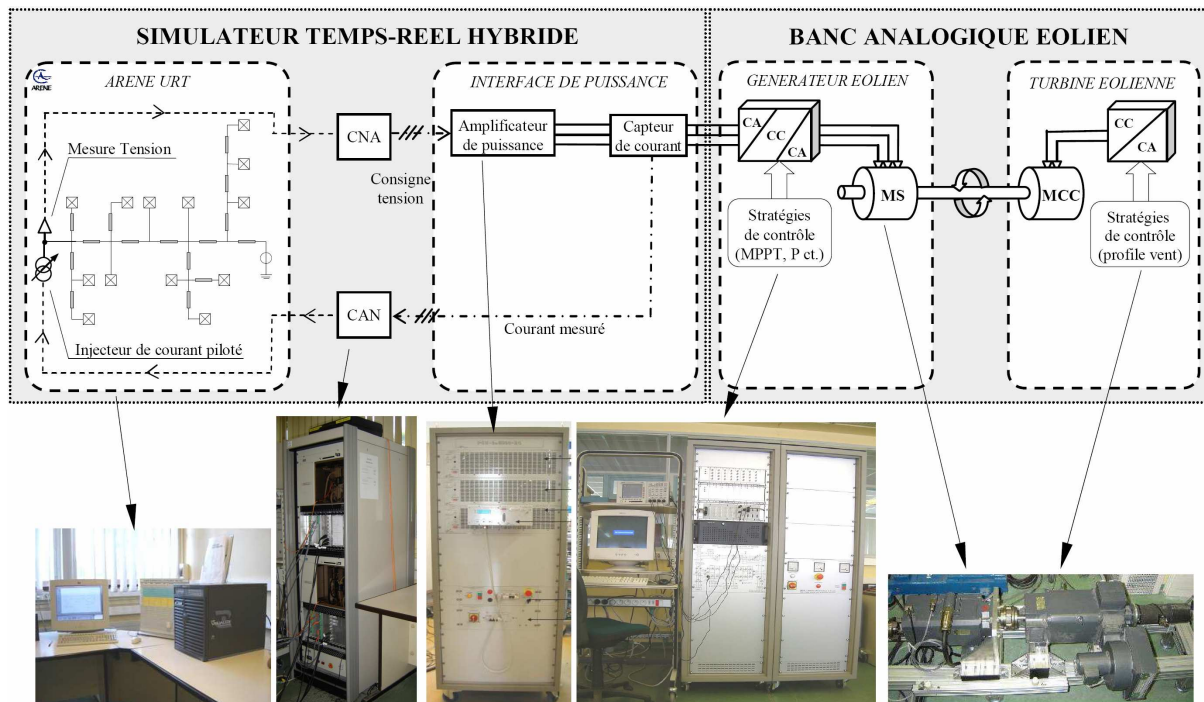


Figure 3.17. Schéma de la connexion hybride pour application éolienne MS

3.3.4.2. Résultats expérimentaux

La tenue aux creux de tension représente le plus sévère des défauts pouvant affecter un générateur éolien, ceci se soldant souvent par un arrêt complet. Nous proposons là une loi de commande à même de garantir (dans les limites physiques de tenue en courant de l'aérogénérateur) une continuité de service pendant et après le défaut.

Il existe différents gabarits de tension que les génératrices éoliennes doivent tenir avec des profondeurs pour le creux qui vont de $70\% \cdot U_n$ jusqu'à $0\% \cdot U_n$ (chute totale de la tension nominale U_n) [LAV 05]. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi un creux de $50\% \cdot U_n$ pour une durée de 2 secondes.

Pour un bon contrôle dans ces conditions, nous avons choisi une stratégie basée sur le principe de la dissipation de l'énergie produite par la turbine pendant le défaut par une résistance de dissipation. Ceci permet de rendre le défaut obsolète pour la génératrice. L'idée est d'insérer une résistance de dissipation sur le bus continu (en arrière des contacteurs KM6 sur la *Figure 3.5*) afin d'évacuer l'énergie provenant de la turbine lors du creux de tension. Cela permettra de ne pas décharger la turbine et de ne pas avoir une augmentation de la vitesse. L'excédent de puissance ΔP à dissiper (dépendant de la profondeur du creux de tension) est contrôlé en courant. La *Figure 3.18* présente la loi de la commande implantée.

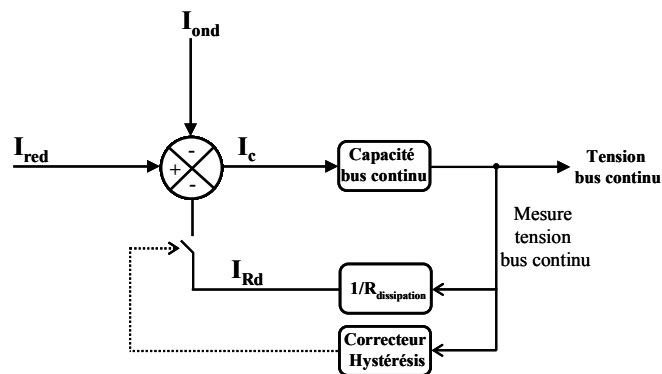


Figure 3.18. Loi de commande pour la dissipation (crowbar)

En effet, nous contrôlons le courant dans la résistance de dissipation en jouant sur un interrupteur commandable, géré par le correcteur à hystérésis qui a comme rôle de maintenir constante la tension du bus continu. Le seuil haut du correcteur a été fixé à 570V et le seuil bas à 550V. La résistance de dissipation utilisée vaut 47Ω . De cette façon, par exemple pour un niveau de 500V de la tension du bus continu, nous pourrions dissiper 5.3kW dans la résistance. Par contre, ce correcteur à hystérésis ne doit pas intervenir quand le système fonctionne en régime normal.

De plus, une telle résistance correctement dimensionnée peut aussi servir de résistance de freinage en fonctionnement normal lors de l'arrêt de l'éolienne avant l'intervention des freins mécaniques.

Les conditions de l'essai sont : amplitude de la tension au nœud de connexion variable (creux de profondeur 50%, moment d'apparition $t=120s$, durée : 20s), fréquence de la tension au nœud de connexion constante, vitesse du vent constante (10m/s). Nous avons fait

l'hypothèse du vent constant durant les essais sous creux de tension. Cela est justifié par la durée du creux ($< 3s$).

➔ **Essai sans résistance de dissipation**

La *Figure 3.19* montre l'évolution du courant renvoyé vers le réseau. Il tombe à zéro suite à la déconnexion imposée par les protections. Le système fonctionne encore quelques instants après l'apparition du creux.

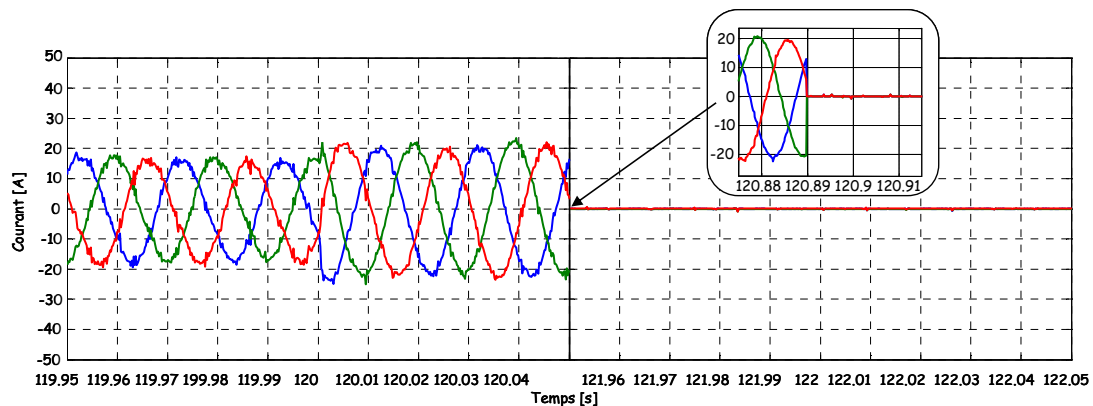


Figure 3.19. Evolution du courant injecté – cas sans R_d

Sur la *Figure 3.20*, nous pouvons remarquer que la vitesse de la génératrice augmente, la machine s'emballe et le niveau de la tension du bus continu est aussi en croissance. Le système de protection intervient et le système est déconnecté du réseau.

Cela montre que l'on ne peut pas espérer avoir un fonctionnement continu de l'éolienne sans la présence d'un module de dissipation ou une autre stratégie qui puisse permettre un comportement stable pendant un creux de tension côté réseau.

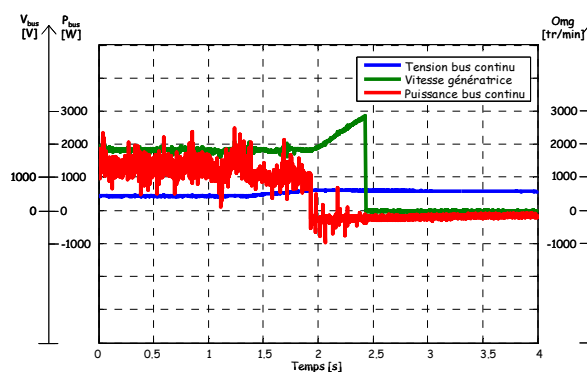
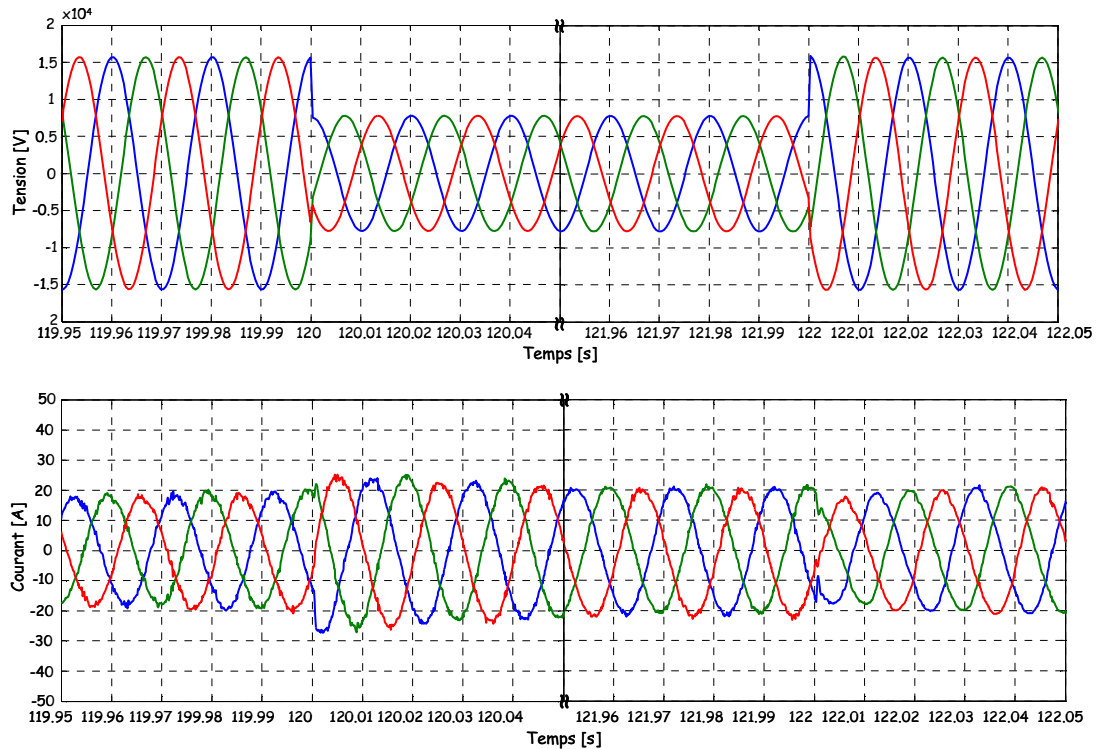


Figure 3.20. Essai sous creux de tension – cas sans R_d

➤ Essai avec insertion de résistance de dissipation

Nous pouvons remarquer sur la *Figure 3.21*, l'augmentation du courant entraînée par la décroissance de la tension. Cette augmentation peut être expliquée par les régulations, qui sont conçues de manière à garder une puissance injectée vers le réseau constante.



*Figure 3.21. Evolution de la tension au nœud de raccordement au réseau et du courant généré
– cas avec R_d*

Comme nous pouvons l'observer dans la *Figure 3.22*, la résistance de dissipation rentre en jeu au moment où le creux apparaît.

Le courant dans cette résistance I_{R_d} est nul avant le creux et égal à douze ampères pendant le creux. La régulation au niveau du bus continu fonctionne proprement : on voit que la tension V_{bus} est maintenue proche de sa valeur de consigne. L'excédent de puissance P_{bus} est dissipé dans la résistance R_d . Les pics de courant qu'on voit sur la courbe de I_{R_d} correspondent aux moments où la résistance de dissipation rentre en jeu. La vitesse de la génératrice n'est pas affectée par le défaut, ce qui confirme que la génératrice ne voit pas le défaut. De ce fait, aucune variation de grandeur n'est susceptible de provoquer l'intervention des protections pour découpler la génératrice.

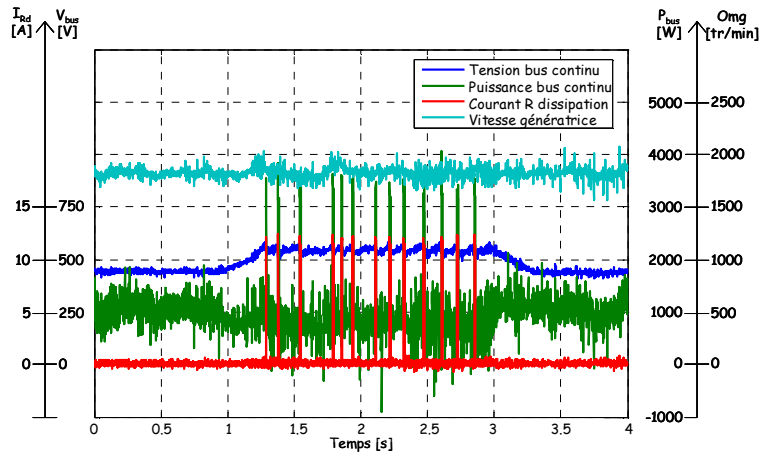


Figure 3.22. Essai sous creux de tension – cas avec R_d

Les résultats obtenus lors de cette étude sont très importants. Ils montrent clairement que cette structure à base de machine synchrone, avec insertion d'une résistance de dissipation, permet un comportement idéal car il est possible de « découpler » totalement le fonctionnement du générateur du fonctionnement du réseau. La continuité des services est assurée : le comportement de l'ensemble pendant le creux de tension reste stable, et après le défaut le fonctionnement reprend dans de bonnes conditions.

3.3.5. Aide à la reprise au vol des systèmes à base de MAS (Machine ASynchrone) par un système de soutien shunt (STATCOM) [GAZ 07]

La solution proposée se situe dans le contexte des nouvelles contraintes d'interconnexion des parcs éoliens. Deux de ces contraintes sont la participation dans le contrôle de la puissance réactive en condition d'opération normale et la capacité de récupération face aux défauts. Le parc éolien considéré est constitué d'aérogénérateurs à vitesse fixe (à base de machine asynchrone, v. §3.3.2) dont la seule fonction est d'exporter de l'énergie électrique au réseau en fonction de la disponibilité du vent. On incorpore un système de soutien, dans le premier cas un STATCOM, à cette installation pour étendre les fonctionnalités du microréseau aux contraintes d'interconnexion établies par l'opérateur du système (pour les pays avec une pénétration majeure de cette technologie).

Le STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) est un dispositif à base d'électronique de puissance utilisé comme compensateur shunt. Ce type de dispositif sert essentiellement à absorber les perturbations venants de diverses charges et/ou génératrices, évitant ainsi de perturber la tension du réseau. Si le compensateur est basé sur des éléments passifs commutés, il peut servir à régler la tension au noeud de raccordement par

l'absorption/génération des courants réactifs. S'il est basé sur un onduleur de tension, en plus de ces fonctionnalités, il peut également être utilisé comme filtre actif car il peut faire office de source de courant contrôlée. Le STATCOM est la solution la plus répandue pour contrôler la puissance réactive échangée avec le réseau et améliorer la réponse transitoire face aux défauts des parcs éoliens à vitesse fixe.

La structure physique et de contrôle d'un STATCOM est montrée dans la *Figure 3.23*. Les STATCOM sont raccordés au réseau à travers un filtre inductif et injectent un courant contrôlé dans le système, afin de régler la tension au noeud de raccordement et/ou de compenser la puissance réactive d'une charge/générateur.

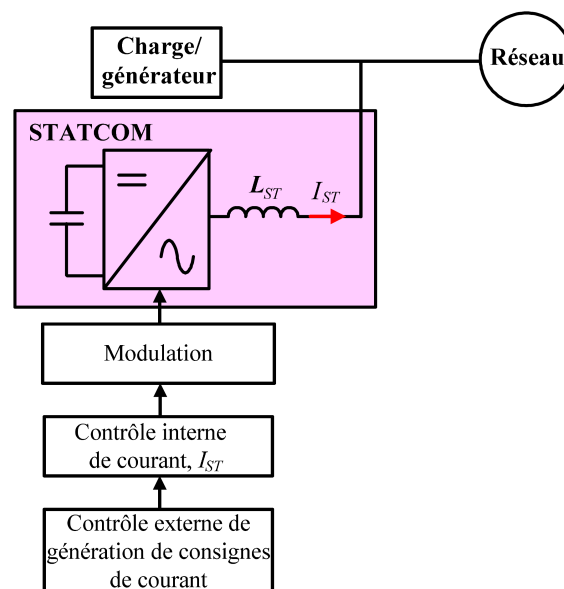


Figure 3.23. Structure physique et de contrôle d'un STATCOM

De manière générale, la structure de contrôle d'un STATCOM est constituée d'une double boucle de contrôle : une boucle interne de contrôle de courant et une boucle externe de génération de consigne de courant. La boucle de contrôle de courant interne calcule les tensions de référence pour la modulation, qui à son tour calcule les signaux d'ouverture et de fermeture des interrupteurs. La boucle externe de contrôle calcule la référence de courant pour contrôler l'échange de puissance réactive avec le réseau. Pour y parvenir, il existe deux principales stratégies liées : le contrôle du facteur de puissance et le contrôle de tension au nœud de raccordement. D'une part, le contrôle du facteur de puissance ajuste la puissance réactive à échanger afin d'obtenir le facteur de puissance désiré au point de raccordement. D'autre part, le contrôle de tension consiste à injecter/absorber de la puissance réactive pour maintenir la tension au point de raccordement à une valeur de référence.

3.3.5.1. Description de la plateforme expérimentale

Le schéma hybride utilisé dans le cadre de l'étude (*Figure 3.24*) comporte les deux parties déjà habituelles :

- Le simulateur hybride comportant le simulateur temps-réel numérique, ARENE URT, et l'interface de puissance
- La partie analogique constituée par le prototype de STATCOM à échelle réduite, comportant l'onduleur de puissance connecté à l'amplificateur via un filtre inductif, ainsi que sa commande interne et sa commande externe pour le régime de défaut.

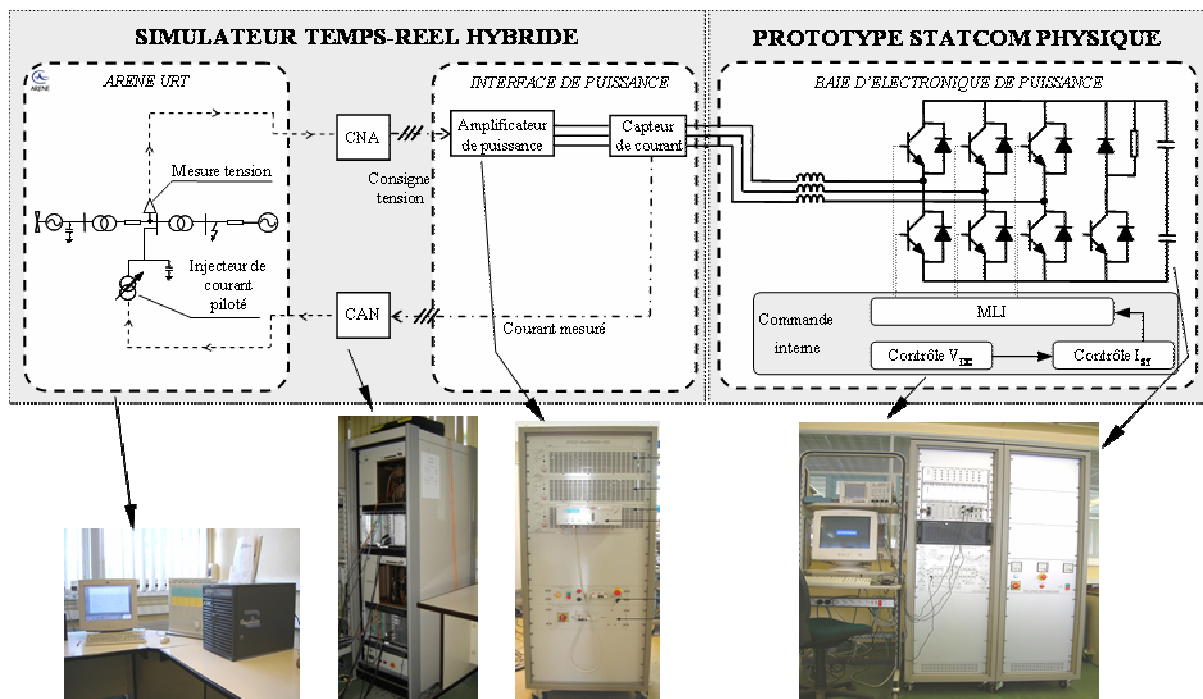


Figure 3.24. Schéma de la connexion hybride pour application éolienne MAS avec système de soutien shunt

➤ Le réseau simulé

La *Figure 3.25* montre la structure du parc éolien analysé. Il s'agit d'un parc éolien de 36MW constitué de 40 générateurs d'induction à cage de 0,989MVA (0,9MW) chacun. Chaque générateur éolien est connecté au réseau interne de 20 kV du parc éolien à travers un transformateur élévateur 0,69/20kV - 1MVA (TR1). Généralement, le couplage de ce transformateur est triangle/étoile.

Des batteries de condensateurs de correction du facteur de puissance sont connectées aux bornes côté basse tension de chaque générateur éolien. Dans le cas étudié, les condensateurs sont dimensionnés pour le régime de génération maximale.

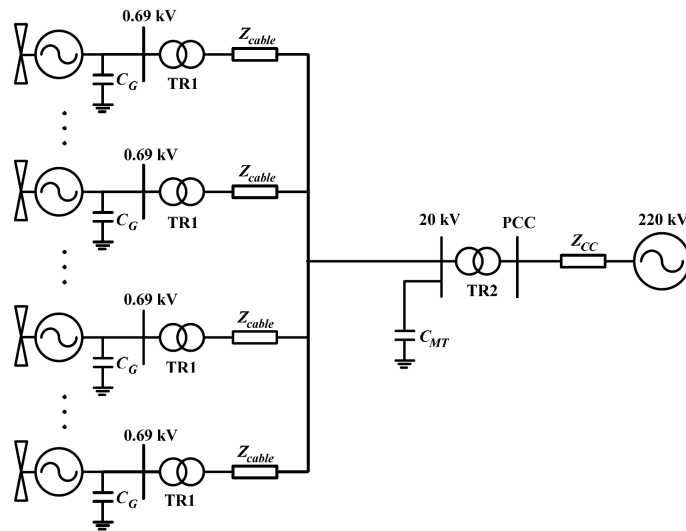


Figure 3.25. Structure du parc éolien analysé

Les turbines éoliennes sont connectées à la sous-station à travers des lignes souterraines de moyenne tension. Pour l'étude, ces câbles sont modélisés avec le modèle en π . Il y a également un banc de compensation de puissance réactive centralisé au niveau MT de la sous-station. Ce condensateur a été calculé pour obtenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion au réseau et à charge maximale.

Finalement, le parc éolien est connecté au réseau de transport à travers un transformateur élévateur de 20/220kV - 40MVA (TR2). La puissance nominale de ce transformateur a été considérée égale à la puissance nominale du parc éolien. Cependant les heures d'utilisation annuelles réelles à puissance nominale d'un parc éolien tournent autour de 30% de disponibilité. Par conséquent, on pourrait choisir un transformateur de puissance inférieure à la puissance nominale du parc éolien sans en diminuer significativement la durée de vie ni atteindre des températures limites [GAL 02]. Généralement, ce transformateur est couplé en étoile/triangle.

La puissance de court-circuit au point de connexion commun est de 800 MVA, qui est vingt fois la puissance apparente du parc éolien. Le standard d'interconnexion est à cet égard respecté.

Néanmoins, suite aux limitations en terme de puissance de calcul d'ARENE URT, un modèle agrégé a été utilisé pour la modélisation du parc éolien mentionné ci-dessus. Etant donné que l'objectif de l'étude est l'analyse d'un groupe de turbines éoliennes plutôt que l'analyse de l'impact de turbines éoliennes prises individuellement, cette approximation n'influence en aucune façon la précision des résultats.

Les modèles agrégés des générateurs éoliens rendent possible la représentation d'un ensemble par un seul modèle qui se comporte comme la somme de tous. Le modèle

équivalent qui représente n générateurs éoliens a les mêmes paramètres en p.u. (unités relatives) mais son dimensionnement en MVA est la somme des puissances apparentes des générateurs éoliens agrégés. Cela diminue significativement la taille du modèle du système à analyser et par conséquent le temps de calcul des simulations. La *Figure 3.26* montre la structure du parc éolien analysé représenté avec son modèle agrégé, pour un parc éolien de 40 turbines.

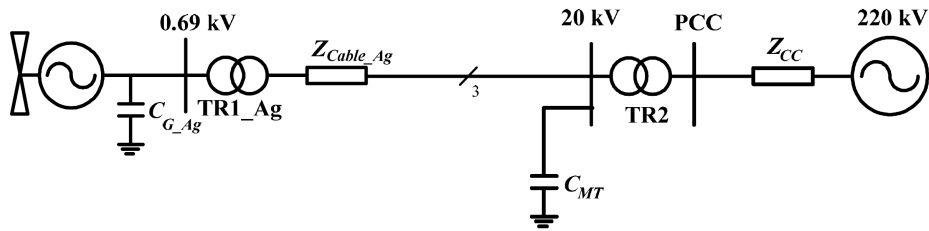


Figure 3.26. Structure du parc éolien analysé avec modèle agrégé

➤ Le banc analogique – le STATCOM physique

Le prototype du STATCOM a été obtenu par la reconfiguration du *Banc Universel pour la Distribution Electrique*, présenté dans le paragraphe §3.2.2 (*Figure 3.5*). La puissance nominale de l'onduleur utilisé est de 10kVA, même si dans l'application retenue, le maximum est de 2,5kVA (dû à la limitation en courant de l'amplificateur de puissance). Le prototype à échelle réduite du STATCOM de 2,5kVA et 180V de sortie émule en effet le fonctionnement d'un STATCOM de 50MVA connecté à 20kV.

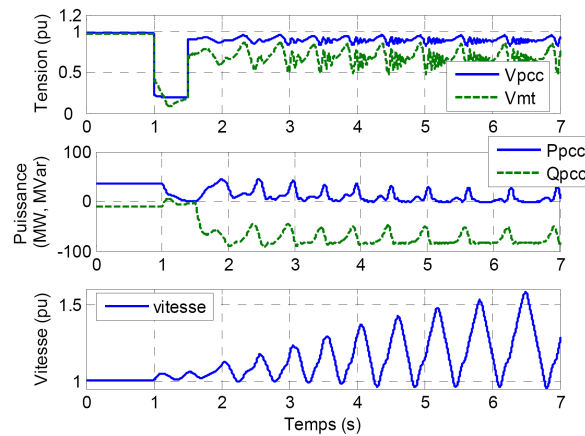
Les paramètres du STATCOM physique testé en temps réel sont montrés dans le *Tableau 3.2*.

PARAMETRE	VALEUR
Inductance du filtre	17 mH
Puissance nominale	10 kVA
Période d'échantillonnage	500 μ s
Fréquence de commutation	2 kHz
Tension du bus	400 V
Capacité du bus	2200 μ F
Tension simple efficace de l'amplificateur	180 V

Tableau 3.2. Paramètres du prototype de STATCOM

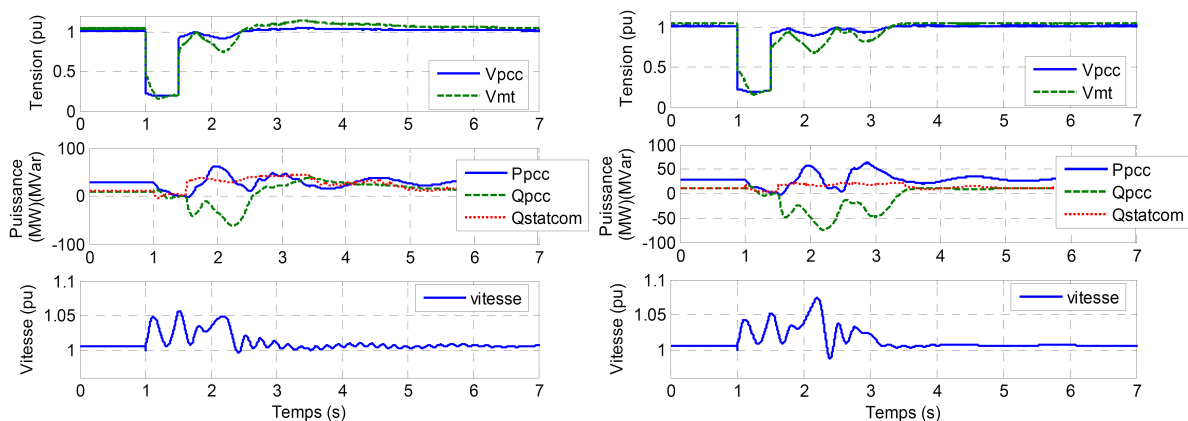
3.3.5.2. Résultats expérimentaux

La *Figure 3.27* montre les résultats obtenus sous ARENE URT lorsqu'il n'y a pas de système de soutien. Le défaut provoqué est un creux de tension de 0,8p.u. de profondeur et de durée 0,5s. Comme nous pouvons l'observer, le parc éolien ne se rétablit pas. Par conséquent, la nécessité d'un système de soutien, démontrée par les simulations hors temps-réel réalisées sur PSCAD/EMTDC [GAZ 06], est validée.



*Figure 3.27. Comportement du système temps-réel hybride pendant un creux de tension
– cas sans système de soutien*

Les résultats présentés dans la *Figure 3.28* valident les conclusions tirées en simulation off line du comportement du STATCOM [GAZ 06].



*Figure 3.28. Comportement du système temps-réel hybride pendant un creux de tension
– cas avec système de soutien shunt contrôlé en facteur de puissance à 0,95 capacitif
sans (gauche) et avec boucle interne de contrôle de tension (droite)*

La *Figure 3.29* montre le courant injecté par le prototype de STATCOM et la tension générée par l'amplificateur de puissance au point de connexion du STATCOM (amplitudes physiques réelles mesurées sur le banc d'essais).

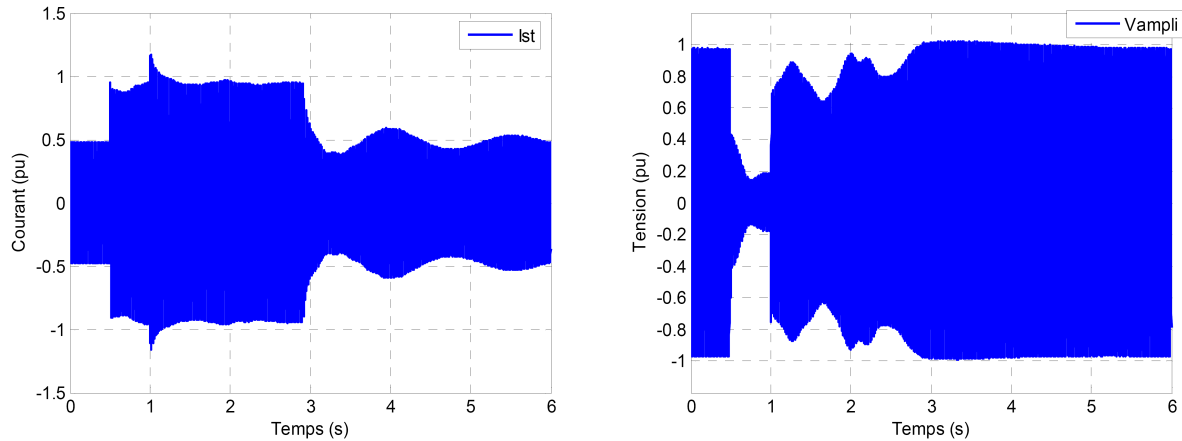


Figure 3.29. Courant injecté par le prototype de STATCOM et tension « réseau »

Les résultats obtenus valident également l'utilisation du prototype à échelle réduite pour représenter le comportement d'un STATCOM à échelle réelle. En effet, les résultats obtenus avec les deux moyens d'analyse sont pratiquement identiques [GAZ 07]. En l'absence d'un parc éolien pour faire les tests « in situ », on peut considérer que les analyses temps-réel hybride sont le moyen de validation à notre disposition le plus proche de l'implantation réelle et le plus flexible.

3.3.6. Aide à la reprise au vol des systèmes à base de MAS (Machine ASynchrone) par un système de soutien série (DVR) [GAZ 06]

Les DVR (Dynamic Voltage Restorer) sont des systèmes basés sur l'électronique de puissance qui protègent la charge des perturbations venant du réseau. Ils injectent une tension en série avec la tension du réseau de façon à maintenir dans ses limites nominales la tension du dispositif à protéger (charge/générateur). La *Figure 3.30* montre la structure physique et de contrôle d'un DVR.

La structure de contrôle d'un DVR est constituée d'une double boucle de contrôle : une boucle externe de génération de consigne de tension et une boucle interne de contrôle de tension. La boucle de contrôle de tension interne calcule les tensions de référence pour la modulation, qui à son tour calcule les signaux d'ouverture et de fermeture des interrupteurs. La boucle externe de contrôle calcule la référence de la tension à injecter en série avec la

tension du réseau. La tension générée par le DVR dépendra de la stratégie de compensation utilisée pour arriver à la tension désirée aux bornes du dispositif à protéger. Il existe deux cas limites de compensation : la compensation à facteur de puissance commun et la compensation réactive pure [ETX 03]. La compensation à facteur de puissance commun consiste à appliquer le facteur de puissance de la charge au compensateur. Avec la compensation réactive pure, cette tension désirée est obtenue sans injection de puissance active de la part du compensateur. Entre ces deux cas limites, on retrouve une infinité de points de travail possibles en fonction du rapport entre les puissances active et réactive délivrées/consommées par le compensateur.

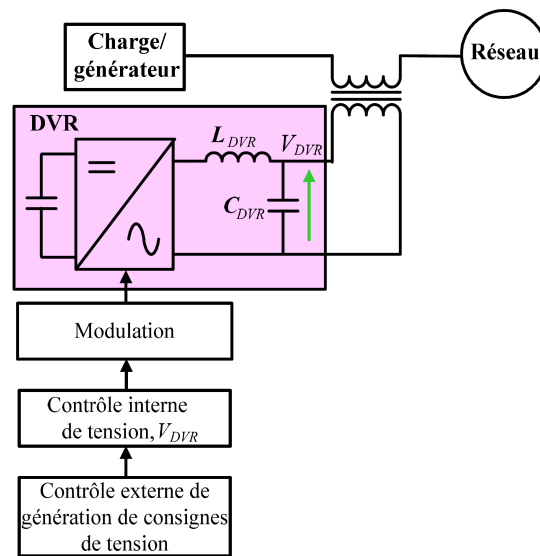


Figure 3.30. Structure physique et de contrôle d'un DVR

3.3.6.1. Description de la plateforme expérimentale

Le schéma hybride utilisé dans le cadre de cette application (*Figure 3.31*) comporte les deux parties déjà décrites dans le cas précédent (§3.3.5) :

- ↻ Le simulateur hybride, comportant le simulateur temps-réel numérique, ARENE URT, et l'interface de puissance. Contrairement aux applications antérieures, où nous avons utilisé des configurations shunt, cette fois l'amplificateur de puissance doit être piloté en courant. Ainsi, l'amplificateur de puissance est commandé en courant de façon à émuler le courant qui transite par le réseau. Pour la fermeture de la boucle temps-réel, nous utilisons des capteurs de tension. Nous n'avons pas utilisé de transformateur et on considère que le DVR injecte directement la tension entre le groupe de turbines éoliennes et le réseau.

La partie analogique constituée par le prototype de DVR à échelle réduite, comportant l'onduleur de puissance connecté à l'amplificateur via un filtre LC ainsi que la commande interne du DVR et la commande externe pour le régime de défaut. Comme dans le cas de l'étude de la machine synchrone (§3.3.4), une résistance d'absorption est ajoutée sur le bus continu de l'onduleur.

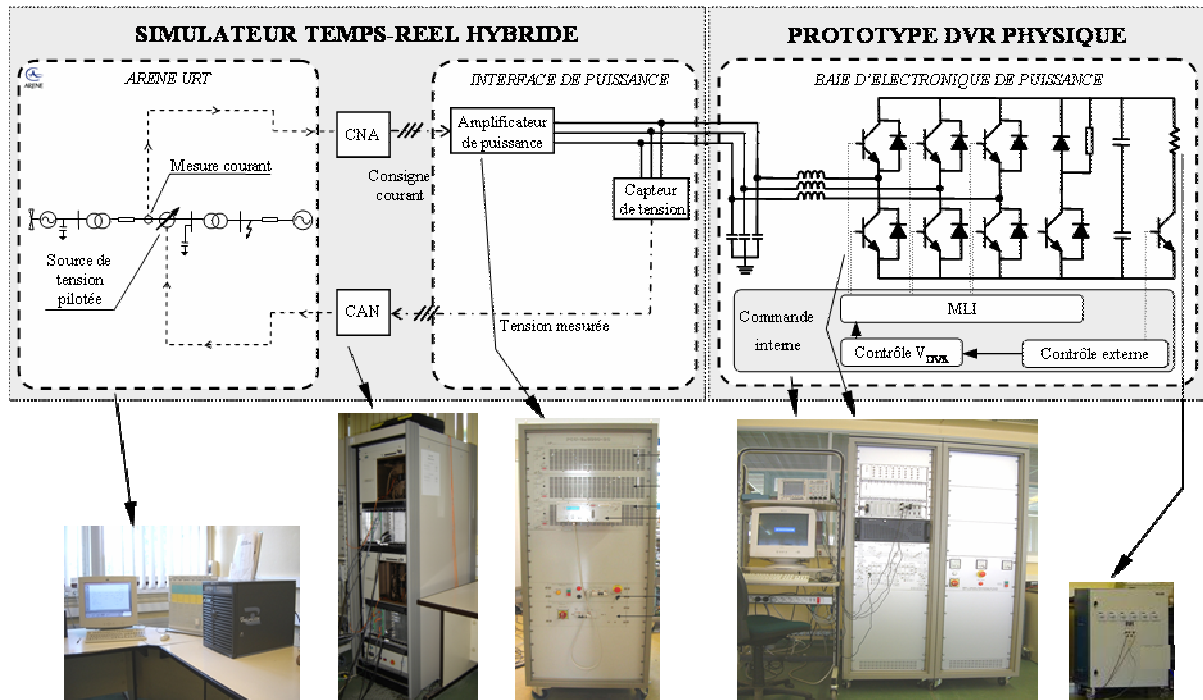


Figure 3.31. Schéma de la connexion hybride pour application éolienne MAS avec système de soutien série

Le réseau simulé

La partie simulée numériquement est quasiment identique à celle utilisée dans l'application STATCOM (§3.3.5.1). Cependant, quelques différences font leur apparition en raison de la connexion série du dispositif analysé. Ainsi, comme décrit dans § 2.2.5, pour le pilotage de l'amplificateur de puissance, la mesure du courant injectée par le parc éolien est nécessaire. Pour obtenir l'équivalent du DVR sur la partie numérique, une source de tension pilotable doit être utilisée.

Cette dernière affirmation pose problème : ARENE URT ne dispose que de sources de tension pilotables connectées à la terre. Il est donc impossible d'utiliser directement un tel modèle pour l'insertion en série avec le reste du réseau simulé. Pour solutionner ce problème, une source de tension peut être remplacée par deux injecteurs de courant et une résistance, comme présenté dans la Figure 3.32.

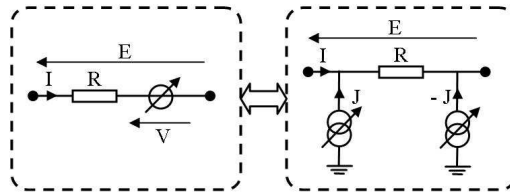


Figure 3.32. Equivalent d'une source de tension série

Afin d'obtenir l'approximation $E \approx R \cdot J$, le courant injecté J doit être beaucoup plus important par rapport au courant I , car la tension injectée est donnée par l'équation 3.1.

$$E = R \cdot (J + I) \quad (\text{eq 3.1})$$

La résistance R modélise la résistance interne de la source de tension et par conséquent sa valeur doit être très réduite par rapport aux autres éléments du schéma électrique. Ce fait, impose, encore une fois, une valeur élevée pour le courant J , afin d'obtenir des injections de tension E significatives.

➤ **Le banc analogique – le DVR physique**

Le prototype du DVR a été obtenu, comme dans le cas précédent, par la reconfiguration du *Banc Universel pour la Distribution Electrique*. Nous avons utilisé le même onduleur que dans le cas de l'application STATCOM, en ajoutant des capacités à ses bornes, afin de fixer la tension (l'amplificateur de puissance est piloté en courant et, par conséquent, la tension sur la partie analogique est fixée par les autres éléments du schéma). Les paramètres du DVR physique sont montrés dans le *Tableau 3.3*.

PARAMETRE	VALEUR
Inductance du filtre LC	3 mH
Capacité du filtre LC	100 μ F
Puissance nominale	10 kVA
Période d'échantillonnage	500 μ s
Fréquence de commutation	2 kHz
Tension du bus DC	400 V
Capacité de bus DC	2200 μ F

Tableau 3.3. Paramètres du prototype de DVR

L'élément de dissipation (crowbar), qui est implémenté au niveau du bus continu, est composé d'une résistance de puissance de 47Ω et $5,3\text{kW}$ et d'un commutateur commandé par hystérésis autour d'une grandeur réglable (550V par défaut), comme dans le cas vu au §3.3.4.1.

Le prototype à échelle réduite du DVR de 2.5 kVA et 180 V de sortie émule le fonctionnement d'un DVR de 35 MVA connecté à 20 kV .

3.3.6.2. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux temps-réel de la *Figure 3.33* valident les principales conclusions tirées des simulations off line [GAZ 06] concernant la contribution d'un DVR. Ces conclusions concernent la réponse transitoire et le régime normal d'un parc éolien à vitesse fixe. En effet, pendant le défaut, le DVR compense le creux de tension et le parc éolien reste protégé des possibles instabilités. En régime normal, il contrôle le facteur de puissance au point PCC à sa valeur de référence (à facteur de puissance unitaire), à condition de ne pas dépasser la plage de tensions tolérable dans le parc [GAZ 07]. Egalement, nous validons la valeur du dimensionnement du DVR nécessaire pour le parc éolien analysé afin d'assurer l'accomplissement des contraintes d'interconnexion. Ainsi le dimensionnement du DVR doit être de 35MVA et il doit être capable d'absorber une puissance active de 30MW pendant le défaut.

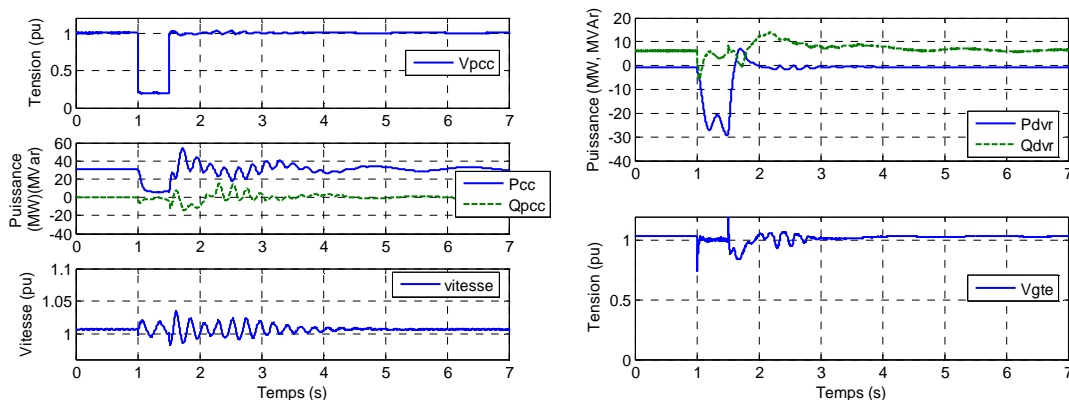


Figure 3.33. Comportement du système temps-réel hybride pendant un creux de tension

– cas avec système de soutien série contrôlé en facteur de puissance unitaire

La *Figure 3.34* montre la tension générée et injectée par le prototype de DVR et l'évolution de la tension du bus continu du DVR (amplitudes physiques réelles mesurées sur le banc d'essais). Sur la courbe de la tension du bus continu, nous observons l'évolution

pendant le défaut. Quand le défaut se produit, le DVR commence à absorber de la puissance active et la tension du bus continu commence à augmenter. Lorsqu'elle dépasse la valeur limite indiquée dans la commande par hystérésis, l'excès de puissance est dissipé dans la résistance de dissipation (crowbar) et la tension du bus diminue. Quand elle arrive à sa valeur limite minimale la branche de la résistance de dissipation est ouverte et la tension commence à augmenter. Ce processus est répété à plusieurs reprises pendant le défaut.

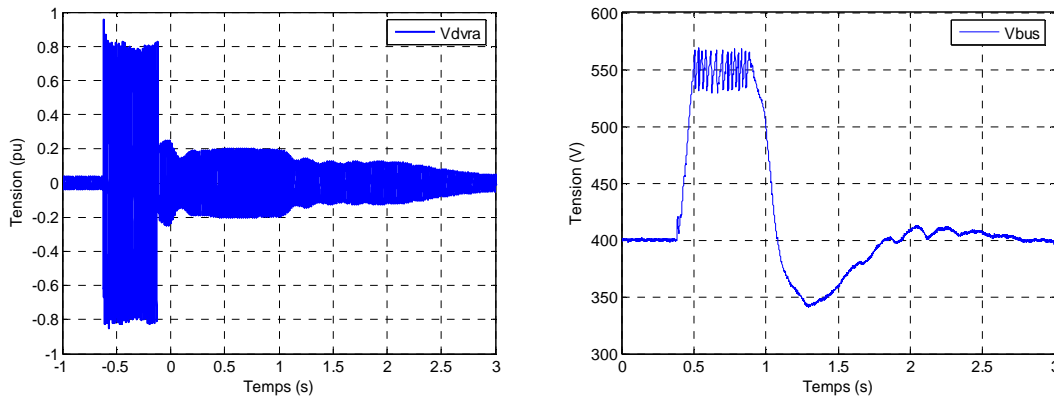


Figure 3.34. Tension injecté par le prototype de DVR et tension du bus continu

3.4. TEST D'ONDULEURS INDUSTRIELS POUR L'INTERFAÇAGE DE GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES [ARN 07]

Parmi les nombreuses sources d'énergies renouvelables, le photovoltaïque (PV) est la plus simple à mettre en œuvre par un utilisateur. En effet, pour produire son énergie, il suffit d'installer des panneaux photovoltaïques, de les connecter au bus continu d'un onduleur, puis de relier la partie alternative de l'onduleur au réseau de distribution. Cependant, l'onduleur doit, d'une part, convertir l'énergie issue des panneaux en une énergie transférable sur le réseau tout en ayant le meilleur rendement possible et, d'autre part, intégrer des systèmes de sécurité.

Hormis les protections à seuils de fréquences et de tensions, les grands groupes de production sont munis d'une protection de découplage. Pourtant, ce dernier système est trop cher pour être implanté dans un dispositif photovoltaïque. C'est pourquoi il est ajouté alors un algorithme supplémentaire (méthode « îlotage ») qui permet soit de déstabiliser le système PV en cas de perte du réseau, soit de calculer un indicateur capable de rendre compte de la perte du réseau. Cette situation est appelée « îlotage ». Le principe de détection et les seuils sont définis, entre autres, par la norme allemande DIN VDE 0126, dont la version d'octobre 1997 est prise comme référence par EDF Réseau Distribution dans son référentiel technique. Le

principe de fonctionnement de la détection d'îlotage mentionné dans cette norme (DIN VDE 0126) est imposé et repose sur les variations de l'impédance du réseau.

C'est dans ce contexte qu'EdF, Schneider Electric et le Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, au sein du Groupement d'Intérêt Economique IDEA (Inventer la Distribution Electrique de l'Avenir), collaborent sur des sujets de recherche liés à l'impact de la production décentralisée. Parmi ces thèmes, un projet traite de « la détection d'îlotage par la méthode du saut d'impédance ». Ce projet a pour but de mettre en avant une méthode de détection d'îlotage, suite à un défaut du réseau de distribution, sur la base de la norme allemande mentionnée auparavant. C'est l'objet du mémoire CNAM de Denis Arnoult [ARN 07b], [ARN 07a], qui consiste, entre autres, à réaliser des essais sur des onduleurs existants du marché. C'est ainsi que nous arrivons à notre collaboration, car pour réaliser ce travail en considérant les onduleurs comme des « boîtes noires », il a été choisi d'utiliser le banc temps-réel hybride.

La *protection additionnelle de découplage* doit détecter toutes les situations pour lesquelles le réseau de distribution se trouve déconnecté d'une partie du réseau au sein duquel un ou plusieurs producteurs décentralisés maintiennent l'alimentation des charges. C'est ce que nous appelons une situation d'îlotage. Cette situation peut résulter d'une opération de maintenance ou d'un défaut. Dans ces conditions, le maintien d'une tension au niveau du point de livraison peut générer des risques pour :

- ⚡ Les équipements électriques lors des dérives importantes de tension ou de fréquence
- ⚡ Les générateurs lors du ré-enclenchement des protections (faux couplage)
- ⚡ Les personnes étant à proximité d'équipements ou lors d'opérations de maintenance.

L'objectif de cette protection est, ainsi :

- ⚡ D'éviter d'alimenter un défaut ou de laisser sous tension une installation en défaut,
- ⚡ D'éviter d'alimenter l'îlot à une tension ou une fréquence anormale,
- ⚡ De permettre les ré-enclenchements automatiques des protections du réseau.

Afin de détecter la perte du réseau et assurer ainsi la protection de découplage, nous avons à notre disposition plusieurs types de méthodes :

- ⚡ *méthodes passives*, qui consistent à étudier les paramètres déjà présents dans le réseau, ce qui n'altère pas sa qualité. Ces méthodes ne dégradent pas la puissance délivrée par l'onduleur. Les protections associées peuvent être : à seuil de tension et de fréquence, à détection d'harmonique de tension, ou à détection du saut de tension.
- ⚡ *méthodes actives*, qui utilisent les mêmes principes que les méthodes passives, mais l'onduleur génère une variation du courant délivré, afin d'identifier un paramètre caractéristique de l'îlot et ainsi détecter l'absence de réseau. Le point faible de ces

méthodes est la possibilité de détérioration de la qualité de l'énergie fournie par l'onduleur. De plus, lors d'une forte pénétration d'onduleurs sur le réseau, il peut y avoir une perturbation entre les différents systèmes de production photovoltaïques.

Comme mentionné ci-dessus, le simulateur temps-réel hybride a été utilisé pour le test d'un panel d'onduleurs représentatifs du marché, qui ont été prêtés par EDF et Schneider Electric. Ces tests ont pour objectif de vérifier que ces onduleurs sont en adéquation avec les obligations du producteur en terme de qualité de l'électricité et de moyen de protection de découplage. La plateforme hybride du G2Elab a permis l'essai de ces onduleurs à 230V, dans des conditions de fonctionnement réelles.

3.4.1. Description de la plateforme expérimentale

Le schéma hybride utilisé dans le cadre de cette application (*Figure 3.35*) comporte les deux parties distinctes maintenant habituelles :

- le simulateur hybride comportant le simulateur temps-réel ARENE URT et l'interface de puissance (v. § 2.2.4). Un réseau à basse tension, fonctionnant à 230V, a été modélisé sous ARENE URT.
- le banc analogique comportant une charge variable ainsi que le système photovoltaïque, composé à son tour d'une source de courant continu (émulant les panneaux) et l'onduleur.

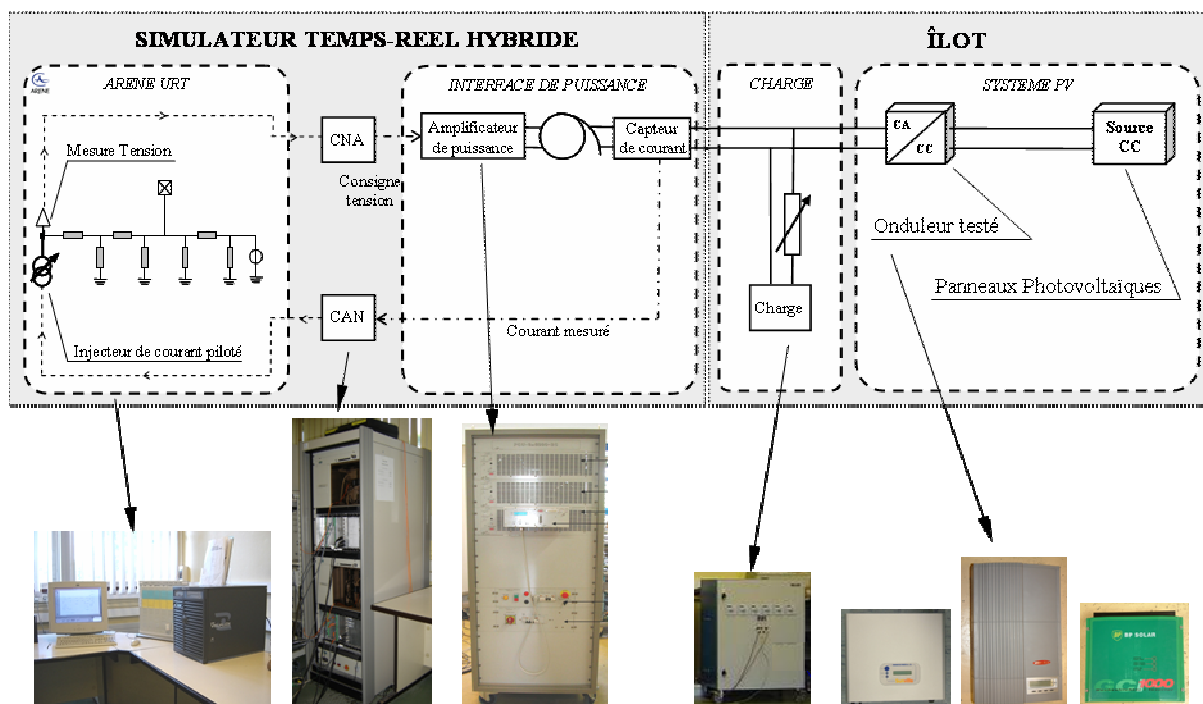


Figure 3.35. Schéma de la connexion hybride pour application test d'onduleurs PV

➤ *Le réseau simulé*

Le réseau utilisé pour les essais d'onduleurs photovoltaïques est présenté dans la *Figure 3.36*. Il modélise en effet un système basse tension et comporte : une source de tension émulant le nœud infini ou le poste source (230V ; 50Hz), deux lignes modélisées en π (0,0438 Ω ; 0,039mH ; 0,005 μ F), un injecteur de courant piloté, équivalant au système de génération PV, ainsi qu'une impédance (en rouge) qui permet de faire varier l'impédance du réseau.

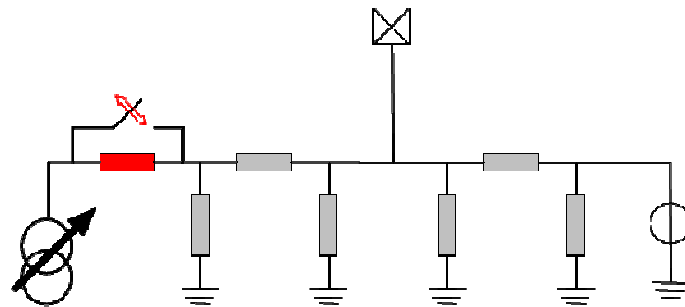


Figure 3.36. Réseau utilisé pour les tests d'onduleurs PV

➤ *L'interface de puissance*

Pour que les conditions d'essai soient réelles, les onduleurs PV doivent être testés sous une tension de 230V monophasée. Comme la tension de sortie entre phase et neutre de l'amplificateur de puissance n'est que de 180V, nous avons inséré un autotransformateur entre l'amplificateur et l'onduleur afin d'arriver à des niveaux de tension compatibles. Le reste de l'interface de puissance est classique (v. §3.2.1).

➤ *Le banc analogique*

Comme nous pouvons remarquer dans la *Figure 3.35*, nous avons ajouté à côté du système PV une charge variable. Ceci peut rendre possible l'obtention d'un équilibre entre la puissance produite par le PV et celle consommée localement, donc d'effectuer des essais en régime d'îlotage.

Les panneaux PV ont été émulsés par une source à courant continu, de 6kW (300V/20A). Il faut noter ici que les caractéristiques courant-tension émulsés en utilisant cette source ne correspondent pas à un vrai système PV (v. § 4.2.6.1.1), mais ils sont simplifiés comme présenté dans la *Figure 3.37*. Cette petite approximation ne dégrade pas les résultats obtenus lors des essais effectués.

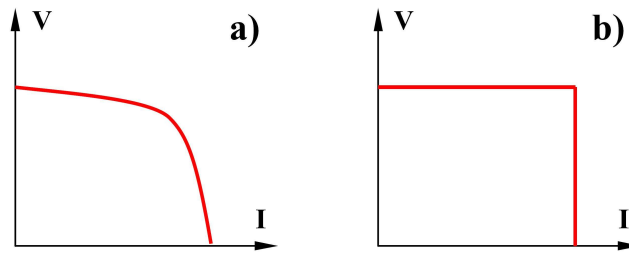


Figure 3.37. Caractéristique I-V : a) réelle et b) simplifiée

3.4.2. Résultats expérimentaux

Lors des tests de caractérisation des onduleurs, plusieurs types d'essais ont été effectués :

- ↻ Variation de l'impédance réseau initial (avant la connexion de l'onduleur). Cet essai permet de connaître la valeur limite d'impédance autorisant la connexion de l'onduleur au réseau.
- ↻ Variation de l'impédance réseau (après la connexion de l'onduleur). Cet essai permet de savoir quelle est la valeur du saut d'impédance pour laquelle nous obtenons le découplage de l'onduleur.
- ↻ Variation temporaire de l'impédance réseau (après la connexion de l'onduleur). De cet essai, nous pourrions constater si le temps rentre en jeu dans la détermination de l'impédance.
- ↻ Variation de la tension (variation lente et rapide). Cet essai permet de trouver la valeur de tension pour laquelle l'onduleur se découple et si cette modification, lente ou rapide, a une incidence sur cette valeur.
- ↻ Variation de la fréquence (variation rapide). Cet essai permet de connaître la valeur des seuils en fréquence.
- ↻ Variation de la tension (variation lente et rapide) et variation de l'impédance réseau. Cet essai représente le cas d'un défaut sur le réseau, i.e. la variation de tension, puis de l'élimination de ce défaut, i.e. la perte d'une partie du réseau. De plus, nous pouvons ainsi savoir si les variations de tension perturbent la mesure d'impédance.
- ↻ Création d'une situation d'îlotage. Dans cet essai, nous devons essayer de maintenir la stabilité de l'îlot, charge et onduleur, le plus longtemps possible.

Dans la *Figure 3.38*, est représenté un exemple de performance d'un onduleur par rapport au découplage, déterminé lors des essais temps-réel hybrides en puissance.

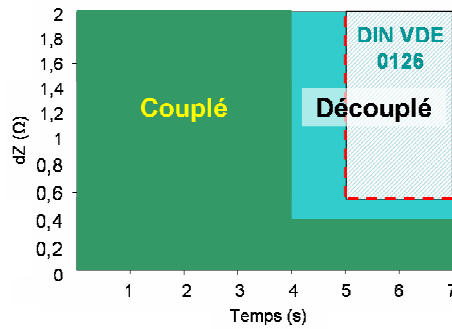


Figure 3.38. Caractéristique de découplage déterminée expérimentalement

Sur ce graphique nous pouvons déterminer si la protection de l'onduleur détecte bien les défauts, en fonction de leur durée et de l'amplitude de la variation d'impédance impliquée. Nous pouvons remarquer que l'onduleur en cause respecte bien la norme DIN VDE 0126, et qu'il est même plus sévère que la norme l'impose.

Si nous regardons maintenant l'allure du courant injecté par un onduleur dans le réseau (Figure 3.39), nous pouvons distinguer toutes les phases lors d'un démarrage. Ainsi, après environ 55s de mise en route, l'onduleur étudie le réseau et essaie de se synchroniser pendant une trentaine de secondes. Ensuite le MPPT (Maximum Power Point Tracking) entre en jeu et essaie d'extraire le maximum de puissance possible, pour arriver enfin à un régime établi.

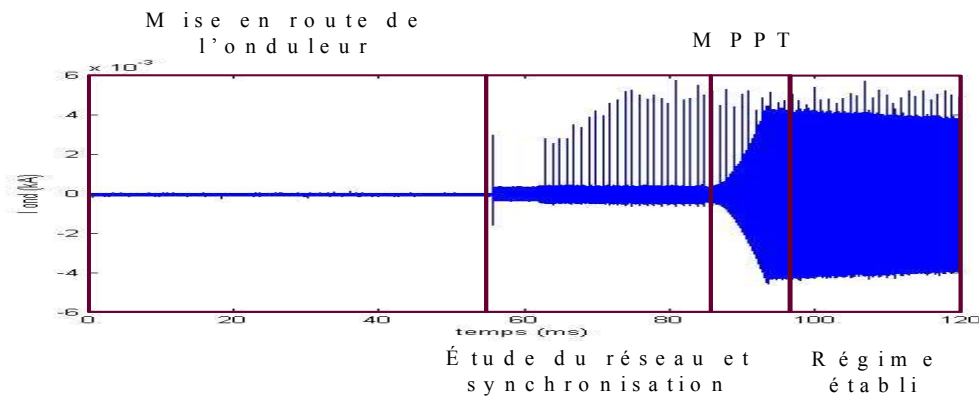


Figure 3.39. Courant injecté par un onduleur lors du démarrage

Un autre élément qui peut être observé dans la figure précédente, est constitué par les piques qui apparaissent avec une amplitude d'environ 5A et une fréquence de 1Hz. Afin de comprendre à quoi correspondent ces perturbations, nous avons zoomé sur cette courbe (Figure 3.40).

Nous constatons ainsi que ces valeurs correspondent à la méthode active de détection de la perte du réseau. L'onduleur injecte ces signaux supplémentaires dans le réseau et analyse sa réponse afin de calculer l'impédance.

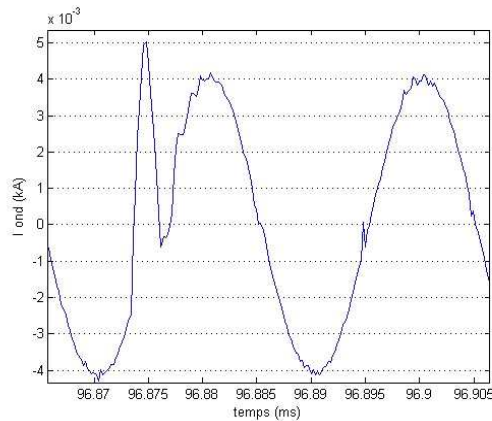


Figure 3.40. Zoom sur le courant injecté par un onduleur

Le banc temps-réel hybride mis en place pour cette application a permis de tester et d'identifier certaines spécificités des quatre onduleurs, tout en les gardant « fermés » (« boîtes noires ») et dans des conditions réelles de fonctionnement. Des essais en variation de fréquence, variation de l'amplitude de la tension du réseau ont été ainsi rendus possibles, ce qui n'est pas possible avec un banc connecté directement au réseau d'EdF.

3.5. CONTROLE DE FLUX DE PUISSANCE PAR COMPENSATION SERIE (DSSSC) [LEP 07]

Cette application, réalisée en collaboration avec Erwan Le Pelleter, porte sur deux autres fonctionnalités de la compensation série. Dans le cadre du paragraphe §3.3.6, nous avons vu l'utilisation d'un système de type DFACTS série pour la compensation de l'énergie réactive et pour l'aide à la reprise au vol des éoliennes à vitesse fixe. Les travaux présentés par la suite, se concentrent sur deux fonctions qui sont le contrôle des flux de puissance et la limitation des courants de court-circuit, assurés à l'aide d'une seule structure. Le système est basé sur l'onduleur de tension pour sa grande propension fonctionnelle. La structure est une structure de type série pour ses capacités en limitation de courant de courts-circuit. Pour le choix de l'architecture interne, il a fallu définir une structure modulaire qui soit la plus économique possible. Ainsi, le choix a été fait d'étudier un FACTS sans transformateur où le système d'EP est connecté par l'intermédiaire de son filtre au réseau. En effet, le transformateur de puissance constitue un coût important à l'achat et en fonctionnement, puisqu'il est la cause de nombreuses pertes. Cependant, cela oblige à utiliser trois structures monophasées puisqu'une structure triphasée ne peut pas être connectée directement au réseau. De plus, le choix est fait d'avoir un système autonome. Ainsi, le système ne dispose pas de génération d'énergie active au moyen d'une source de puissance auxiliaire. De ce fait, le côté continu est composé d'un banc de condensateurs (Figure 3.41).

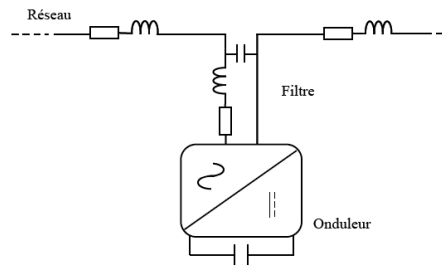


Figure 3.41. Schéma monofilaire de principe du système étudié

Le système DFACTS série, basé sur l'onduleur, et qui est également rencontré dans la littérature [HIG 00] [SON 99] sous le terme DSSSC (pour *Distributed Static Synchronous Series Compensator*), comprend pour sa commande en régime normal :

- Un objectif de contrôle des flux de puissance qui transite à travers la structure ;
- Un sous objectif qui est le contrôle de la tension du bus continu.

Pour le contrôle des flux de puissance, le DSSSC est considéré comme une source de tension alternative en série avec la ligne de connexion et contrôlable à la fois en amplitude et en phase. Nous remarquons deux cas particuliers pour le fonctionnement à puissance active nulle (en négligeant les pertes) selon que la source de tension ainsi créée est en quadrature :

- Arrière par rapport au courant de ligne : le convertisseur est alors l'équivalent à un condensateur qui diminue l'impédance de la ligne ;
- Avant par rapport au courant de ligne : ce qui en fait l'équivalent d'une inductance qui vient se rajouter à l'impédance naturelle de la ligne.

Pour le contrôle de la tension du bus continu, le DSSSC joue le rôle d'une charge ou d'un générateur pour respectivement charger ou décharger le bus continu. En associant les modes de fonctionnement, le DSSSC pourra prendre quatre états différents selon les besoins de la commande. La Figure 3.42 présente, dans le repère fixe synchronisé sur le courant de ligne, la tension injectée sur le réseau (v_s).

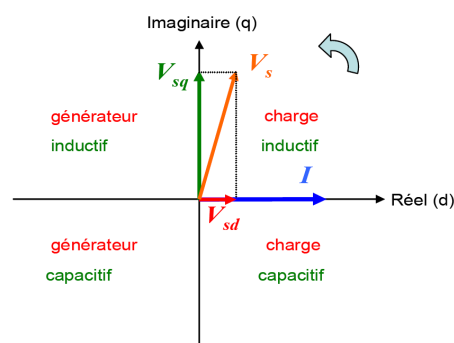


Figure 3.42. Projection de la tension injectée sur le réseau (V_s) et du courant de ligne (I)

Plus de détails sur les stratégies de contrôle/commande peuvent être trouvés dans [LEP 07]. Un des éléments par lesquels ce projet se distingue des autres travaux rencontrés dans la littérature [HIG-00], [GOT-98], est précisément la validation expérimentale des algorithmes proposés. Ces validations ont été effectuées sur la plateforme temps-réel hybride, et seront présentés succinctement par la suite.

3.5.1. Description de la plateforme expérimentale

Le schéma hybride utilisé pour l'application DSSSC (Figure 3.43) comporte deux parties, semblables à l'application de soutien du parc éolien par des dispositifs série type DVR (§3.3.6) :

- le simulateur hybride, comportant le simulateur temps-réel ARENE URT et l'interface de puissance. Une portion de réseau maillé fonctionnant à 20kV, a été modélisé sous ARENE URT. L'amplificateur de puissance est contrôlé en courant, et des capteurs de tension sont utilisés pour la fermeture de la boucle temps-réel.
- le banc analogique, comportant la maquette du DSSSC à échelle réduite avec l'onduleur de tension, un filtre inductif et la commande du système sous dSPACE.

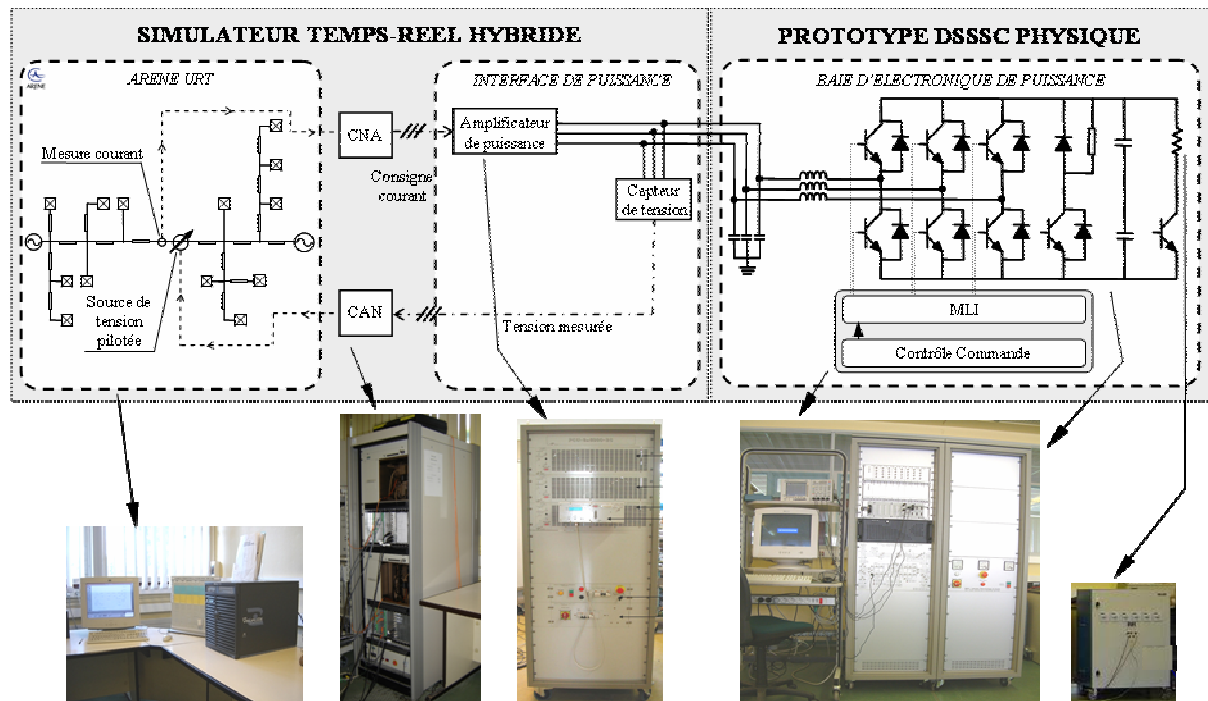


Figure 3.43. Schéma de la connexion hybride pour application DSSSC

➤ Le réseau simulé

Le réseau utilisé pour cette étude (*Figure 3.44*), est réalisé en partant de celui présenté lors du premier exemple d'application temps-réel hybride (v. §3.3.3.1, *Figure 3.10*). Il comporte ainsi :

- ⚡ 15 lignes, modélisées par des impédances RL ($0,4\Omega$ et $1,3\text{mH}$)
- ⚡ 13 charges, modélisées par des impédances RL (800Ω et $1,274\text{mH}$)
- ⚡ 2 postes sources, modélisés par deux sources de tensions ; les amplitudes de la tension dans les deux postes sont fixées à des valeurs différentes afin d'obtenir un certain transit de puissance ($V_{PS1}=19\text{kV}$ et $V_{PS2}=21\text{kV}$)
- ⚡ 1 mesure de courant, utilisée pour le contrôle de l'amplificateur de puissance
- ⚡ le DSSSC, modélisé par deux injecteurs de courant et une résistance (comme expliqué dans §3.3.6.1)

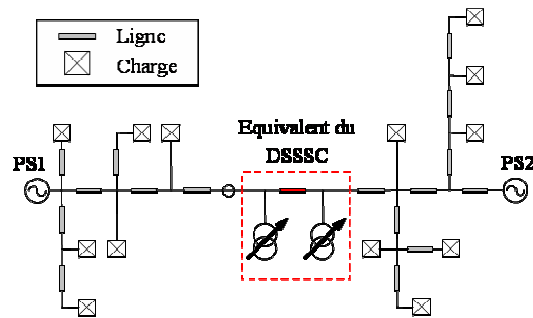


Figure 3.44. Réseau utilisé pour l'application DSSSC

➤ Le banc analogique

Les paramètres du DSSSC physique sont présentés dans le *Tableau 3.4*.

PARAMETRE	VALEUR
Inductance du filtre LC	3 mH
Capacité du filtre LC	100 μF
Puissance nominale	10 kVA
Période d'échantillonnage	100 μs
Fréquence de commutation	1 kHz
Tension du bus DC	400 V
Capacité de bus DC	1100 μF

Tableau 3.4. Paramètres du prototype de DSSSC

La puissance nominale de l'onduleur utilisé est de 10kVA maximum, même si dans l'application retenue, le système demande moitié moins de puissance. Le prototype à échelle réduite du DSSSC émule le fonctionnement d'un DSSSC de 60kVA (fonctionnement en régime de contrôle des flux de puissance) connecté au réseau de distribution 20kV.

3.5.2. Résultats expérimentaux

En utilisant le montage présenté ci-dessus, plusieurs essais ont été effectués afin de valider les algorithmes de contrôle/commande proposés [LEP 07]. Ainsi, la *Figure 3.45* présente le contrôle des puissances actives et réactives du réseau simulé. Sur la partie de gauche, nous observons les puissances active (MW), réactive (MVar) et apparente (MVA). A $t = 40s$, la puissance active est contrôlée à $-0,5MW$ puis à $t = 60s$ à $-1,2MW$. A environ $t = 90s$, les correcteurs sont éliminés, les flux de puissances qui circulent correspondent à ceux sans compensation. A $t = 120s$ nous procédons au contrôle de la puissance active à $0MVar$, puis à $t = 155s$, à $-0,1MVar$. Nous observons la réponse des systèmes du premier ordre à une consigne de type échelon. Sur la partie de droite, nous présentons les puissances mises en oeuvre par le DSSSC, il est à noter le ratio entre le relevé de droite et celui de gauche.

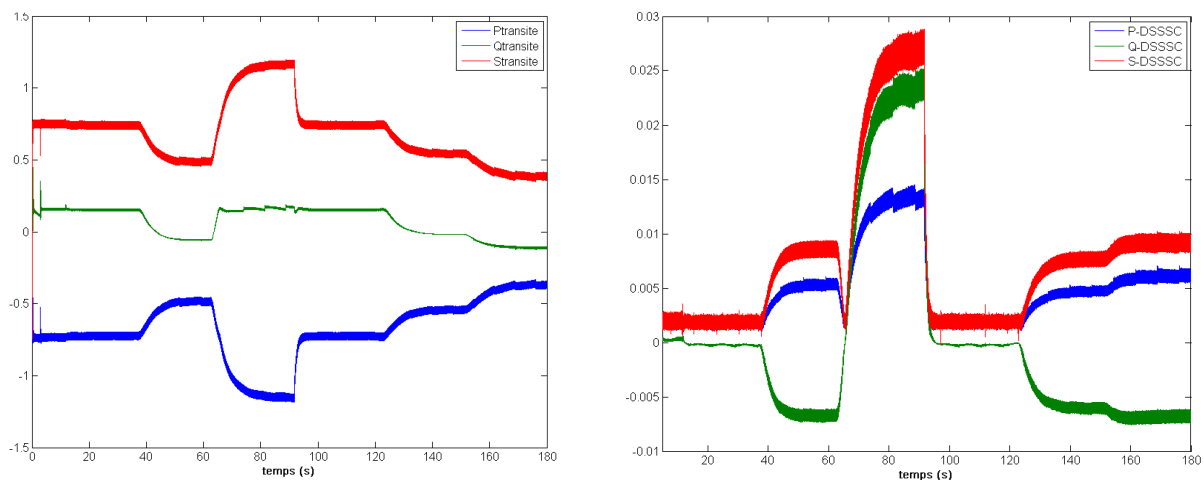


Figure 3.45. Gauche – Puissances transitées à travers le système ; Droite – Puissances mises en oeuvre par la structure DSSSC

Lors de ce contrôle nous avons observé la bonne tenue des tensions du réseau dans la fourchette admissible. Sa variation d'amplitude n'a pas été significative comme l'illustre le relevé de gauche de la *Figure 3.46*. La partie de droite présente la tension (kV) et le courant (kA) pour la phase 1 mis en oeuvre par le DSSSC.

Ces essais expérimentaux ont permis de valider du point de vue qualitatif et du point de vue énergétique les principes et architectures de commande, établies pour le contrôle des flux de puissance. Le bon comportement de l'onduleur et du réseau ont été observés. Le caractère dimensionnant a également pu être établi et nous avons montré que, d'une manière générale, le système n'avait pas besoin d'excéder 300kVA. Cependant, lors des essais, nous avons mis en évidence l'existence d'une limite de compensation : la chute de tension dans les lignes ne peut pas compenser tous les courants et selon la consigne envoyée, une instabilité de la commande a pu être observée.

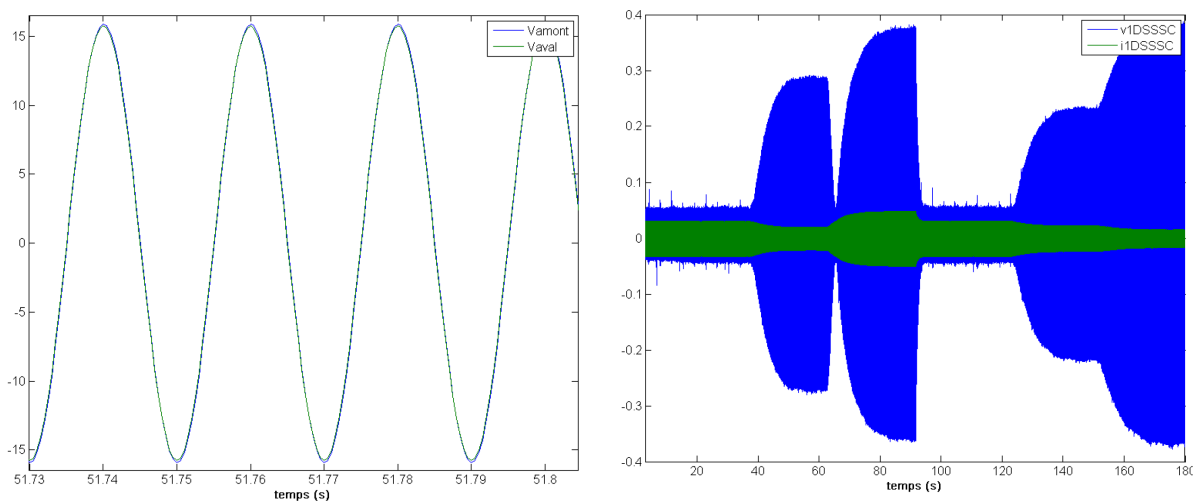


Figure 3.46. Gauche – Tension en amont et en aval du DSSSC ; Droite – Tension et courant mis en oeuvre par le DSSSC

En ce qui concerne la limitation de courant de court-circuit, la même structure a été utilisée, mais le mode de contrôle/commande a dû être repensé, pour reposer plus sur le contrôle de courant. Une solution novatrice a été proposée et validée expérimentalement. Sa faisabilité montre l'intérêt des structures de type série dans le fonctionnement des réseaux. Les essais ont permis de compléter les spécifications de l'architecture. En effet, pour des raisons de maintien de tension du bus continu et de capacité à générer des composantes homopolaires de tension, la conception du dispositif doit reposer sur un système de type monophasé. Cependant, ce fonctionnement en limiteur de courant implique un dimensionnement important de la structure puisqu'il faut que le système soit capable de générer trois tensions dont les amplitudes sont celles des tensions de ligne nominales. Nous avons vu que plusieurs facteurs interviennent dans ce type de limitation. Concernant le temps de réponse qui est lié au temps de charge du bus continu, il dépend de la valeur de la composante active de la tension à générer, de la valeur de la capacité du bus continu et de l'amplitude du courant de court-circuit. Concernant l'amplitude du courant de court-circuit, elle dépend de l'impédance qui se trouve entre le système et le court-circuit. La qualité de mesures des tensions qui

servent à créer les consignes et le retour d'information pour la boucle de régulation de tension jouent également un rôle important, les capteurs doivent retranscrire une mesure qui soit la plus proche de la réalité. Le dernier facteur est le temps de retard dans la boucle de commande qui induit un déphasage des grandeurs. Ces facteurs font, qu'au final, bien que le fonctionnement ait été validé et que le principe de base soit simple, cette solution reste complexe à mettre en oeuvre et dépend de beaucoup de paramètres pour être suffisamment fiable. De plus, elle est coûteuse puisqu'il faut ajouter beaucoup de dispositifs de mesure de tension pour la création de la consigne. Par conséquent, d'autres solutions ont été recherchées afin de supprimer les défauts de cette limitation par l'élaboration d'une nouvelle approche qui utilise les propriétés intrinsèques du convertisseur [LEP 07].

3.6. SYNTHÈSE SUR CHAPITRE 3

Après une justification théorique du choix d'un simulateur temps-réel hybride (*CHAPITRE 2*), nous venons de valider ce choix à travers des cas pratiques.

La validation des fonctionnalités de la plateforme temps-réel hybride mise en place au G2Elab, a été réalisée en effet avec succès sur une très large plage d'applications : génération non-conventionnelle (éolienne, photovoltaïque), systèmes à base d'électronique de puissance pour la compensation et la gestion de flux énergétiques, etc.

Via toutes les applications présentées dans ce chapitre, nous avons validé la grande flexibilité de la plateforme expérimentale conçue, étant utilisable pour effectuer des études sur :

- ☞ trois types de machines tournantes : machine asynchrone à double alimentation, machine synchrone, machine asynchrone à cage ;
- ☞ différents dispositifs d'électronique de puissance : en configuration shunt ou série ;
- ☞ dispositifs industriels fermés, pouvant être considérés comme de « boîte-noires ».

De plus, tous les travaux présentés dans ce chapitre ont validé aussi l'affirmation selon laquelle un simulateur temps-réel hybride permet de se rapprocher encore plus de la réalité et de valider tout concept avant sa mise en pratique.

Dans le quatrième chapitre, nous passerons à des systèmes encore plus complexes, l'étude qui va suivre portant à la fois sur :

- ☞ des aspects matériels : systèmes de production non conventionnels, systèmes de stockage, systèmes d'électronique de puissance, architectures optimales de ces éléments ;
- ☞ des aspects logiciels et de contrôle optimal des flux énergétiques.

CHAPITRE 4. APPLICATIONS A DES SYSTEMES PLUS COMPLEXES

4.1. INTRODUCTION A L'HABITAT

Aujourd'hui, le rachat de l'énergie produite à base de panneaux photovoltaïques (PV) est fait par Electricité de France (EDF), à des tarifs préférentiels [ADE 05]. Néanmoins, l'évolution prévisible du schéma d'échange énergétique indique une diminution, voire une disparition, de ces avantages, quand ils existent, dans de nombreux pays. Cela conduira à favoriser de préférence l'autoconsommation, et la valorisation locale de la production solaire.

C'est dans ce contexte que le G2Elab (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble), associé au G-SCOP (Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble), à l'INES (Institut National de l'Energie Solaire), à Schneider Electric et à ARMINES ont mis en commun leurs compétences sur un projet de l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche). Ce projet, intitulé MULTISOL, porte sur l'optimisation des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque.

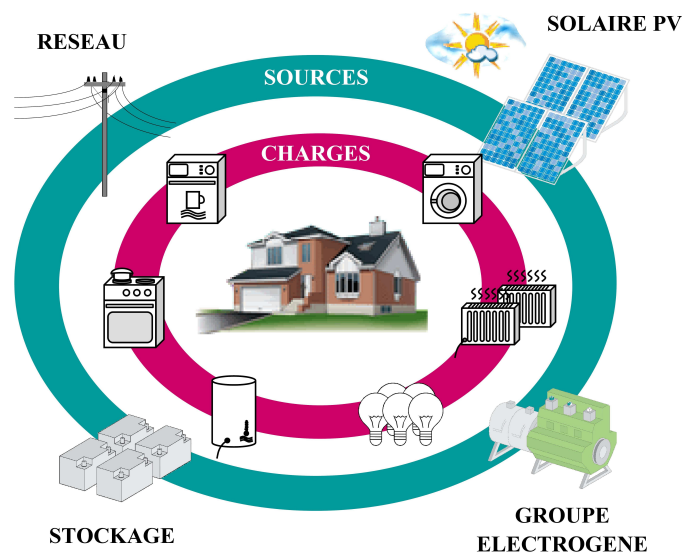


Figure 4.1. Principe du projet MULTISOL

Le projet MULTISOL a pour vocation de proposer et développer une architecture énergétique globale novatrice, axée autour du solaire PV et de la gestion intelligente des charges, où :

- le réseau apparaît comme un appoint pour le bâtiment ;

🔗 le bâtiment apparaît pour le réseau comme un consommateur stable (capable de lisser ses propres pointes) d'une part et éventuellement disponible, d'autre part, pour aider à sa régulation en s'appuyant sur l'autonomie et sur le surplus de production du bâtiment.

Ceci induit un double intérêt économique, tant pour l'utilisateur que pour la compagnie de distribution d'électricité.

Pour cela, cette architecture énergétique répondra aux critères suivants :

- 🔗 modularité avec des interfaces standardisées permettant l'interchangeabilité et l'évolutivité des composants ;
- 🔗 intelligence et prédiction au niveau production et consommation ;
- 🔗 interaction avec une interface Homme machine permettant des ajustements de paramètres simples et la restitution d'un tableau de bord incitatif à la réduction de la consommation ;
- 🔗 sécurisation maximisée et optimisée pour garantir une autonomie donnée d'une part et des fonctionnements aux meilleurs rendements ;
- 🔗 fiabilité et durée de vie accrue par le bénéfice induit par la gestion optimisée de la charge sur la production solaire, notamment sur les stockages et par la mise en oeuvre de matériels industrialisables à terme ;
- 🔗 économique au niveau de la réalisation des systèmes, et au niveau de l'exploitation et de la maintenance.

Afin d'obtenir toutes les fonctionnalités envisagées, en sus d'algorithmes de gestion et d'optimisation, il y aura aussi besoin de concevoir des architectures physiques et algorithmiques adaptées. Ainsi, le paragraphe § 4.2 portera sur ces sujets, en passant par une étape de modélisation des sources et des charges électriques.

Un deuxième concept proposé dans ce quatrième chapitre est celui des microréseaux. Ce concept relativement nouveau a été introduit principalement pour faciliter l'intégration des systèmes de génération décentralisés à base d'énergies renouvelables dans les réseaux de distribution.

Dans le cadre de projets déjà existants [MIC 02][MIC 06], les microréseaux sont définis comme des systèmes « qui comportent des systèmes de distribution de basse tension avec des sources d'énergie distribuée, tels que les microturbines, les piles à combustibles, les systèmes photovoltaïques, etc., des systèmes de stockage tel que les volants d'inertie, les supercondensateurs et les batteries, et des charges contrôlables, qui ont des possibilités d'être contrôlés vis-à-vis de l'opération du réseau. Les microréseaux sont connectés au réseau de distribution mais peuvent également travailler en mode îloté, en cas de défaut dans le réseau principal » [HAT 04]. Néanmoins, dans le cadre des applications effectuées au sein de

G2Elab [GAZ 06], un microréseau est défini comme « un ensemble de générateurs d'origine renouvelable intermittente (et éventuellement de charges) et de systèmes de soutien connectés au réseau à un seul point de raccordement avec des fonctionnalités incorporées pour améliorer l'intégration ».

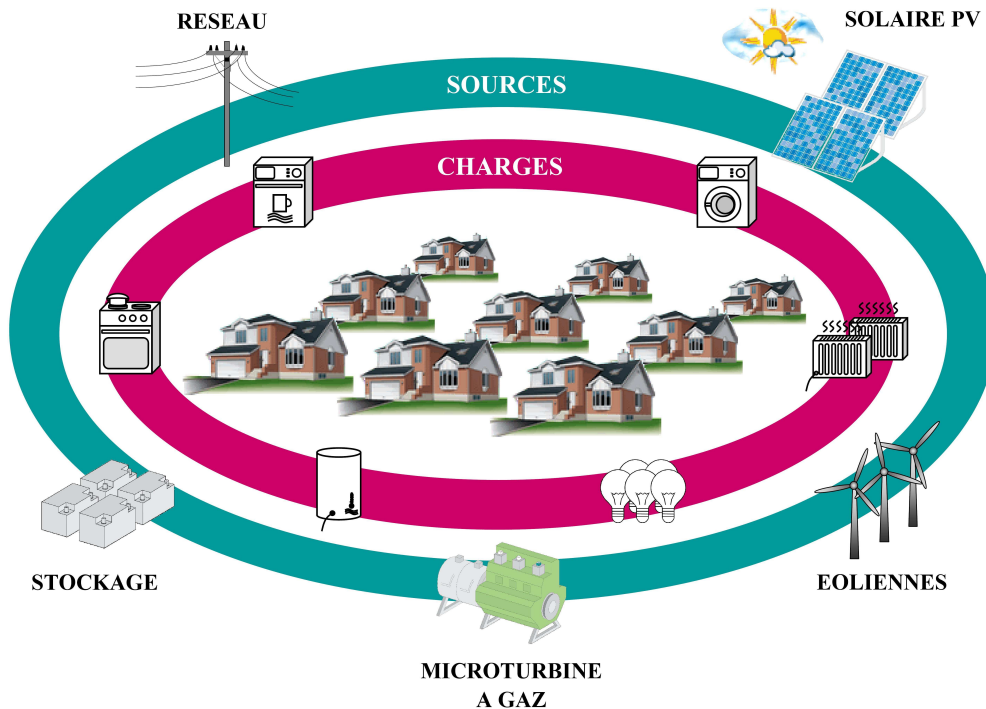


Figure 4.2. Principe de l'application microréseau

Le concept proposé dans l'application qui sera présentée par la suite, voit les microréseaux comme une structure destinée à l'amélioration de l'intégration de générateurs intermittents au réseau. Selon cette définition et en fonction des technologies de génération à base de renouvelable et des systèmes de soutien qu'ils incorporent, nous pouvons concevoir différents types de microréseaux, qui peuvent rendre différents services et offrir différentes fonctionnalités, étant ainsi adaptés à différentes applications. Ces applications seront basées sur un ou plusieurs de ces aspects :

- ⚡ la fourniture d'énergie au réseau ;
- ⚡ la fourniture de services systèmes au réseau ;
- ⚡ la continuité de la fourniture d'énergie, grâce à l'îlotage, en cas de défaillance du réseau principal.

Les éléments qui composent un microréseau de ce type varient en fonction du type d'application. Cependant, il y a des éléments en commun : des systèmes de génération à base de renouvelable et des systèmes de soutien programmables et contrôlables. Ces systèmes de

soutien sont l'élément clé pour améliorer l'intégration. Parmi ces systèmes de soutien, nous trouvons les systèmes de génération (les générateurs Diesel, les microturbines, etc.), les systèmes de stockage (les batteries, les volants d'inertie, les supercondensateurs, etc.) et les systèmes de compensation et de réglage (les STATCOMs, les DVRs, les SVCs, etc.). Des éléments additionnels, qui peuvent être intégrés dans un microréseau, sont les charges pilotables et un système de gestion et de supervision.

Dans le cadre d'une collaboration avec Haizea GAZTAÑAGA ARANTZAMENDI [GAZ 06b], nous avons matérialisé ce concept par un microréseau résidentiel ilôttable fictif, qui est proposé comme une solution possible du futur. La collaboration a porté essentiellement sur la validation en temps-réel des concepts et des algorithmes de contrôle/commande développés par Haizea GAZTAÑAGA ARANTZAMENDI [GAZ 06], [GAZ 07]. Cette application temps-réel hybride sera présentée par la suite dans le Paragraphe §4.3.

4.2. MULTISOL

4.2.1. Raisons du choix

L'intérêt de l'énergie dans le bâtiment n'est pas fortuit ; en effet, le résidentiel et le tertiaire constituent le premier consommateur d'énergie primaire, avant même le transport. Il y a là des économies et des gains potentiels substantiels à faire. Pour cela, un effort doit être mené selon deux axes - consommer mieux et produire localement, en suivant des processus optimaux :

- 🔄 Côté consommation, avec une sécurité de disponibilité énergétique accrue, et une amélioration de l'efficacité des équipements ;
- 🔄 Côté production, avec des générateurs solaires comme source centrale.

Une première étape dans le déroulement du projet a été la sélection des applications cibles. Après un processus de brainstorming sur les types de bâtiments existants, un grand nombre d'applications (non exhaustif) a été identifié :

🔄 Résidentiel

- Individuel – maison urbaine, maison rurale, maison isolée
- Collectif – HLM, résidentiel privé, résidentiel social (étudiant,...)

🔄 Tertiaire

- Médical – hôpital, clinique, cabinet médical
- Bureaux – petit/grand bâtiment avec location, petit/grand bâtiment avec propriétaire

- Commerce – magasin de proximité, banque, supermarché, station service
- Restauration/Hôtellerie – restaurant cantine, hôtel, centre de vacances
- Service – école, mairie, ministère, complexe sportif, salle polyvalente, cinéma

🔄 Industriel

- Entrepôt/plateforme logistique
- Petit/moyen/grand site

Etant donnée la multitude des cibles possibles, un choix doit être fait. Afin d'arriver à aboutir, il existe deux manières : une plus intuitive ou l'autre plus rigoureuse, comme dans notre cas. Ainsi, après une analyse approfondie en prenant en compte les divers critères présentés dans *Figure 4.3*, et en appliquant une pondération 2/4/1 pour opportunité/complexité/ergonomie, le type de bâtiment qu'on a choisi finalement comme cible est le *résidentiel individuel*.

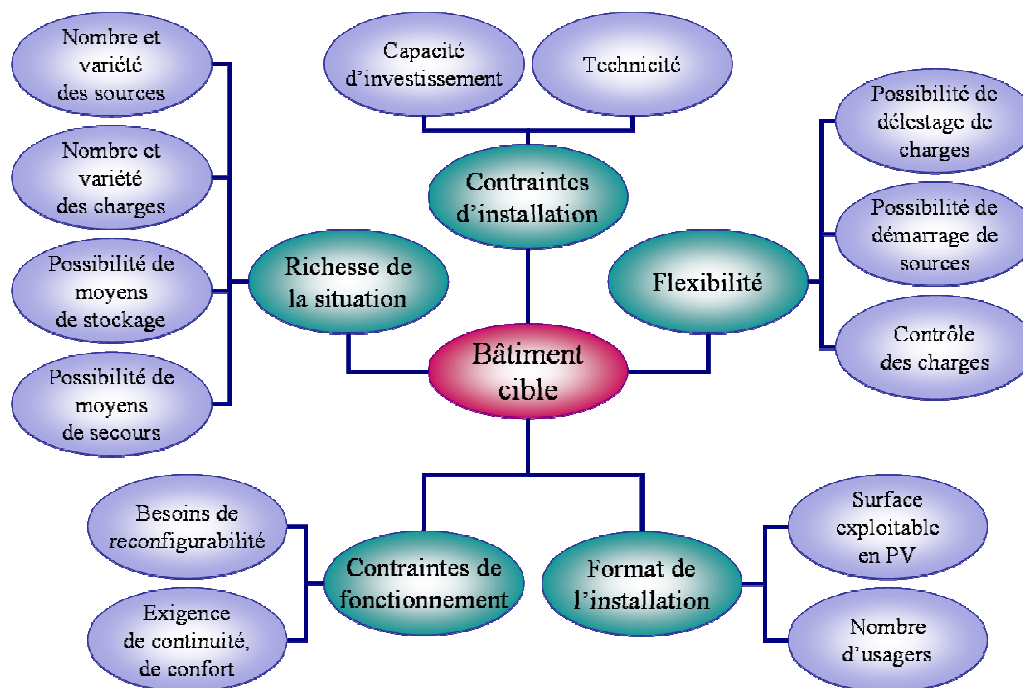


Figure 4.3. Diagramme des critères du choix

4.2.2. Besoins

Une fois le choix de la cible de l'étude faite, il faut identifier tous les acteurs auxquels MULTISOL peut apporter de la valeur ajoutée, et ainsi bien clarifier le rôle d'un tel système. Suite à l'analyse fonctionnelle effectuée, la *Figure 4.4* présente les milieux extérieurs au

système MULTISOL et permet d'analyser les interactions qui seront rendues possibles entre ces milieux, grâce à ce système expert.

En effet, les milieux externes choisis pour l'analyse sont :

- 🌀 *Les sources locales* – Elles peuvent être de deux types : intermittentes (PV, éolien, hydraulique) et pilotables (groupe électrogène, groupe de cogénération).
- 🌀 *Le stockage électrique* – Dans le cadre de ce projet, seul le stockage par batterie est envisagé, sans distinction de technologie.
- 🌀 *Le réseau* – Les besoins du réseau sont vus à travers deux acteurs :
 - *Le fournisseur d'énergie électrique* est l'interlocuteur privilégié de l'utilisateur avec lequel il négocie des contrats de vente d'énergie électrique et d'achat d'énergie PV ;
 - *Le gestionnaire du réseau de distribution (GRD)* sera intéressé par la mise en place de contrats relatifs aux services que l'utilisateur peut apporter au réseau (limitation de pointes de charge, etc.)
- 🌀 *Les charges* – Plusieurs critères de classifications peuvent être adoptés pour celles-ci, en fonction de leur priorité, leur possibilité de délestage ou de décalage, etc.
- 🌀 *L'utilisateur* – MULTISOL doit informer celui-ci de l'utilisation rationnelle de son système électrique. Il doit également se configurer en fonction de ses choix ou préférences (économique, écologique, confort, autonomie...)

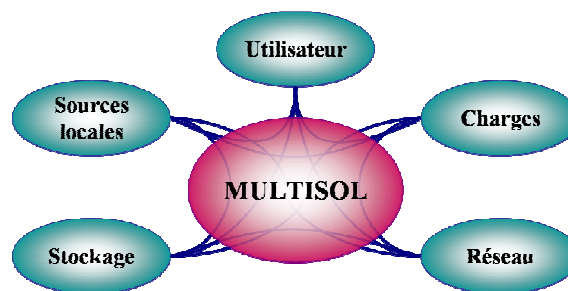


Figure 4.4. Interacteurs de MULTISOL

Nous pouvons déjà entrevoir quelques exemples de services à valeur ajoutée pour les trois acteurs principaux mentionnés ci-dessus :

- 🌀 Pour l'utilisateur (habitant, propriétaire du bâtiment...)
 - Permettre à l'utilisateur de réduire sa facture d'énergie par une gestion optimale de ses sources et de ses charges sans sacrifier son confort.

- Garantir à l'utilisateur la disponibilité de l'alimentation des charges prioritaires de son bâtiment.
- Pour le fournisseur d'énergie électrique
 - Permettre au fournisseur de développer une offre « énergie verte » en mettant à disposition la production PV des petits producteurs.
 - Permettre au fournisseur d'optimiser ses coûts d'achat/revente d'énergie en réduisant les pointes de consommation et en accroissant la prévisibilité des courbes de consommation.
- Pour le gestionnaire du réseau de distribution
 - Permettre au gestionnaire d'alléger les contraintes sur les ouvrages de son réseau en réduisant les pointes de consommation.
 - Permettre au gestionnaire de minimiser l'utilisation des réserves pour les services système en accroissant la prévisibilité des courbes de consommation.

En plus de l'optimisation de flux énergétiques, le système MULTISOL pourrait recevoir aussi une fonction de *comptoir intelligent et communicant*, permettant ainsi une traçabilité parfaite de l'énergie consommée et produite. De cette manière, le fournisseur connaîtra à tout moment quel est le type de source utilisé (PV, groupe électrogène, batteries...), et rendre ainsi possible l'injection de l'énergie stockée vers le réseau (ce qui est interdit aujourd'hui).

Par conséquent, il est nécessaire de concevoir des architectures matérielles bien adaptées et capables d'assurer le maximum de fonctionnalités mentionnées plus haut dans ce paragraphe. La structure logicielle devra aussi se prêter à toute modification de l'architecture matérielle, à tout ajout de matériel. L'objectif final du projet sera donc d'obtenir une structure flexible de type « plug-and-play », comme par exemple le système USB utilisé aujourd'hui dans l'informatique. Par ailleurs, il sera nécessaire d'adapter et de valider les algorithmes déjà conçus par nos partenaires de G-SCOP, ainsi que d'en élaborer de nouveaux, afin de satisfaire le caractère prédictif et réactif du système.

Dans ce contexte, mon apport se situera au niveau des architectures matérielles, mais aussi au niveau de la classification et de la modélisation des sources et des charges (électriques ou thermiques). Pour chaque équipement, il va falloir développer plusieurs types de modèles, en raison des grandes différences de dynamique et de précision désirée que nous retrouvons dans les étapes principales : algorithmes de dimensionnement, algorithmes prévisionnels, algorithmes réactifs et validation temps-réel de ceux-ci.

4.2.3. Classification et identification des équipements

Afin d'arriver à mettre en œuvre les algorithmes de contrôle/commande, une étape de classification et d'identification des dispositifs est obligatoire. Cette étape aura une influence importante sur l'élaboration des architectures, à la fois matérielle et logicielle, du système.

Dans un premier temps, nous faisons une classification des appareils en fonction :

- de leur observabilité, c'est-à-dire des mesures et des informations que le système MULTISOL peut obtenir de ces équipements, la connaissance du comportement à venir.

- des moyens d'action que MULTISOL peut avoir pour piloter ces équipements.

Ces deux critères se déclinent en fonction de leur caractère : réactif ou anticipatif. En appliquant ces critères, 7 types de dispositifs ont été identifiés, présentés dans le *Tableau 4.1*.

	Observabilité		Pilotage	
	Réactif	Anticipatif	Réactif	Anticipatif
Type 0	---	---	---	---
Type 1	•	---	---	---
Type 2	---	•	---	---
Type 3	•	---	---	---
Type 4	•	---	•	---
Type 5	•	•	•	---
Type 6	•	•	•	•

Tableau 4.1 Typologie générale des équipements

Type 0 : Equipement de type « fantôme ». Nous n'avons aucune information et aucune action sur le dispositif, il peut être branché sur n'importe quelle prise à n'importe quel instant (*Exemple : La bouilloire, qu'on peut mettre soit dans la cuisine, dans le séjour ou dans le bureau*).

Type 1 : Equipement qui peut être observé en réactif, c'est-à-dire avoir des mesures en temps réel de sa consommation/production énergétique (*Exemple : courant absorbé par un téléviseur*) et d'autres paramètres essentiels (*Exemple : indication « mise en veille »*). Aucun moyen de pilotage n'est disponible.

Type 2 : On peut avoir des informations prévisionnelles à court, moyen ou long terme de sa consommation/production, mais pas de mesures en temps réel. Toujours aucun moyen d'action.

Type 3 : On dispose des deux catégories d'informations mesures en temps réel et prévisions à court, moyen ou long terme de sa consommation/production. Toujours aucun moyen d'action.

Type 4 : L'équipement est observable et pilotable en réactif, c'est-à-dire que l'on dispose des mesures en temps réel et des moyens d'action sur son comportement (*Exemple : interruption de l'alimentation*).

Type 5 : En plus, par rapport au type 3 (mesures en temps réel et prévisions), nous disposons aussi des informations avec caractère anticipatif. On n'a pas la possibilité de le piloter en anticipatif. *Exemple : le réfrigérateur, dans l'hypothèse où nous n'avons pas d'accès au thermostat interne :*

- nous pouvons mesurer sa consommation de courant
- nous pouvons connaître son inertie thermique donc l'observer en anticipatif
- nous pouvons arrêter son alimentation si nous voulons réduire un pic de consommation, en réactif
- par contre nous ne pouvons pas le refroidir plus que nécessaire afin de « stocker » de l'énergie (du froid en fait)

Type 6 : L'équipement « idéal », nous disposons de toutes les informations en temps réel ou prévisionnels, et en plus, nous pouvons le contrôler en réactif et anticipatif. *Exemple : Le lave-linge :*

- nous pouvons mesurer sa consommation instantanée
- nous pouvons connaître son comportement (programmes à venir) avec l'estimation de sa consommation prévisionnelle
- nous pouvons arrêter son alimentation si nous voulons réduire un pic de consommation en réactif ou passer une situation d'urgence
- nous pouvons décaler son démarrage à un instant de temps déterminé de manière optimale – pilotage en anticipatif

En plus de cette typologie, nous pouvons faire une classification des charges en fonction de leur pilotabilité en régime normal de fonctionnement et en régime d'urgence :

🔄 charges pilotables :

- charges décalables (Exemple : lave-linge, lave-vaisselle...)
- charges modulables (Exemple : chauffage, chauffe-eau...)
- charges délestables (Exemple : four...)

🔄 charges non-pilotables.

Une autre notion importante dans la classification des charges en vue de leur pilotage est *la priorité*. En effet pour chaque charge il est nécessaire de connaître son niveau de priorité face aux autres consommateurs, cet indicateur ayant un rôle primordial en situations d'urgence. Néanmoins, il est possible que le niveau de priorité d'un équipement donné soit variable. Un exemple d'une telle situation peut être le cas du réfrigérateur. Ainsi, en raison de son inertie thermique, en situation d'urgence (par exemple perte de réseau), sa priorité peut être plus basse que celle de l'ordinateur ou de l'éclairage. Par contre, au moment où sa température interne dépasse une certaine valeur critique, le réfrigérateur deviendra le plus prioritaire.

Pour une bonne identification d'un dispositif, des mesures nécessaires à la supervision de son comportement et des moyens d'actions qu'on pourrait avoir sur lui, nous pouvons commencer à construire son *diagramme d'état*. Comme montré sur la *Figure 4.5* en prenant comme exemple le réfrigérateur, un tel diagramme comporte plusieurs états, le passage entre ceux-ci se faisant par des transitions. Néanmoins, ces transitions sont conditionnées par une ou plusieurs contraintes.

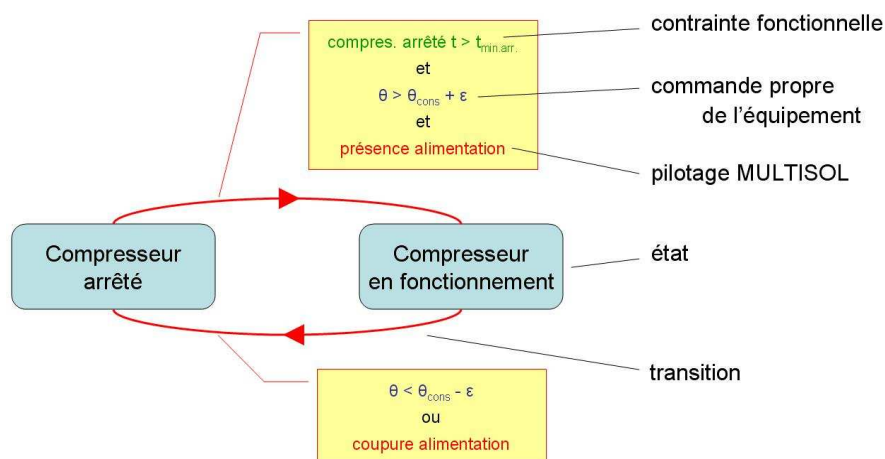


Figure 4.5. Diagramme d'état réfrigérateur

Dans le cas de notre exemple (*Figure 4.5*), nous avons deux états : compresseur arrêté et compresseur en fonctionnement. Nous considérons le cas d'un réfrigérateur avec un seul compresseur, et les autres consommations internes ont été négligées (comme par exemple l'éclairage intérieur). Pour passer de l'arrêt au fonctionnement (transition en haut de la figure), trois conditions doivent être simultanément satisfaites :

- une contrainte fonctionnelle impose que le compresseur soit arrêté un intervalle de temps minimal avant d'être relancé ;

- 🔗 la commande propre de l'équipement, qui démarre le compresseur lorsque la température interne dépasse un certain seuil ($\theta > \theta_{cons} + \varepsilon$) – fonction thermostat ;
- 🔗 la présence de l'alimentation.

En mode analogue, le passage dans le sens inverse peut être effectué soit par la coupure provoquée par le thermostat, soit par la coupure de l'alimentation.

En regardant la *Figure 4.5*, nous pouvons déjà apercevoir les façons dont MULTISOL pourrait agir sur cet équipement. Il est évident que la contrainte fonctionnelle (temps minimal de repos du compresseur) ne peut pas être modifiée. Le moyen le plus facile de pilotage du réfrigérateur est l'action sur son alimentation. Par l'ajout d'un interrupteur télécommandable, MULTISOL peut agir et gérer dans une certaine mesure le fonctionnement de l'équipement. Néanmoins, afin d'éviter que les aliments soient dégradés, une mesure de température sera nécessaire à l'intérieur du réfrigérateur.

Nous pourrions donc couper l'alimentation, ce qui aura comme conséquence l'élévation de la température interne mais, du fait de la présence d'un thermostat interne au réfrigérateur, nous ne pourrions pas passer sous un certain seuil de température. Dès que la température aura baissé en dessous d'un seuil, le compresseur sera arrêté et ne pourra pas être redémarré via une action extérieure. Toutefois, le stockage du froid pourrait être aussi envisagé si l'utilisateur met le thermostat au minimum et laisse MULTISOL gérer cette fonction de réglage de la température.

Ayant établi la classification des équipements et partant des diagrammes d'état, nous pouvons maintenant réaliser une *fiche d'identité* pour chaque dispositif (*Figure 4.6*).

- Nom de l'équipement
 - Description de l'équipement
 - Caractéristiques
 - Type (v. *Tableau 4.1*)
 - Niveau de priorité
 - Etat i (v. *Figure 4.5*)
 - Nom
 - Durée de l'état
 - Durée minimum de l'état
 - Durée maximum de l'état
 - Durée cumulée maximum d'interruption
 - Puissance active
 - Transitions (v. *Figure 4.5*)
 - Contraintes fonctionnelles
 - Données brutes
 - Mesures
 - Réactif
 - Anticipatif
 - Actions
 - Réactif
 - Anticipatif

Figure 4.6. Fiche d'identité générique pour un équipement

Cette fiche, contiendra les informations essentielles sur l'équipement et servira comme base à l'élaboration des modèles comportementaux afférents. Une autre fonctionnalité de ces fiches peut être l'adaptation des modèles déjà existants par rapport aux équipements réels (v. §4.2.6.3). Dans ce dernier cas, la fiche pourrait être demandé aux constructeurs ou complétée par le système MULTISOL lui-même, suite à une étape d'auto-apprentissage.

Il peut y avoir plusieurs types de fiches d'identité : comportementales, électriques, thermiques, etc.

4.2.4. Architecture matérielle

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, l'architecture matérielle devra satisfaire de nombreux critères en terme de fonctionnalités requises, de modularité et flexibilité (plug-and-play) et bien sûr d'autonomie.

La Figure 4.7 présente une première proposition d'architecture.

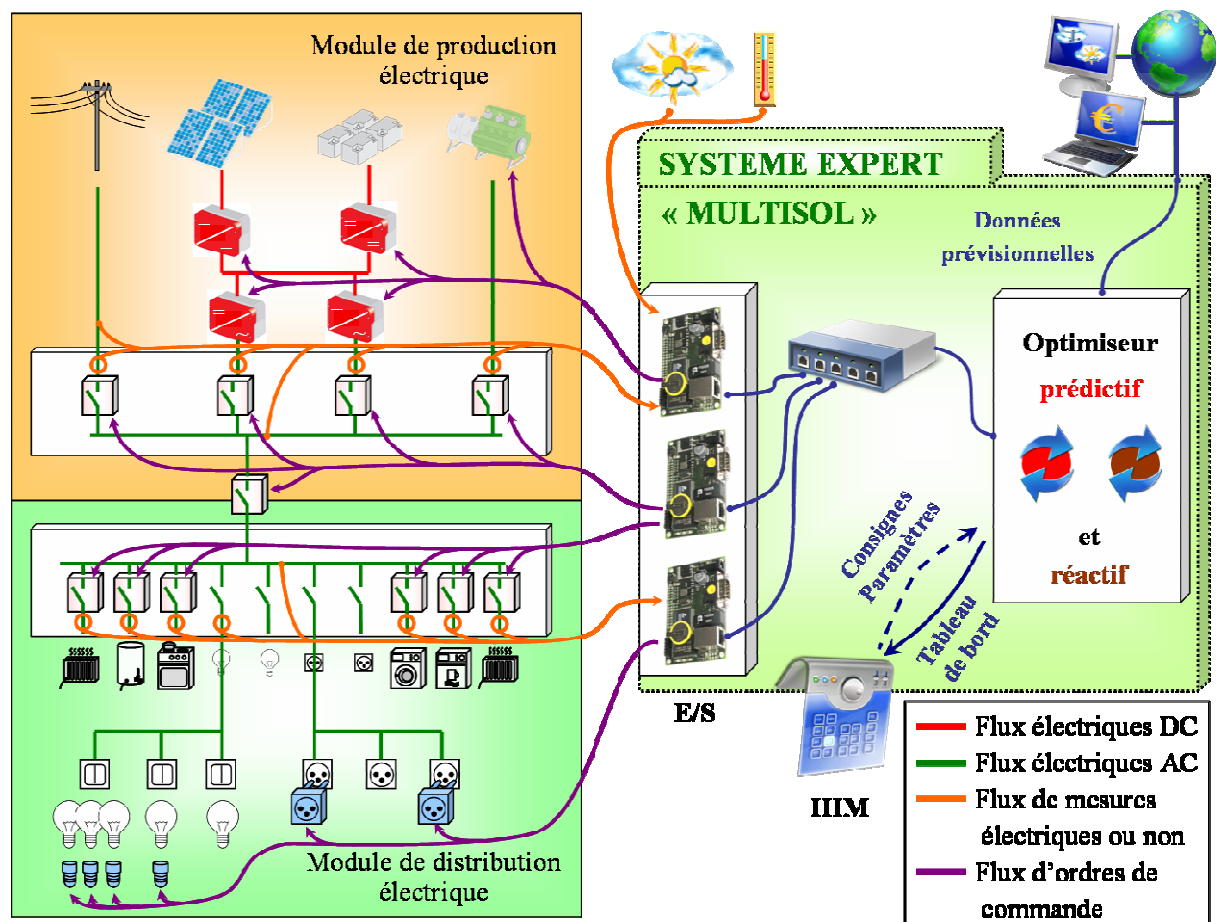


Figure 4.7. Architecture matérielle de principe

Nous pouvons observer deux modules différents : un pour la partie source (module production électrique) et l'autre pour la partie consommation (module distribution électrique). Ces modules peuvent se trouver dans deux tableaux électriques différents ou dans le même, en fonction du type de l'installation : ancienne ou moderne (comme montré dans la *Figure 4.8*). A côté, nous retrouvons le « cerveau » (système expert « MULTISOL »), avec ses entrées/sorties de/vers les différents capteurs et actionneurs, une ou plusieurs interfaces homme/machine (IHM), ainsi que des interface de communication externes. Tous ces éléments seront développés par la suite.

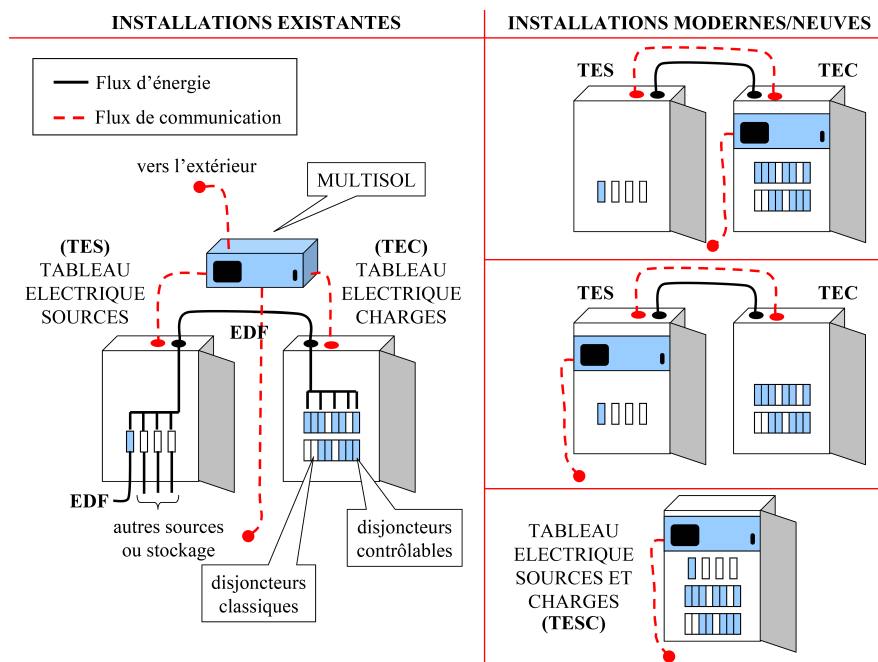


Figure 4.8. Emplacements possibles des modules de gestion

4.2.4.1. Module de production électrique

Sur la *Figure 4.9* est présentée l'architecture du système multi-sources axée autour du solaire, en marquant aussi les directions de circulation de la puissance électrique. Ainsi la *Figure 4.9* comporte :

- 🔄 les sources d'énergie retenues pour notre étude :
 - le réseau
 - le système de stockage
 - les panneaux photovoltaïques
 - le groupe électrogène

les convertisseurs d'interface à base d'électronique de puissance (6 et 7). Généralement, côté batteries ou PV, l'interface comporte un hacheur (DC/DC) qui a pour mission d'amplifier la tension en sortie des batteries et des panneaux PV, respectivement, afin d'atteindre la tension désirée à l'entrée de l'onduleur (DC/AC). Ce dernier sert à convertir le courant continu en courant alternatif et à contrôler la puissance produite par le système pour alimenter les charges, tout en assurant une certaine qualité de l'énergie fournie. Cet onduleur peut également être mis à contribution pour la fourniture de services système. En fonction du dimensionnement et de l'architecture choisie pour l'installation PV (série, parallèle, matricielle...) la présence du hacheur peut être nécessaire ou non. Par ailleurs, selon l'ordre de montage des deux systèmes (stockage et PV : simultanément ou a intervalle de quelques années), ainsi que de l'autonomie désirée, plusieurs configurations peuvent être utilisées pour leur interface et gestion, comme indiqué en *Figure 4.10*.

des organes de coupure et des appareils de mesure :

- côté réseau, nous pouvons remarquer le compteur d'achat d'énergie (1), le compteur de revente d'énergie (2), ainsi qu l'interrupteur général. Comme ces éléments sont la propriété du fournisseur d'énergie, à priori nous n'avons aucun contrôle dessus et, par conséquent, nous avons besoin d'ajouter un contacteur télécommandé supplémentaire (4) ainsi que des capteurs de mesure (voir *Figure 4.14*)
- côté groupe électrogène nous retrouvons un autre contacteur, toujours télécommandable afin d'être géré par MULTISOL, de type « normalement ouvert »
- les protections habituelles imposées par les normes (5).

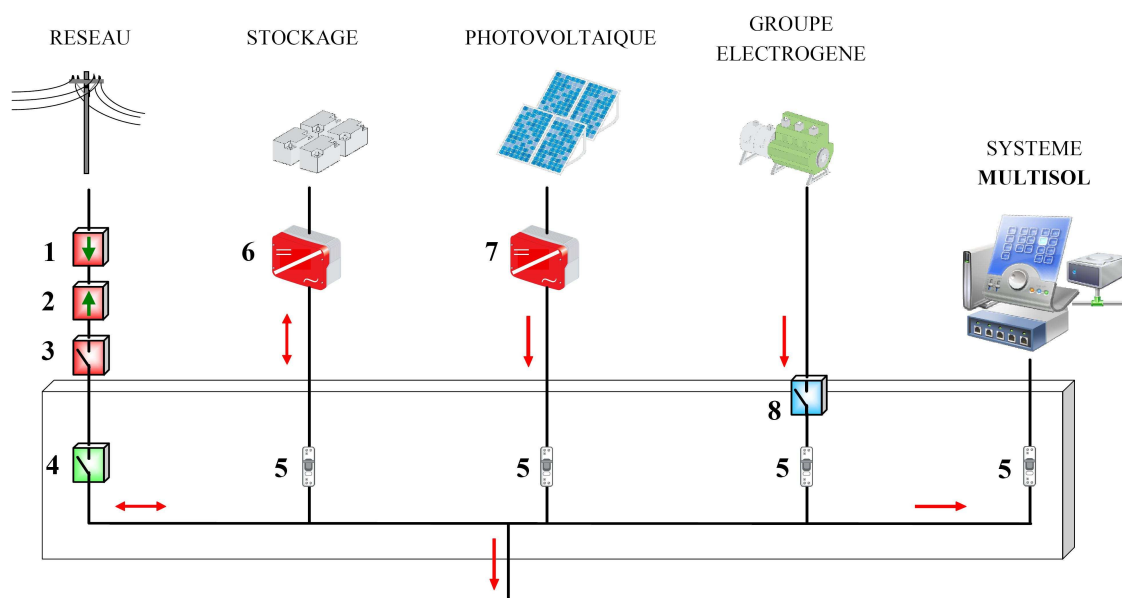


Figure 4.9. Architecture possible pour le raccordement des sources

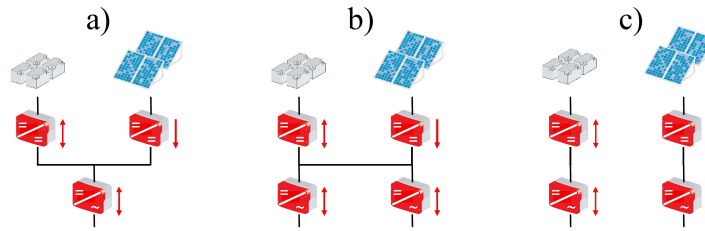


Figure 4.10. Configurations possibles pour l'interfaçage des systèmes de stockage et PV

Par l'adaptation des algorithmes de gestion, l'ensemble constitué par le système de stockage et l'interrupteur télécommandé 4 (toujours *Figure 4.9*) peut jouer le rôle d'une alimentation sans interruption UPS (Uninterruptible Power Supply) classique. Par contre, le système résultant du projet MULTISOL devra fournir une autonomie beaucoup plus élevée au bâtiment en utilisant toute la panoplie des sources disponibles, et tout cela de manière optimisée.

L'alimentation du système physique MULTISOL et de tous ses éléments auxiliaires devra être faite le plus proche possible du jeu de barres de production, afin d'assurer une meilleure autonomie du « cerveau ».

D'autres travaux ont été réalisés dans le cadre du même projet, par Ha PHAM THI THU [WUR 07],[PHA 08]. Ces travaux portent sur le dimensionnement optimal des systèmes PV et de stockage.

4.2.4.2. Module de distribution électrique

L'architecture matérielle du système de charge peut être analysée en tenant compte de trois critères principaux :

- 🔄 *Le type d'installation* – ancienne, rénovée ou neuve ; même si la tendance actuelle est de rénover les bâtiments ou d'en construire de nouveaux en allant vers la basse consommation d'énergie, une variante d'architecture sera aussi présentée pour les bâtiments non-rénovés ;
- 🔄 *La facilité d'implantation* – par l'utilisateur lui-même ou par un électricien formé ;
- 🔄 *L'indépendance de chaque circuit* (départs individuels)

A partir de ces éléments, trois architectures ont été proposées en fonction de l'application désirée, en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients :

A. Installations anciennes, avec des circuits électriques non séparés au niveau du tableau électrique

L'architecture proposée pour ce cas (*Figure 4.11*) comporte juste des dispositifs d'adaptation pilotables qui peuvent être installés par l'utilisateur lui-même dans les prises des appareils à piloter (comme par exemple le réfrigérateur, le lave-linge, etc.) ou dans les douilles des lampes contrôlables.

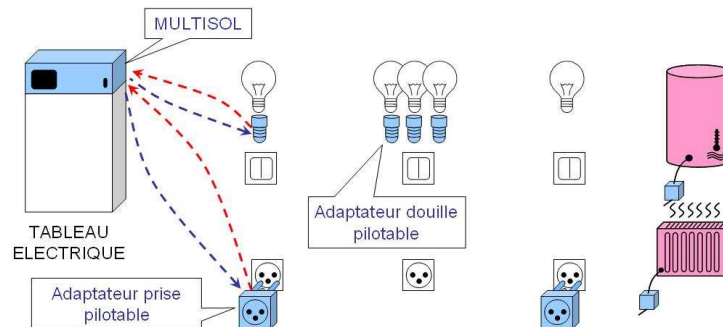


Figure 4.11. Architecture possible pour le pilotage des charges – installations anciennes

Ces adaptateurs peuvent intégrer une certaine quantité d'intelligence ainsi qu'une interface de communication entre l'équipement et le système de pilotage. Cette interface de communication permet de récupérer, d'une part, des informations disponibles sur l'équipement correspondant et, d'autre part, d'exécuter la commande envoyée par le module de pilotage.

L'avantage de cette proposition est que même si les circuits électriques sont communs au niveau du tableau, n'importe quel équipement raccordé à la prise peut être contrôlé de manière indépendante. On peut obtenir ainsi une bonne modularité, avec des interfaces standardisées permettant l'interchangeabilité et l'évolutivité des composants du système.

L'inconvénient est que le contrôle du système de chauffage et du chauffe-eau sont impossibles. Dans ces conditions il faut rajouter des dispositifs pilotables le long des fils de raccordements. De cette façon le problème du chauffage et du chauffe-eau est résolu. Cependant, puisqu'il faut intervenir sur le réseau électrique, la présence d'un électricien est indispensable.

B. Installations rénovées ou neuves, avec des circuits électriques quasi séparés au niveau du tableau électrique

Comme les circuits du chauffe-eau, du lave-linge, du lave-vaisselle, etc. sont séparés, l'idée est d'introduire les dispositifs pilotables directement dans le tableau électrique (*Figure 4.12*). Cette opération peut être effectuée par l'utilisateur si les dispositifs sont compatibles avec les tableaux standard, c'est-à-dire en remplaçant directement les interrupteurs classiques.

Si des modifications au niveau du tableau sont nécessaires, la présence d'un électricien devient indispensable.

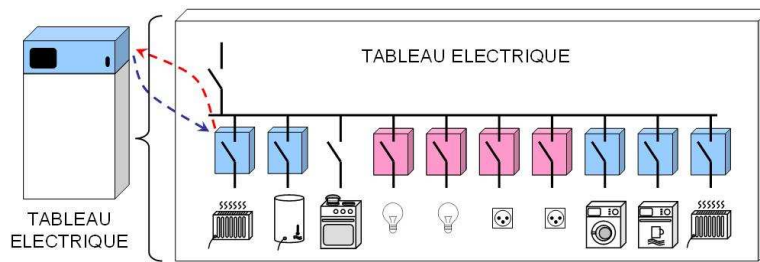


Figure 4.12. Architecture possible pour le pilotage des charges – installations rénovées ou neuves

Les grands avantages de cette variante d'architecture sont sa compacité et sa souplesse, de plus si le système est intégré dans le tableau électrique (Figure 4.8), tout le système est concentré dans une seule boîte. Ainsi le caractère esthétique est parfaitement satisfait. L'inconvénient de la configuration proposée est que les prises et l'éclairage restent quasi communs. Un très grand problème existe en ce qui concerne le pilotage des réfrigérateurs et congélateurs par exemple. Afin de résoudre ce souci, une troisième variante d'architecture est proposée.

C. Installations rénovées ou neuves, avec des circuits électriques quasi séparés au niveau du tableau électrique – solution mixte

Une solution mixte entre les deux solutions proposées précédemment combine la flexibilité de la première avec la compacité et la souplesse de la deuxième (Figure 4.13).

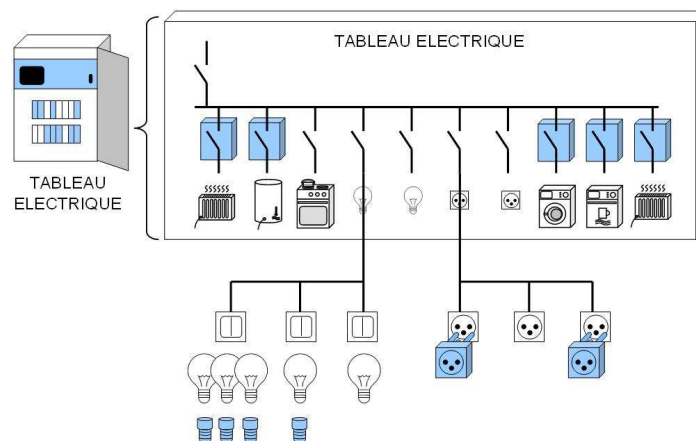


Figure 4.13. Architecture possible pour le pilotage des charges – installations rénovées ou neuves – solution mixte

Toutes les charges envisagées peuvent être pilotées, soit directement à partir du tableau si le circuit électrique est séparé, soit au point de raccordement (prise ou douille).

Dans un contexte plus futuriste, on peut imaginer que les fabricants de gros équipements (chauffage, cuisson, éclairage, électroménager...) intègrent directement un module communiquant de contrôle/commande dans leurs systèmes de commande locale existants.

4.2.4.3. Mesures

Dans la *Figure 4.14* nous avons mis en commun les schémas des deux modules et nous avons détaillé un certain nombre (non exhaustif) de points de mesure électrique.

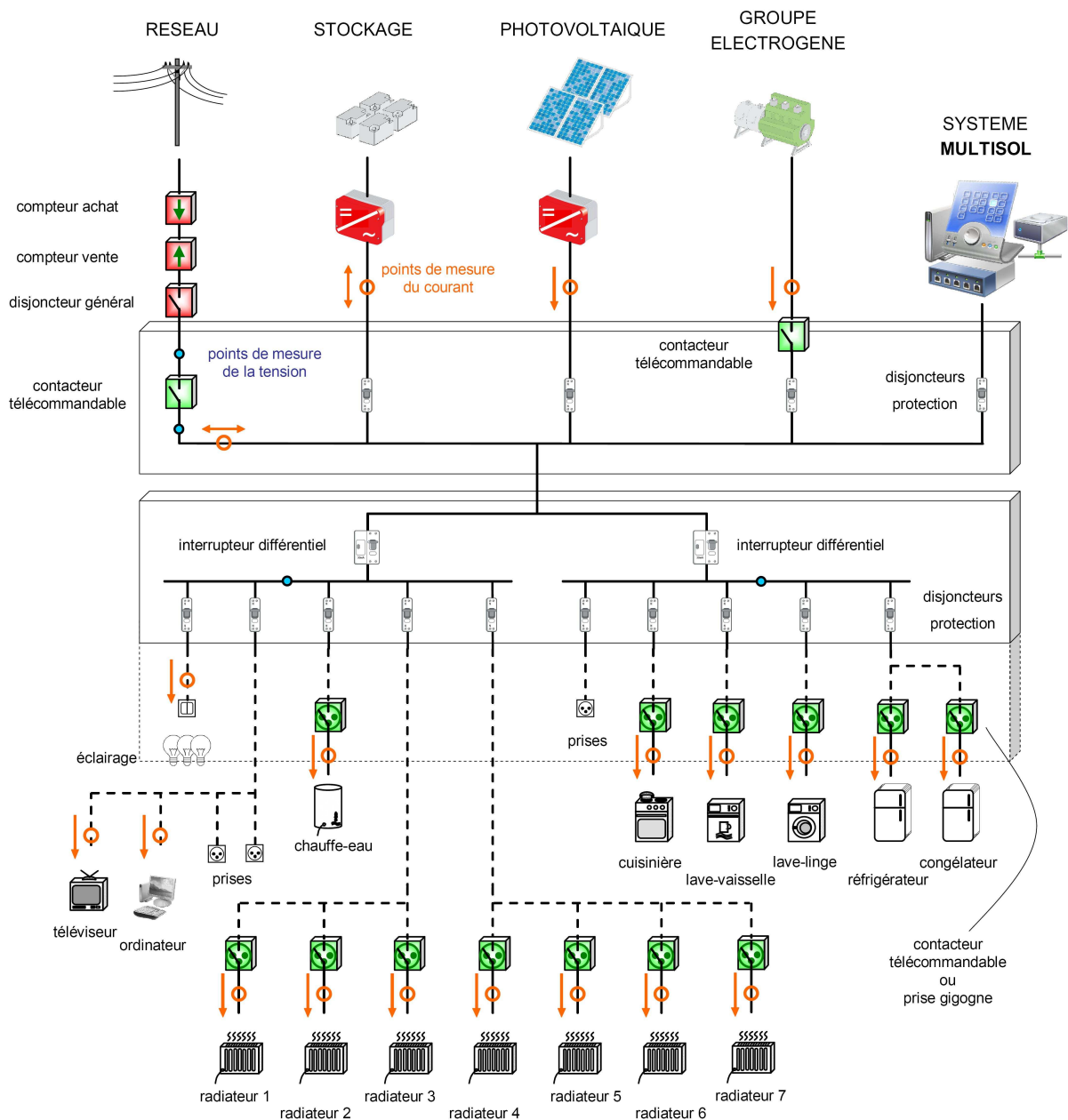


Figure 4.14. Architecture matérielle électrique détaillée avec points de mesure

Du point de vue mesure tension, nous avons essayé de minimiser le nombre de points, évidemment afin de réduire le coût de l'installation. Ainsi, nous n'avons positionné qu'une mesure de tension par jeu de barres ou circuit spécifique (un jeu de barres pour la production et minimum deux pour la consommation [AND 03]). De plus, nous mettrons un autre capteur de tension en amont du contacteur télécommandé du circuit de raccordement au réseau (*Figure 4.14*). Cela nous permettra d'avoir sous observation les deux côtés du contacteur, dans l'hypothèse d'un régime de fonctionnement en îlotage.

En terme de mesures de courant, elles seront indispensables sur tout circuit à piloter ou à superviser. Certains capteurs peuvent être éliminés si nous pouvons avoir d'informations venant des autres dispositifs qui se trouvent sur le même circuit, comme par exemple les onduleurs des systèmes PV et de stockage.

A part les mesures électriques, comme nous verrons par la suite dans ce chapitre, nous aurons besoin d'avoir des mesures d'autre nature, comme :

- mesures thermiques dans les chambres où un réglage optimal plus précis de la température est nécessaire, ou pour l'identification de certains paramètres inconnus de MULTISOL (comme par exemple, l'inertie thermique de la maison)
- mesure de l'ensoleillement et de la température à l'extérieur du bâtiment
- mesure thermique à l'intérieur du réfrigérateur et du congélateur si nous désirons utiliser ces appareils comme moyen de stockage d'énergie, ou si nous avons besoin de mieux surveiller leur comportement en cas de délestage afin de modifier leur priorité
- mesure du débit d'eau chaude consommée
- mesure de la quantité de combustible restante dans le groupe électrogène.

Une autre information qui pourra être intéressante est la détection de la perte du réseau. Cette indication peut être fournie par l'onduleur du système PV et utilisée ensuite par le système de gestion MULTISOL. Evidemment, cela est une hypothèse futuriste, nécessitant l'adaptation de ces onduleurs et l'annulation de l'action de protection « découplage classique » (voir § 3.4) pour permettre un fonctionnement en îlotage de la maison.

4.2.5. Architecture logicielle

L'architecture logicielle du système MULTISOL a pour objectif de permettre l'exécution des différents algorithmes de gestion de l'architecture matérielle proposée précédemment. Cette architecture matérielle repose sur plusieurs types de communications, aussi bien filaires (LAN, courant porteur, ASI) que sans fil (Bluetooth, wifi, wimax, gsm ...), pour faire dialoguer le système expert et prédictif MULTISOL avec plusieurs entités. Ces

entités peuvent se trouver à différentes distances par rapport à la « boîte cerveau ». Ainsi une classification par niveau est effectuée par la suite, en précisant l'éventuelle entité avec laquelle nous communiquons, sa distance et le type de moyen de communication possible (pour le type de communication, les notations F et SF ont été utilisées pour la communication filaire et sans fil) :

➔ ***de/vers l'extérieur de l'habitat :***

- ⚡ site internet/intranet pour les données météo, les données de marche d'électricité, etc. ; F/SF
- ⚡ mesures vers le fournisseur (MULTISOL peut avoir aussi la fonction de compteur intelligent et communicant), confirmation des demandes ; F/SF
- ⚡ consignes provenant du fournisseur ou du gestionnaire de réseau (cas des services système) ; F/SF

➔ ***à l'intérieur de l'habitat :***

⚡ *interface avec l'utilisateur :*

- affichage local
- ordinateur maison ; F/SF
- téléphone portable ; SF
- téléviseur ; F/SF

⚡ *interface avec les capteurs et les actionneurs :*

- dans le même tableau électrique ; F/SF
- dans le tableau électrique supplémentaire ; F/SF
- à distance, dans la prise ou la douille ; F/SF
- modem ou boîte ADSL (pour la connexion internet) ; F/SF
- avec l'appareil communicant ; F/SF.

Il est nécessaire que l'écriture des algorithmes de gestion se fasse indépendamment de la solution technologique adoptée. Pour répondre à ce besoin, l'ensemble des entités manipulées dans le système doit d'abord être défini. Cette définition est réalisée dans le cadre d'une *modélisation du domaine*, proposée par G-SCOP, et présentée dans la *Figure 4.15* [HAD 07]. Ces entités peuvent être classées en deux catégories :

⚡ *Les services*, rendus par le système

⚡ *Les équipements* qui constituent le système et mettent en œuvre ces services.

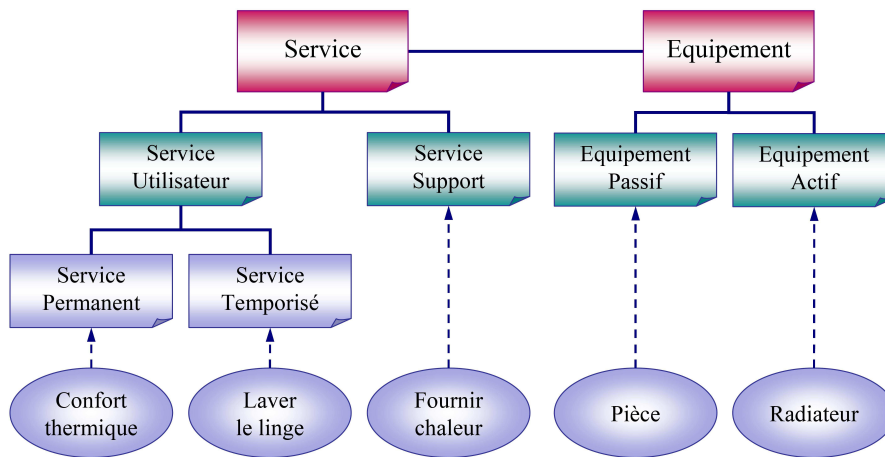


Figure 4.15. Modèle du domaine pour MULTISOL

Chacune de ces deux catégories peut être développée. Ainsi, en ce qui concerne les équipements, les équipements passifs (comme par exemple une pièce) peuvent être distingués des équipements actifs (comme par exemple un radiateur). Pour les services, deux catégories principales ont été définies. En effet, certains services sont directement réalisés pour les utilisateurs alors que d'autres servent de support à la réalisation de ces derniers (ils sont mis en œuvre dans le cadre d'une collaboration entre équipements). Parmi les services fournis à l'utilisateur, les services temporisés comme par exemple « laver le linge » ne sont utilisés que de manière sporadique. Ils se distinguent des services permanents comme par exemple « satisfaire le confort thermique », fourni par une pièce tout au long de la journée.

Un équipement peut fournir un service à un utilisateur ou à un autre équipement. Il peut aussi utiliser un service fourni par un autre équipement pour remplir ses propres services. La réalisation d'un service par un équipement donne lieu à la définition et à l'exécution d'un modèle associé. Ce modèle prend en compte à la fois les aspects comportementaux de la réalisation du service et les aspects énergétiques par l'intermédiaire d'un profil énergétique.

La réalisation informatique de l'architecture du système passe par l'utilisation de *composants logiciels*. Ceux derniers doivent permettre de distribuer les éléments logiciels sur les différents nœuds de l'architecture matérielle présentée en section §4.2.4. La proposition G-SCOP pour les composants logiciels est de les décomposer en trois couches, représentées à la Figure 4.16 [HAD 08] :

- 🔗 La couche cœur contient les informations propres au composant, ses algorithmes, ses données. Lorsque le rôle du composant est de contrôler un équipement, c'est cette couche qui est directement interfacée avec celui-ci.
- 🔗 La couche interface intègre le protocole de communication inter-composant, elle se charge de présenter les données émises par le composant à la couche de communication et d'interpréter les données reçues pour qu'elles soient comprises par le cœur.

- 🔄 La couche communication est spécifique au médium de communication utilisé (courants porteurs, réseau filaire, réseau sans-fil ...), elle est chargée de faire le lien entre la couche interface et le moyen de communication sur lequel elle est connectée.

Pour limiter le nombre de composants et, par la même occasion, la densité des communications, les composants logiciels peuvent être agrégés. Un composant agrégé contient plusieurs cœurs au dessus de la même couche interface. La couche interface, en plus d'établir un dialogue avec des composants extérieurs à l'agrégat à travers la couche de communication, permet aux différents cœurs de communiquer de manière transparente, sans utiliser la couche communication.

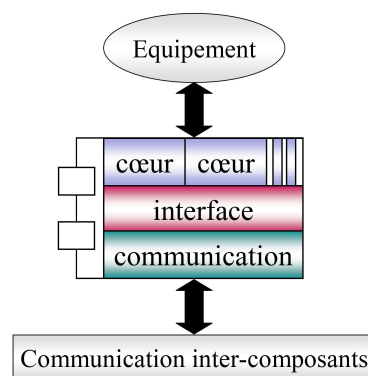


Figure 4.16. Composants logiciels

Les composants ainsi définis rendent possible la mise en place d'une infrastructure permettant la gestion du système complet. Des types de composants peuvent alors être définis conformément à la modélisation du domaine (Figure 4.15). Des composants représentant les services seront donc créés, tout comme des composants représentant les équipements. L'association d'un composant équipement avec l'ensemble des composants services qui lui sont associés constitue un *ensemble équipement*.

La décomposition d'un ensemble équipement en plusieurs composants permet de distribuer les différents composants dans de lieux différents. Ainsi, dans le cas d'un équipement ne possédant qu'une puissance de traitement limitée, seule la partie contrôle/commande, regroupée dans le composant équipement, sera localisée dans l'équipement lui-même. Les composants service pourront être exécutés dans un nœud de traitement plus évolué, situé dans l'armoire électrique ou dans un PC. Dans le cas d'un équipement disposant d'une puissance de traitement plus importante, tous les composants service et équipement peuvent être regroupés. Pour limiter les communications, ces différents composants sont agrégés.

En plus des composants définis à partir du modèle du domaine, d'autres composants sont nécessaires à la mise en place de l'infrastructure informatique. Il s'agit des composants système. Quatre composants système ont ainsi été identifiés :

- ☞ *Un composant annuaire* permet, comme son nom l'indique, de chercher un composant. Cette recherche pouvant se faire selon le nom du composant et les services qu'il propose. Le système d'annuaire servira de base à la définition des mécanismes plug-and-play offerts par le système.
- ☞ *Un composant pont* permet de passer d'un medium de communication à un autre, un tel composant a la particularité d'avoir deux couches communication et pas de cœur (l'interface sert à passer d'un medium à l'autre). (v. *Figure 4.16*)
- ☞ *Des composants IHM* (Interface Homme/Machine) servent d'interface avec l'utilisateur.
- ☞ *Des composants solveurs* traitent les problèmes d'optimisation [HAD 07].

4.2.6. Modélisation

Comme mentionné plus haut, pour un équipement donné il existe plusieurs types de modèles qui devront être développés. Cette diversification apparaît comme consécutive aux différences de dynamique et de précision désirées que nous retrouvons entre les étapes de développement du projet : algorithmes de dimensionnement, algorithmes prévisionnels, algorithmes réactifs et validation temps-réel de ceux-ci. Dans les paragraphes qui suivent, seront présentés les principaux modèles réalisés au cours de cette thèse, en mentionnant chaque fois l'étape pour laquelle il est utilisable.

4.2.6.1. Modélisation des sources

Comme le sujet de cette thèse porte sur les systèmes de génération non conventionnels, des travaux ont été menés sur la conception des modèles du système solaire photovoltaïque (PV). Par ailleurs, d'autres modèles ont été élaborés par les divers partenaires, comme par exemple, pour le système de stockage ou le groupe électrogène.

4.2.6.1.1. Système photovoltaïque

Le modèle général du système de génération PV implémenté est constitué, comme présenté dans *Figure 4.17*, par :

- ☞ Le modèle du **module PV** - ses entrées sont : l'éclairement global dans le plan du module (G), la température ambiante (T_{amb}) et la tension à ses bornes (V_{mpv}), fixée par le hacheur.

Les sorties du module sont : le courant généré (I_{mpv}) ainsi que la température de la cellule (T_{cel}), qui sera utilisée par la suite par l'algorithme de suivi du maximum de puissance (MPPT - Maximum Power Point Tracking) implémenté.

- 🌀 Le modèle du **hacheur** qui a comme rôle d'élever la tension continue à une valeur imposée. Ses entrées comportent : le courant donné par le module PV (I_{mpv}) et les ordres de commande donnés par le système de contrôle (u_{hac}). Ses sorties sont le courant I_{hac} et la tension V_{mpv} .
- 🌀 Le modèle de l'**onduleur et du bus continu**, ayant le rôle de transformer le courant continu généré dans un courant alternatif, à la fréquence du réseau. Ses entrées sont : le courant en sortie du hacheur (I_{hac}), la tension du réseau (V_{res}), ainsi que les deux ordres de commande (u_{ond} et u_{hac}). Il comprend comme sorties le courant injecté dans le réseau (I_{res}) et les paramètres du bus continu (V_{dc} et I_{dc}).
- 🌀 La partie de **contrôle/commande** qui génère les ordres u_{ond} et u_{hac} .

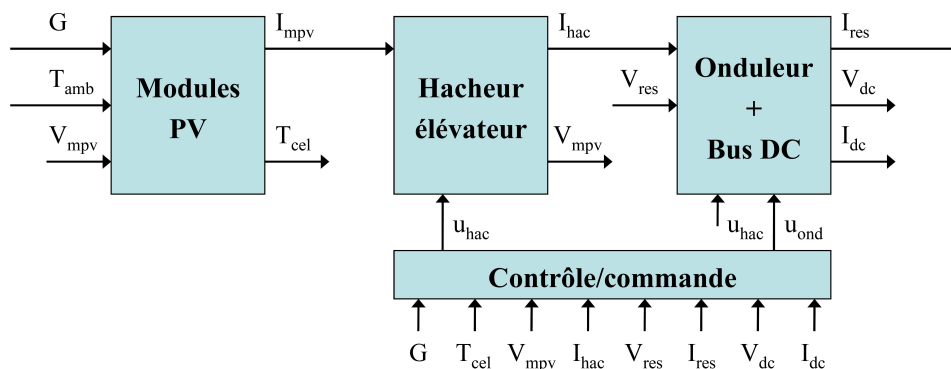


Figure 4.17. Structure générale du modèle du système PV

Chacun de ces éléments sera détaillé par la suite dans ce paragraphe.

➤ **Le module photovoltaïque**

Le modèle utilisé pour le module PV a été choisi suite à des études effectuées par l'INES (Institut National de l'Energie Solaire) sur plusieurs modèles trouvés dans la littérature. Ceux-ci ont été comparés et validés avec des mesures réelles sur différentes journées d'éclairement variable (fort, faible ou moyen), et pour différents types de modules au silicium cristallin (monocristallin et polycristallin, de différentes marques). Les résultats montrent qu'aucun modèle ne sort vraiment du lot de façon générale, mais nous avons finalement choisi celui qui est présenté ci-dessous [AHM 03].

Le modèle est fondé sur le comportement électrique et thermique d'une cellule (*Figure 4.18*). N_s et N_p représentent le nombre des cellules en série et en parallèle, respectivement.

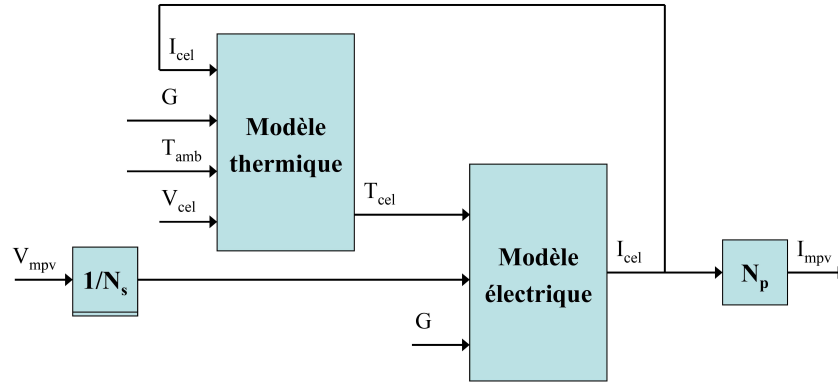


Figure 4.18. Modèle du module PV

Le schéma du modèle électrique est donné sur la *Figure 4.19* et décrit par les équations éq 4.1 à éq 4.4.

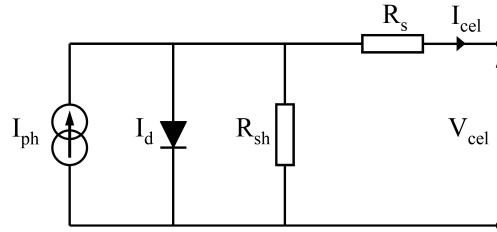


Figure 4.19. Modèle électrique d'une cellule PV

$$I_{cel} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{cel} + R_s \cdot I_{cel}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{cel} + R_s \cdot I_{cel}}{R_{sh}} \quad (\text{éq 4.1})$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_r} \cdot [I_{sc} + \alpha \cdot (T_{cel} - T_r)] \quad (\text{éq 4.2})$$

$$I_0 = I_{0r} \cdot \left(\frac{T_{cel}}{T_r} \right)^3 e^{\left[\frac{q \cdot E_g}{k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{cel}} \right) \right]} \quad (\text{éq 4.3})$$

$$V_t = \frac{n \cdot k \cdot T_{cel}}{q} \quad (\text{éq 4.4})$$

Où : I_{cel} – courant généré par la cellule [A] ;

- I_{ph} – courant photo-généré [A] ;
- I_0 – courant de saturation inverse de la diode [A] ;
- V_{cel} – tension aux bornes de la cellule [V] ;
- R_s, R_{sh} – résistance série et shunt [Ω] ;
- V_t – tension thermodynamique [V] ;
- G – éclairement global dans le plan de la cellule [W/m^2] ;
- G_r – éclairement global de référence [W/m^2] ;
- I_{sc} – courant de court-circuit [A] ;
- α – coefficient de variation de I_{sc} avec la température [$A/^\circ C$] ;
- T_{cel} – température de la cellule [K] ;
- T_r – température de référence [K] ;
- I_{0r} – courant de saturation inverse de référence de la diode [A] ;
- q – charge de l'électron [C] ;
- k – constante de Boltzman [J/K] ;
- n – facteur d'idéalité de la jonction [-].

Parmi les grandeurs énumérés ci-dessus nous retrouvons : R_s, R_{sh}, α et n comme paramètres du modèle. Par l'adaptation de ceux-ci, le modèle peut être corrigé afin de se rapprocher encore plus des caractéristiques des différents panneaux physiques.

Le processus d'échauffement/refroidissement de la cellule (le modèle thermique) est géré par le bilan énergétique. La vitesse de variation de l'énergie interne de la cellule est égale à la puissance thermique nette absorbée, comme exprimé dans l'équation *éq 4.5* [LIU 02].

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT_{cel}(t)}{dt} = \frac{[v_{cel}(t) - v_d(t)]^2}{R_s} + \frac{[v_{cel}(t)]^2}{R_{sh}} + i_d(t) \cdot v_d(t) + (1 - \rho - \tau - \eta) \cdot A \cdot G(t) - h_c(t) \cdot A \cdot [T_{cel}(t) - T_{amb}] \quad (\text{éq 4.5})$$

$$\eta = \frac{I_{ph} \cdot v_d(t)}{A \cdot G(t)} \quad (\text{éq 4.6})$$

- Où : m – masse [kg] ;
- c_p – chaleur spécifique [J/(kg K)] ;
- v_d – tension de la jonction [V] ;
- i_d – courant de la diode [A] ;

- ρ – coefficient de réflexion [-] ;
- τ – coefficient de transmission [-] ;
- η – rendement quantique du procès photovoltaïque [-] ;
- A – surface active [m²] ;
- h_c – coefficient de refroidissement effectif [W/(m²·K)].

Dans ce bilan (éq. 4.5), si nous regardons la partie droite de l'égalité, les trois premiers termes représentent les pertes internes, le quatrième correspond à l'échauffement direct provenant du soleil, tandis que le dernier terme est l'équivalent des pertes causées par le système de refroidissement. A partir de cette équation nous pouvons déterminer la température de la cellule (T_{cel}).

L'influence des grandeurs d'entrée et de chaque paramètre du modèle sur les caractéristiques de courant (V-I) et de puissance (V-P), peut être visualisée dans l'ANNEXE D. Ces caractéristiques ont été obtenues par simulation sous Matlab/Simulink, pour un module PV de 36 cellules en série. Les paramètres physiques du module sont réels, obtenus à partir d'une fiche produit d'un module commercialisé par Photowatt (Photowatt PWX500 - 12V) [PHO 05]. Comme montré sur la Figure 4.20, avec le bon set de paramètres du modèle (R_s , R_{sh} et n), les courbes résultantes par simulation se rapprochent bien des courbes données par le constructeur dans le prospect, permettant ainsi de valider le modèle conçu.

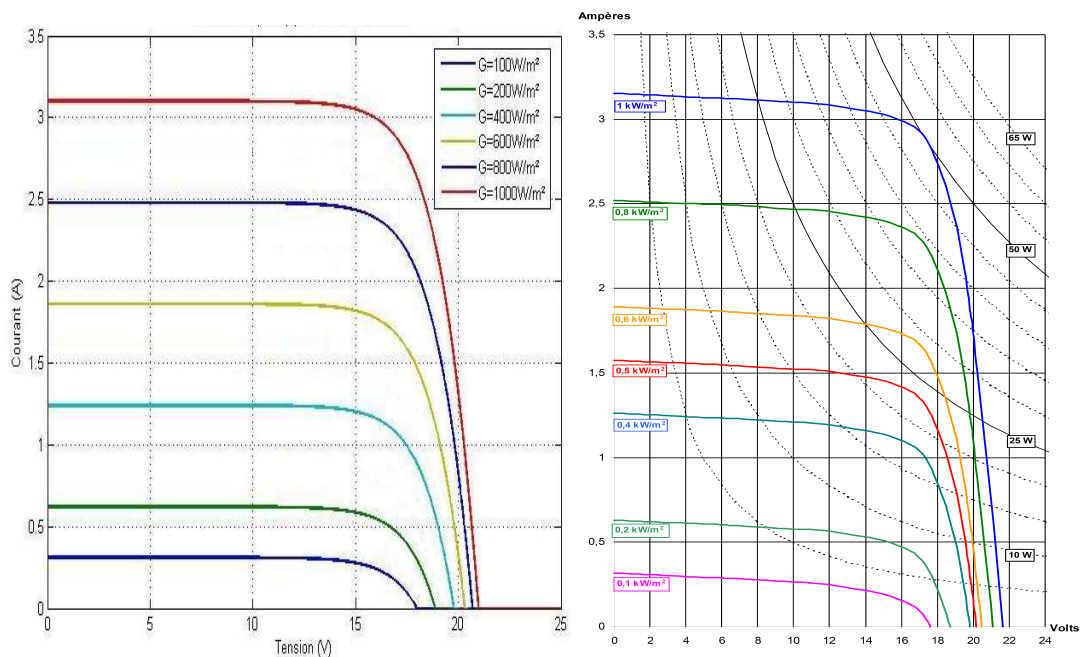


Figure 4.20. Validation du modèle PV par comparaison des courbes simulées (à gauche) avec des courbes constructeur (à droite)

Le modèle fondé sur le comportement d'une cellule peut être utilisé aussi afin d'émuler le comportement d'un champ PV (plusieurs modules) en prenant en compte des situations de fonctionnement en mode dégradé, comme : effet d'ombre, partie des cellules défectueuses, etc. Sur la *Figure 4.21* est présenté l'exemple de 6 modules montés en parallèle (chacun avec 36 cellules en série) dont un présente un certain nombre de cellules avec défaut. Ce type de régime peut être utilisé pour le test de la robustesse des systèmes de MPPT, certains pouvant être trompés par les points d'optimum locaux [STE 93].

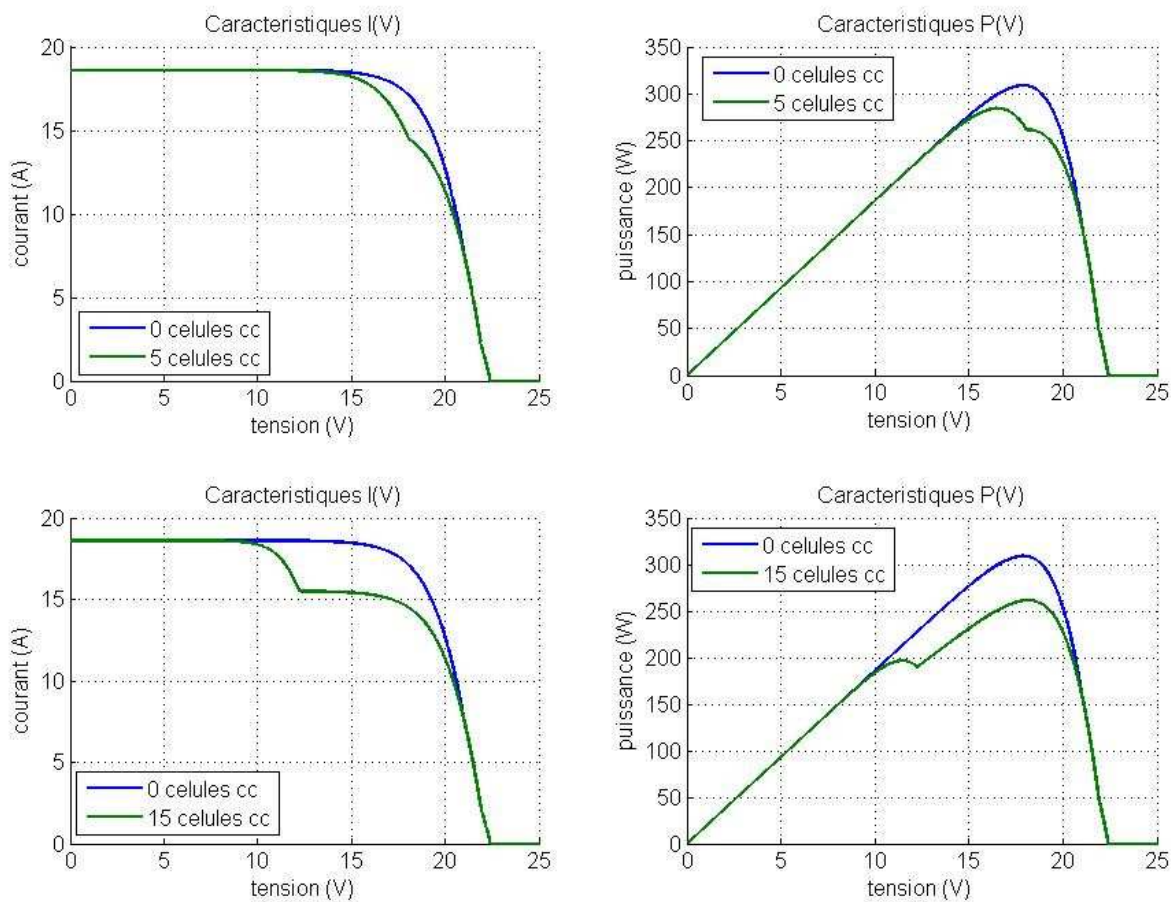


Figure 4.21. Résultats des simulations - fonctionnement en mode dégradé

➤ Le système d'interfaçage

Le modèle utilisé pour le système d'interfaçage des modules PV est présenté sur la *Figure 4.22*. Il comporte un hacheur élévateur, un bus continu et un onduleur. Le modèle est décrit par les équations *éq. 4.7* à *éq. 4.10*, données par la suite.

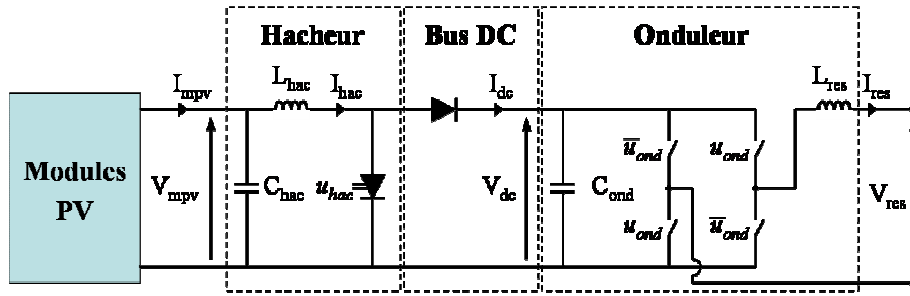


Figure 4.22. Schéma électrique du système d'interfaçage des modules PV

$$C_{hac} \frac{dV_{mpv}}{dt} = I_{mpv} - I_{hac} \quad (\text{éq 4.7})$$

$$L_{hac} \frac{dI_{hac}}{dt} = V_{mpv} - V_{dc} \cdot (1 - u_{hac}) \quad (\text{éq 4.8})$$

$$C_{ond} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{hac} \cdot (1 - u_{hac}) - I_{res} \cdot u_{ond} \quad (\text{éq 4.9})$$

$$L_{res} \frac{dI_{res}}{dt} = V_{dc} \cdot u_{ond} - V_{res} \quad (\text{éq 4.10})$$

Le contrôle de ces structures est réalisé, comme nous pouvons observer sur la *Figure 4.23*, sur deux niveaux : un niveau approché, qui génère les ordres de commande u_{ond} et u_{hac} , ainsi qu'un niveau supérieur, qui, suite à l'application d'une méthode de suivi du maximum de puissance (MPPT), va donner la référence pour la tension du module PV (V_{mpv}^*).

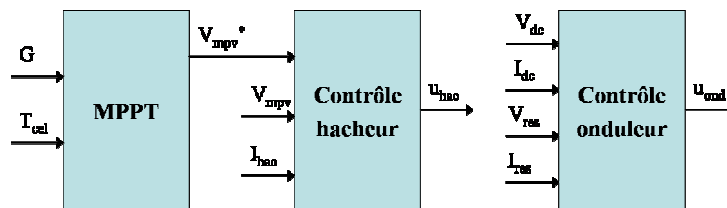


Figure 4.23. Schéma générale de contrôle/commande du système PV

Le contrôle du hacheur est réalisé en deux couches, comme montré sur la *Figure 4.24* :

- une boucle intérieure qui régule le courant I_{hac} , l'erreur étant corrigée par un correcteur de type hystérésis - qui donne la fonction de commutation du hacheur, u_{hac} ;
- une boucle supérieure dédiée à l'asservissement de la tension du module PV (V_{mpv}), l'erreur étant traitée à l'aide d'un correcteur proportionnel-intégral (PI).

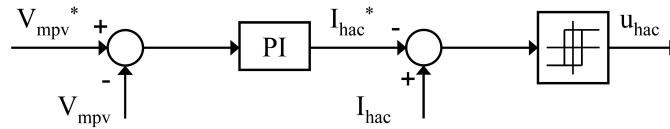


Figure 4.24. Schéma de contrôle/commande du hacheur

En ce qui concerne l'onduleur, son contrôle est réalisé en trois étapes (Figure 4.25) :

- une boucle intérieure qui régule le courant envoyé au réseau (I_{res}), l'erreur étant corrigée par un correcteur de type hystérésis - qui donne la fonction de commutation de l'onduleur (u_{ond}) ;
- une boucle supérieure dédiée à l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}), l'erreur étant traitée à l'aide d'un correcteur proportionnel-intégral (PI) - qui donne la référence de courant du bus continu I_{dc}^* ; la tension de référence pour le bus continu est fixée à une valeur constante ;
- à partir de la référence et de la mesure du courant du bus continu (I_{dc}^* et I_{dc}), ainsi que la phase de la tension du réseau (V_{res}) nous déterminons la référence du courant envoyé au réseau (I_{res}^*) ; la phase de la tension du réseau peut être déterminée à l'aide d'un PLL (Phase Locked Loop).

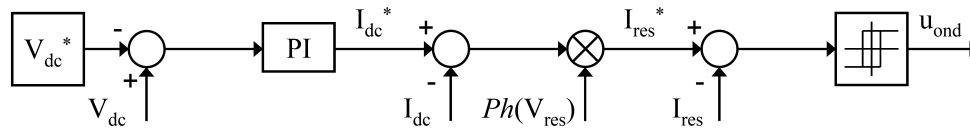


Figure 4.25. Schéma de contrôle/commande de l'onduleur

En ce qui concerne le *suivi du maximum de puissance* (MPPT), une méthode analytique a été utilisée [ORT 04]. Cette méthode, appelée LRCM (Linear Reoriented Coordinates Method), a l'avantage de fournir un nouveau moyen simple de déterminer la tension optimale (V_{mpv}^*) et le maximum de puissance (P_{mpp}) produit par un panneau solaire photovoltaïque et son système d'interfaçage. Ces deux paramètres (P_{mpp} et V_{mpv}^*) peuvent être estimés en utilisant les mêmes variables que le modèle dynamique sans utiliser d'approximations ou compliquer la série de Taylor. L'idée est de trouver le point de coude de la courbe I-V, le courant et la tension optimale étant ceux qui donnent la puissance maximale.

La tension de référence (V_{mpv}^*), nécessaire pour le contrôle du hacheur (v. Figure 4.23), sera donc calculé analytiquement à partir de l'éclairement (G), de la température de la cellule (T_{cel}) et d'autres paramètres du module PV.

La *Figure 4.26* montre les résultats des simulations effectuées afin de tester la robustesse de la méthode de MPPT choisie. Des essais ont été effectués en variant l'éclairement (premier set horizontal de courbes), la température de la cellule (deuxième set horizontal de courbes), ainsi que le facteur d'idéalité de la jonction (dernier set horizontal de courbes). Pour chaque set nous avons présenté les caractéristiques I-V et P-V, de même que l'erreur relative entre la puissance donnée par le MPPT et la puissance maximale réelle.

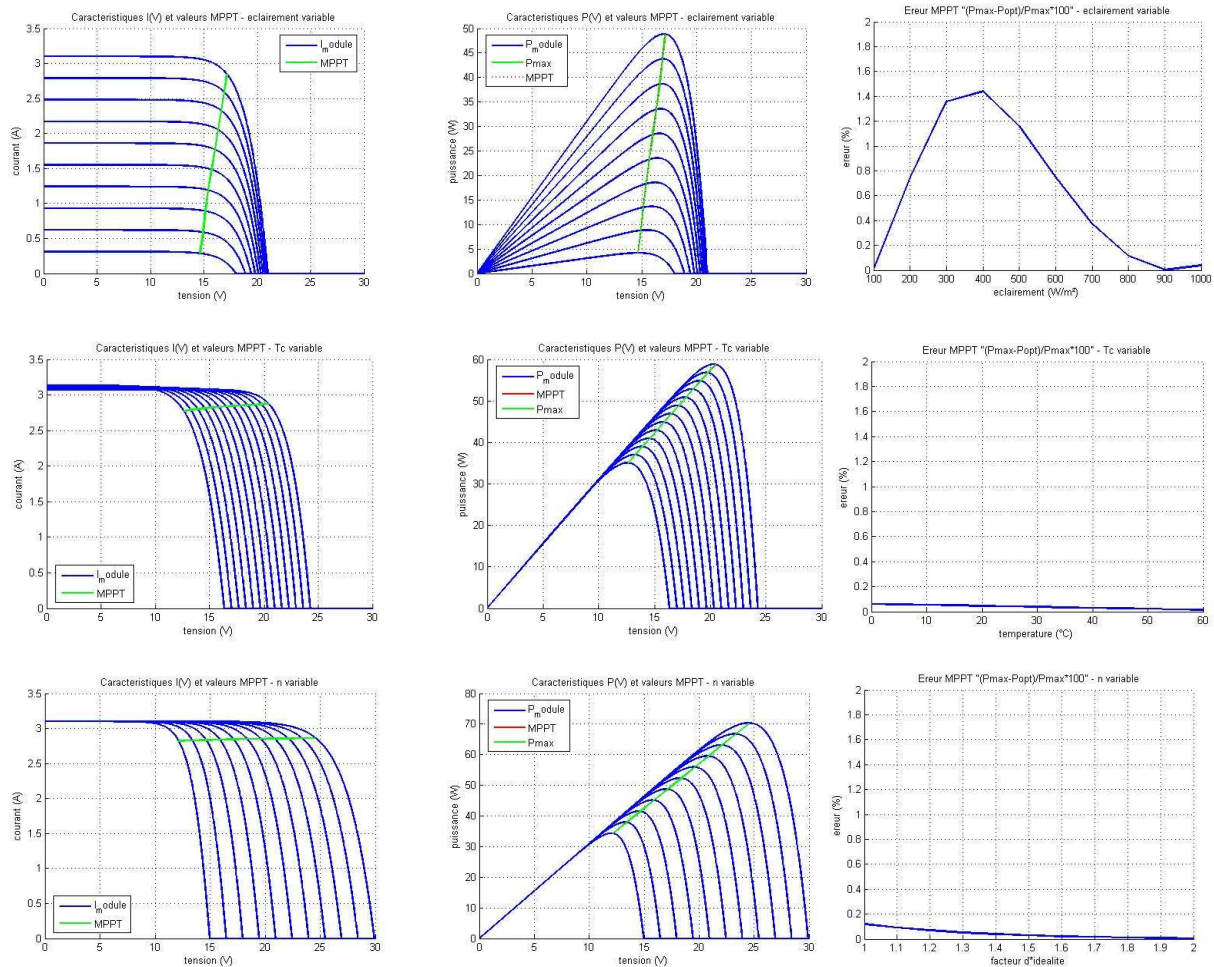


Figure 4.26. Test de la robustesse de l'algorithme de MPPT

Comme nous pouvons remarquer, en régime normal de fonctionnement (sans cellules défectueuses, voir *Figure 4.21*) la méthode choisie est très robuste, l'erreur ne dépassant pas la valeur de 1,5%. On peut même dire que cet algorithme est immunisé par rapport aux variations des deux derniers paramètres (T_{cel} et n).

Toutefois, cette approche n'est pas facilement utilisable en réalité car elle nécessite la connaissance (mesure) de l'éclairement. De plus, elle n'est pas complètement adaptée pour les régimes avec défauts, mais comme ce n'est pas le but du projet MULTISOL d'étudier ce type

de situations, cela est suffisant dans notre cas d'étude. L'avantage de la modularité du modèle conçu est le fait que la partie MPPT peut être facilement changée avec toute autre méthode mieux adaptée pour d'autres applications envisagées.

Le modèle du système PV présenté plus haut a été implémenté en Matlab/Simulink et adapté ensuite pour le calcul en temps réel avec RT-LAB. Le modèle est précis et stable, mais il faut mentionner le temps de calcul significatif en version hors temps-réel (Simulink), dû au pas de temps fin, nécessaire pour un bon fonctionnement. En version temps-réel, un pas de temps de $20\mu\text{s}$ est utilisé, et un exemple de résultats est présenté sur *Figure 4.27* (courbes récupérées sur un oscilloscope aux sorties analogiques du simulateur temps-réel - RT-LAB).

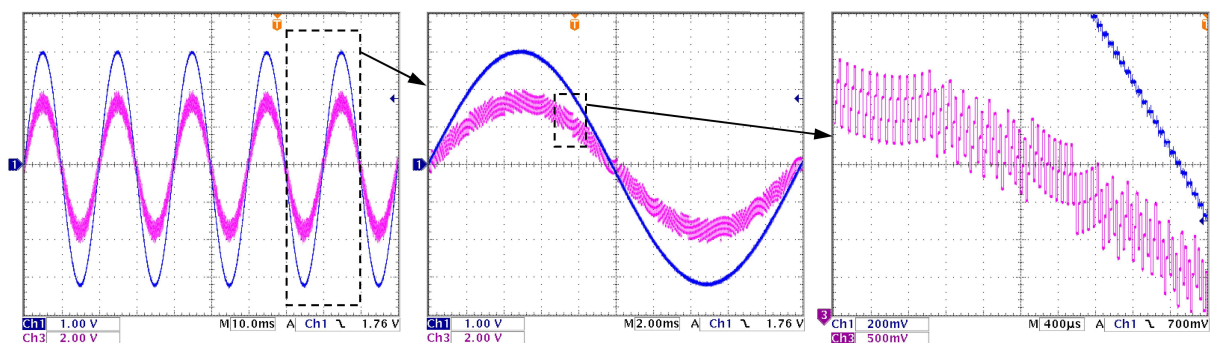


Figure 4.27. Tension du réseau (courbe en bleu) et courant généré par le système PV (courbe en rose) – Résultats issus de la simulation temps-réel

4.2.6.1.2. Réseau

Dans un premier temps, pour les premiers essais de validation du système conçu, le réseau de distribution est modélisé par une simple source de tension pilotable avec un interrupteur contrôlé en sur-courant (limité à la valeur imposée par l'abonnement). La source est pilotable afin de pouvoir effectuer divers types de défauts amonts, comme par exemple : des coupures d'alimentation, des creux de tension, des variations de fréquence, etc. Par contre, en plus du comportement électrique, il est nécessaire de modéliser aussi des éléments comme : la tarification dynamique de l'énergie consommée et/ou produite, des consignes venant du fournisseur d'énergie ou du gestionnaire du réseau, etc.

A l'avenir, il sera possible de monter encore plus en complexité et de détailler le réseau de distribution, de générer d'autres types de défauts (comme par exemple variations de l'impédance du réseau, v. § 3.4), d'introduire plusieurs maisons disposant ou pas des systèmes MULTISOL, d'introduire d'autres types de producteurs d'énergie renouvelable, etc.

4.2.6.2. Modélisation des charges

La nécessité de modéliser les charges est indispensable vu le besoin de bien dimensionner la consommation, prévoir ses variations et gérer de manière optimale et en temps-réel, les flux de puissances. Les modèles nécessaires pourront être plus simples ou plus complexes en fonction de la problématique que l'on envisage. Ainsi, nous identifions quatre types de problématique :

- ⚡ Dimensionnement en terme de quantification de la consommation ;
- ⚡ Prévion des modifications de la consommation en fonction de certains facteurs (comportement de l'utilisateur, changements des conditions météo...) afin de gérer de façon optimale les flux énergétiques ;
- ⚡ Réalisation de corrections en temps-réel face aux événements imprévus ;
- ⚡ Validation du système de gestion sur un démonstrateur fondé sur le simulateur temps-réel (RT-LAB).

Des modèles ont été réalisés pour le calcul hors temps-réel en Matlab/Simulink pour : l'éclairage, la table de cuisson, le four à micro-ondes, la bouilloire, le grille-pain, la cafetière, le four, le téléviseur, l'ordinateur, le lave-linge, le lave-vaisselle, le chauffage, le chauffe-eau, le réfrigérateur et le congélateur. Les modèles réalisés sont sous forme de blocs ayant comme sorties les puissances actives et réactives. A partir de ces deux dernières, nous pouvons construire des modèles de type « injecteur de courant » pour l'utilisation avec le module SimPowerSystems de Matlab/Simulink. Ces modèles ont un comportement en fonction de P, Q et de la tension d'alimentation.

A part le modèle du chauffage et du lave-linge, la majorité des modèles présentés par la suite est compatible avec la problématique de dimensionnement et utilisable pour la construction des courbes de charges. Pour passer au calcul en temps-réel certaines modifications doivent être effectuées, comme présenté sur le cas du lave-linge. Les modifications nécessaires pour la prévion et sa correction en réactive seront présentées cas par cas.

Chaque modèle a une fenêtre de configuration qui permet :

- ⚡ l'introduction des différentes valeurs (temps de démarrage de l'équipement, période de fonctionnement ...) ;
- ⚡ le choix des différents paramètres (comme, par exemple, le niveau de puissance pour une plaque de cuisson).

Toutes ces fenêtres de configuration vont être détaillées par la suite pendant la présentation de chaque modèle réalisé.

4.2.6.2.1. Eclairage

Dans un premier temps, a été réalisé un modèle pour l'éclairage à base de lampes à incandescence. C'est-à-dire une charge purement résistive. La fenêtre de configuration du modèle conçu pour l'éclairage est présentée dans la *Figure 4.28*. Sur la *Figure 4.29*, nous pouvons visualiser les deux premiers créneaux configurés dans cette fenêtre.

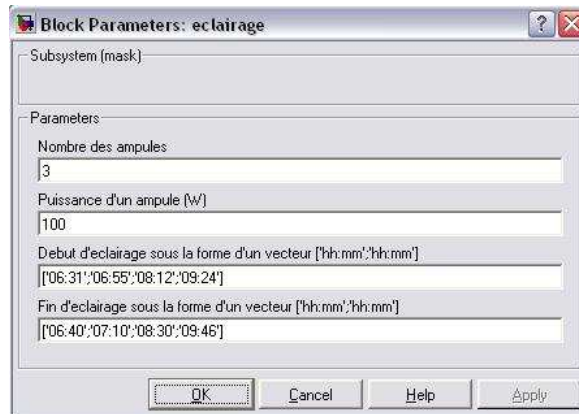


Figure 4.28. Fenêtre de configuration pour l'éclairage

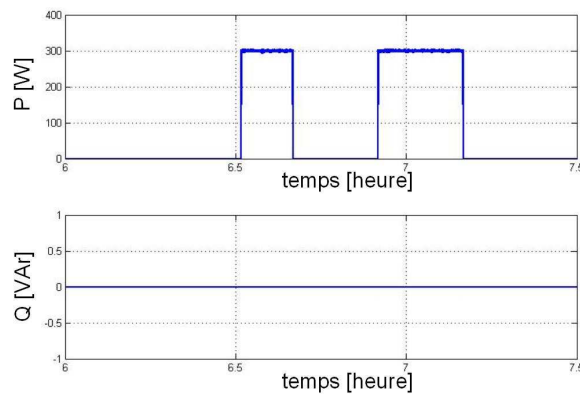


Figure 4.29. Exemple de sortie du bloc éclairage

Nous pouvons remarquer les paramètres sur lesquels il est possible d'agir :

- 🔄 *le nombre d'ampoules* - en fonction du niveau de détail désiré, nous pouvons utiliser plusieurs blocs pour la même lampe (par exemple, pour une lampe à 5 ampoules 100W, avec un interrupteur double - 2 et 3 ampoules -, nous pouvons utiliser deux blocs afin d'obtenir les trois différents niveaux de puissance : 200W, 300W ou 500W) ;
- 🔄 *la puissance d'une ampoule* - elle détermine la consommation de la lampe ;

↻ le début et la fin de la période d'éclairage - avec ces deux paramètres, nous fixons les créneaux de fonctionnement de l'éclairage.

Nous considérons que l'éclairage est une charge de type non-pilotable à cause de son fort impact sur le confort de l'utilisateur et sur sa sécurité. A l'avenir, il va falloir réaliser des modèles pour l'éclairage, basés sur d'autres technologies de lampes (fluorescentes, compactes...).

4.2.6.2.2. Table de cuisson et four électrique

La plaque électrique de cuisson est une charge constituée essentiellement par une résistance chauffante. La puissance appelée par cette résistance est régulée en tout ou rien par un thermostat. La plaque électrique est à priori un consommateur purement résistif. Toutefois, à partir de courbes expérimentales, nous avons constaté l'existence de pics de puissance réactive (quelques dizaines de VAR), absorbés pendant les transitoires (*Figure 4.31*).

A cause de la complexité du modèle et de la multitude de paramètres inconnus (comportement thermique de la plaque, comportement thermique de l'objet à chauffer...), le modèle a été conçu à partir de courbes expérimentales fournies par GIE IDEA. Mais nous ne disposons que d'un set des courbes. Ainsi, nous ne connaissons pas tout à fait la modification du comportement en fonction de la variation des différents paramètres (comme par exemple le niveau de cuisson). Ce modèle reste donc à valider en faisant d'autres mesures.

Comme précédemment, nous présentons dans la *Figure 4.30* la fenêtre de configuration du modèle.

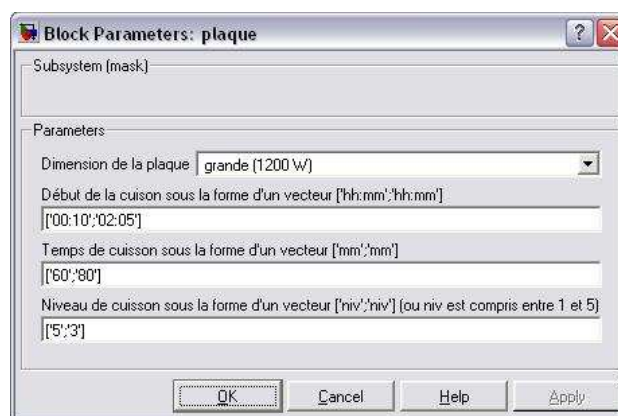


Figure 4.30. Fenêtre de configuration pour la plaque électrique de cuisson

Les paramètres d'interface sont les suivants :

- 🔗 *la dimension de la plaque (petite ou grande)* - correspond au choix de la puissance de la plaque, la correspondance entre la dimension de la plaque et sa puissance étant modifiable à l'intérieur du modèle ; pour une table de cuisson composée de plusieurs plaques, plusieurs modèles seront utilisés ;
- 🔗 *le début et la durée de la cuisson* - comme dans le cas de l'éclairage, avec ces deux paramètres nous pouvons fixer plusieurs créneaux de fonctionnement de la plaque ;
- 🔗 *le niveau de cuisson* - compris entre 1 et 5, il agit sur la durée du chauffage initial de la plaque et sur la dimension des créneaux qui suivent (*Figure 4.31*).

Sur la *Figure 4.31* sont présentés les courbes de puissance (active et réactive) correspondant à un premier cycle de fonctionnement (début de cuisson 00:10, temps de cuisson 60min, niveau de cuisson 5). Nous remarquons une première partie qui correspond à l'étape de chauffage initial de la plaque, jusqu'à la température de référence. Dans la deuxième partie, le thermostat commence à réguler le fonctionnement de la plaque en concordance avec le niveau de cuisson choisit. Ce dernier fixe aussi la durée de la première partie du comportement.

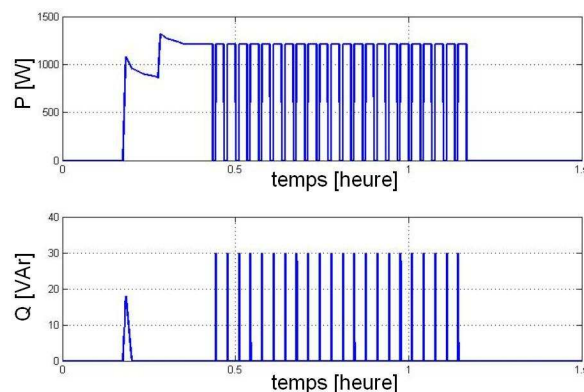


Figure 4.31. Exemple de sortie du bloc plaque électrique de cuisson

La table de cuisson est aussi une charge non-pilotable, son usage étant directement influencé par le comportement (le rythme de vie) de l'utilisateur. Nous pouvons suggérer à l'utilisateur de faire la cuisine quand c'est le plus avantageux du point de vue économique (prix de l'électricité), mais nous ne pouvons pas le lui imposer. Par contre, en situation d'urgence il doit être possible de délester ce consommateur.

Dans une étape suivante, un modèle basé sur le transfert thermique, sera plus indiqué. En utilisant ce type de représentation, il est possible de mieux prendre en compte l'inertie thermique, ainsi que l'influence des plaques électriques au chauffage de la maison.

Les mêmes considérations sont valables pour le four électrique, qui a un comportement identique à celui de la table à cuisson. Sa gamme de puissances est comprise entre 1kW et 3-4kW.

4.2.6.2.3. Four à micro-ondes

Le modèle du four à micro-ondes est obtenu de la même manière que celui de la table de cuisson, à partir des courbes expérimentales.

La fenêtre de configuration est présentée dans la *Figure 4.32*. Les paramètres d'interface sont :

- 🔄 *le début et la durée de la cuisson* - ces deux paramètres peuvent déterminer plusieurs créneaux de fonctionnement du four ;
- 🔄 *le niveau de cuisson* - compris entre 1 et 5, il agit sur la durée de chauffage initial et sur la dimension des créneaux qui suivent (*Figure 4.33*).

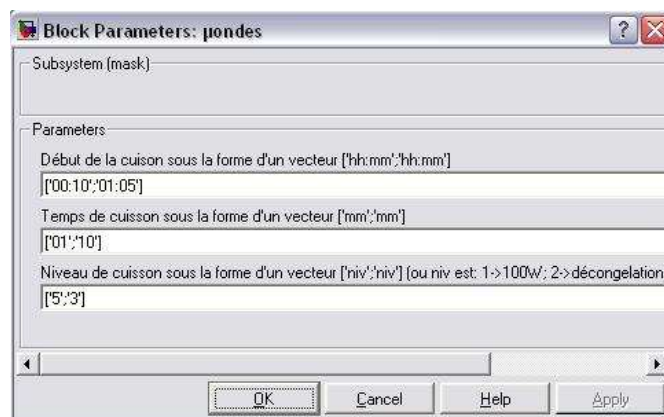


Figure 4.32. Fenêtre de configuration pour le four à micro-ondes

Dans le cas de ce dispositif, nous constatons que la puissance réactive absorbée est assez importante par rapport à celle active (approximativement 50%). Par conséquent, la question se pose : « quelle courbe de charge est la plus représentative pour les prévisions : puissance active ou puissance apparente ? ».

Le four à micro-ondes est aussi une charge non-pilotable, ayant les mêmes caractéristiques que la table de cuisson.

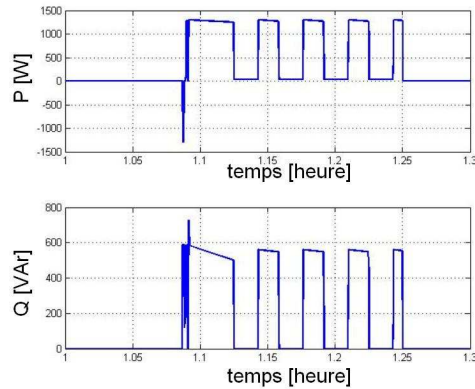


Figure 4.33. Exemple de sortie du bloc four à micro-ondes

4.2.6.2.4. Bouilloire, Grille-pain, Cafetière

Ces petits dispositifs ont un fonctionnement de courte durée mais avec des puissances absorbées importantes (autour de 1-1,5kW chacun). Leur principe de fonctionnement est basé sur la résistance chauffante, ainsi une consommation principalement de puissance active le caractérise. Néanmoins, la cafetière présente un comportement particulier, sa courbe de charge ayant une première partie qui correspond à l'élaboration du café et une seconde qui est destinée à maintenir le café chaud un certain temps.

Pour la bouilloire et la cafetière, il y a nécessité de connaître la dépendance entre la quantité d'eau à chauffer, la puissance du dispositif et le temps nécessaire pour l'ébullition.

4.2.6.2.5. Téléviseur et Ordinateur

Le modèle du téléviseur est réalisé également à partir des courbes expérimentales. Comme nous pouvons voir dans la *Figure 4.35*, il est caractérisé par une puissance réactive importante par rapport à la puissance active (environ deux fois). On revient ainsi à la même question que dans le cas du four à micro-ondes : « *quelle courbe de charge est caractéristique ?* ». De plus, il y a une puissance de mise en veille considérable.

La fenêtre de configuration du téléviseur est assez simple (*Figure 4.34*), avec comme paramètres uniquement : *le début et la durée de la visualisation*.

Le pilotage du téléviseur pendant son fonctionnement n'est pas envisagé, en raison du fait qu'il est un équipement de confort pour l'utilisateur. Nous pouvons envisager un « pilotage » du téléviseur en interrompant son alimentation pendant la mise en veille, afin de réduire sa consommation. Toutefois il est possible encore une fois d'entrer en conflit avec le confort de l'utilisateur, plus exactement avec les fonctionnalités de type réveil ou

programmation pour l'enregistrement. Nous restons ainsi réticents par rapport à cette idée, considérant le téléviseur comme une charge non-pilotable.

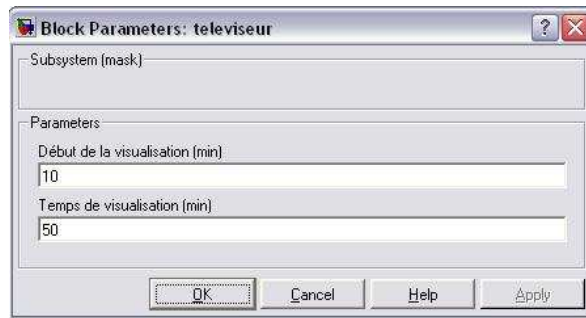


Figure 4.34. Fenêtre de configuration pour le téléviseur

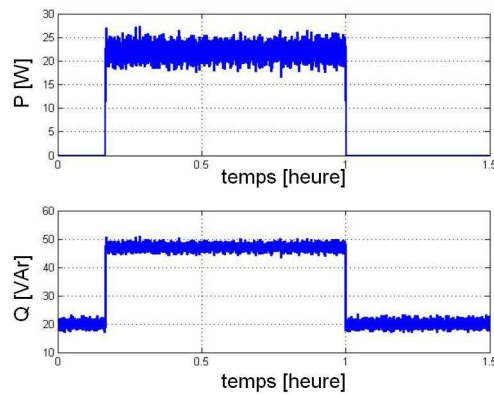


Figure 4.35. Exemple de sortie du bloc téléviseur

Le modèle d'un ordinateur est presque identique à celui du téléviseur.

4.2.6.2.6. Lave-linge

Le modèle conçu pour le lave-linge consiste, comme précédemment, en reproduire le comportement d'un tel dispositif à partir des courbes expérimentales. La fenêtre de configuration du modèle du lave-linge est présentée dans la *Figure 4.36*. Les paramètres d'interface sont :

- ⚙️ *l'instant de début du lavage ;*
- ⚙️ *la température de lavage ; dans ce cas, l'utilisateur a trois options 30°, 60° ou 90° ; le choix d'une certaine température impose la largeur des créneaux qui correspondent à la*

période de chauffage de l'eau (la partie initiale du cycle de lavage, caractérisée par une grande puissance active absorbée – autour 2kW, voir *Figure 4.37*) ;

↻ la présence de l'essorage ; l'utilisateur a deux options *sans* ou *avec* essorage ; ces options ont une influence sur la présence ou non, du dernier cycle.

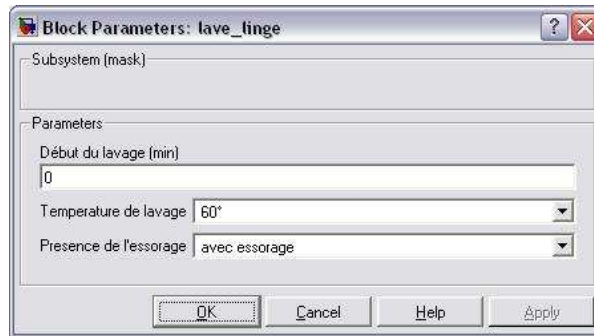


Figure 4.36. Fenêtre de configuration pour le lave-linge

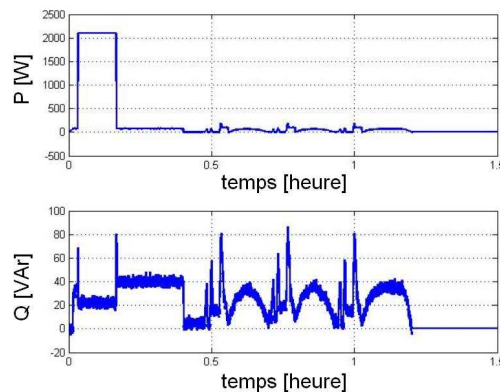


Figure 4.37. Exemple de sortie du bloc lave-linge

Nous remarquons que l'instant de démarrage est compris dans les paramètres d'interface utilisateur (*Figure 4.36*). Le modèle correspond alors au cas du démarrage manuel de la machine. Pour démarrer à un instant différent (autrement dit, pour piloter le dispositif), l'utilisateur charge la machine, fixe le type de lavage désiré (température, présence ou absence d'essorage) et confirme que l'appareil est prêt à être mis en route. Il ne reste plus qu'à générer un signal de consigne extérieur qui lance le lavage.

Le cycle total de lavage peut varier de 75 minutes (lavage à 90°C, avec essorage), dont 11 minutes de chauffage, à 48 minutes (lavage à 30°C sans essorage). Comme déjà précisé, le pilotage des charges n'agira pas sur ces paramètres, il va juste décaler le moment de démarrage du lavage.

Un facteur essentiel est le confort de l'utilisateur. Ce confort peut consister en :

- ↻ un instant maximal avant lequel la machine doit commencer le fonctionnement ;
- ↻ un intervalle donné pour l'arrêt du cycle de lavage (afin que l'utilisateur puisse sortir le linge) ;
- ↻ une période donnée pour le lavage, en tenant compte du niveau de bruit généré par le fonctionnement de la machine.

L'adaptation de ce modèle pour le calcul en temps réel a été effectuée avec succès. L'ordre de démarrage de la machine peut venir de deux endroits : soit l'utilisateur, soit le système d'optimisation.

4.2.6.2.7. Sèche-linge

Le modèle du sèche-linge n'est pas encore réalisé à cause du manque de données. Toutefois, la question est : *s'agit il ou non d'une charge pilotable* ? La contrainte qui concerne la présence de l'utilisateur est plus importante que dans le cas du lave-linge. De plus, l'utilisateur ne peut pas charger son sèche-linge et laisser le système de pilotage le démarrer plus tard, à cause de la périssabilité du linge. Ainsi, le sèche-linge est une *charge non-pilotable*.

Mais, que se passe-t-il si *le sèche-linge est considéré comme un cycle lié au lave-linge* ? Alors il peut être vu comme une *charge pilotable*. Pourquoi ne pas avoir une option, comme pour la présence de l'essorage, qui permette au système MULTISOL de savoir que, après les cycles de lavage, il va suivre un programme de séchage ? De cette manière, il pourrait connaître la consommation qui correspond au cycle composé (lavage + séchage) et le démarrer en conséquent.

4.2.6.2.8. Lave-vaisselle

Hormis quelques différences de forme du cycle de lavage (*Figure 4.38*), le modèle du lave-vaisselle a les mêmes caractéristiques que celui du lave-linge. Comme nous pouvons l'observer, la caractéristique du lave-vaisselle comporte plusieurs cycles d'échauffement de l'eau. Toutefois, la puissance absorbée pendant ces périodes est plus petite que dans le cas du lave-linge et le cycle total de lavage est beaucoup plus court. Néanmoins, ces cycles peuvent varier en fonction du type de machine, étant donnée l'existence d'appareils qui permettent un double raccordement : eau froide/eau chaude. Un tel équipement devient intéressant lorsqu'on dispose de l'eau chaude collective.

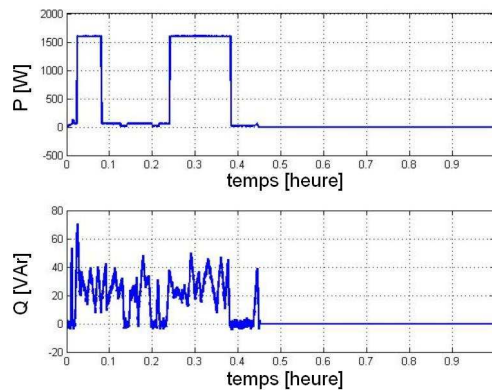


Figure 4.38. Exemple de sortie du bloc lave-vaisselle

Il faut aussi mentionner que le lave-vaisselle est plus silencieux par rapport au lave-linge et que la vaisselle ne doit pas être rapidement sortie de la machine. Ainsi les contraintes liées au confort de l'utilisateur mentionnées pour le cas antérieur sont considérablement réduites, voir même, éliminées.

4.2.6.2.9. Chauffage

Pour le chauffage, le problème est beaucoup plus complexe car nous ne pouvons pas reproduire le comportement électrique du système de chauffage sans connaître le comportement thermique dynamique de la maison. De plus, ce dernier dépend de plusieurs facteurs comme : la structure de la maison (surfaces des chambres, hauteur, matériaux des murs – isolation, nombre de fenêtres, orientation de la maison, etc.), la température extérieure, l'ensoleillement... Et cela sans prendre en compte les habitudes de l'utilisateur, c'est-à-dire la fermeture aléatoire des portes et des fenêtres.

➤ *Comportement thermique dynamique de la maison*

Le principe de la modélisation du comportement thermique dynamique de la maison est basé sur le bilan thermique de la maison (éq 4.11).

$$\frac{d(\text{cumul de chaleur})}{dt} = \sum P_{\text{entrantes}} - \sum P_{\text{sortantes}} \quad (\text{éq 4.11})$$

Si nous écrivons ce bilan pour une chambre, comme celle présenté sur la Figure 4.39 :

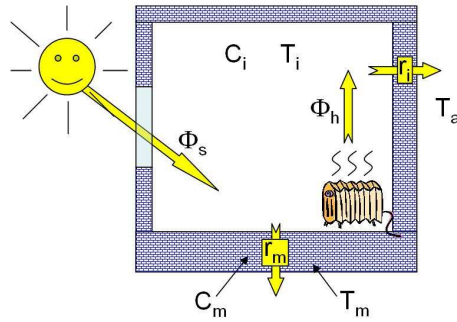


Figure 4.39. Paramètres thermiques caractéristiques pour une chambre

nous obtenons le système d'équations différentielles (éq 4.12) :

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_i}{dt} \\ \frac{dT_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{r_i c_i} + \frac{1}{r_m c_i}\right) & \frac{1}{r_m c_i} \\ \frac{1}{r_m c_m} & -\frac{1}{r_m c_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_i \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{r_a c_i} & \frac{1}{c_i} & \frac{SF}{c_i} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_a \\ \Phi_s \\ \Phi_h \end{bmatrix} \quad (\text{éq 4.12})$$

- Où :
- T_i – température dans la chambre i [K] ;
 - T_m – température de l'enveloppe de la pièce [K] ;
 - T_a – température ambiante (à l'extérieur du bâtiment) [K] ;
 - C_i – capacité thermique de l'air dans la chambre i [J/K] ;
 - C_m – capacité thermique de l'enveloppe de la pièce [J/K] ;
 - Φ_h – flux thermique donnée par le radiateur [W] ;
 - Φ_s – flux thermique donnée par le soleil via la fenêtre [W] ;
 - r_i, r_m – résistances de transfert thermique [K/W] ;
 - SF – surface de la fenêtre [m²].

➤ Hypothèses

- ⚡ Le flux thermique donné par le soleil est le même sur tous les côtés du bâtiment. En réalité, l'apport thermique du soleil via chaque fenêtre dépend de l'orientation de la maison (plus important côté sud que côté nord...).
- ⚡ Le plafond a été considéré comme parfaitement isolé. De ce fait aucun échange thermique n'est présent entre l'intérieur et l'extérieur via cet élément.
- ⚡ La température dans la chambre est uniforme. Dans la réalité, la température dans une chambre présente une certaine répartition verticale et horizontale, en fonction du type de radiateur utilisé et en fonction de son positionnement (Figure 4.40).

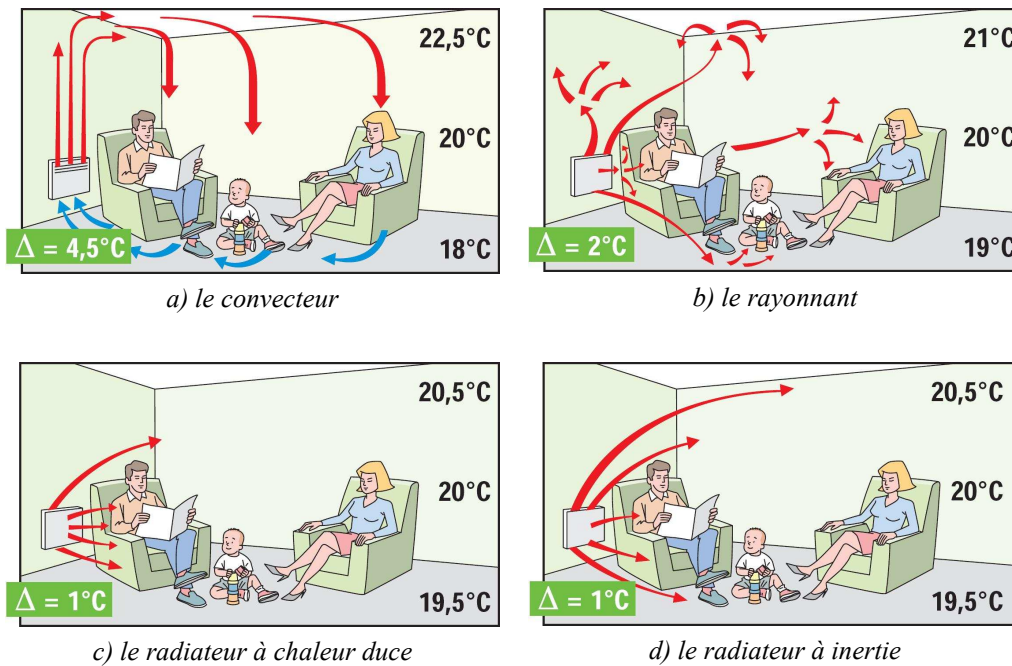


Figure 4.40. Répartition de la température verticale en fonction de type de radiateur

Le modèle thermique proposé est un modèle simplifié du deuxième ordre, qui permet de simuler le comportement thermique dynamique d'un bâtiment à court et à long terme. Les températures dans les différentes pièces du bâtiment sont déterminées chambre par chambre, permettant la régulation avec des consignes différentes. Le modèle permet aussi d'observer l'interaction thermique entre les différentes chambres.

➤ *Modèle dynamique du chauffage*

Le comportement dynamique du chauffage est modélisé par le schéma simple présenté dans la figure suivante :

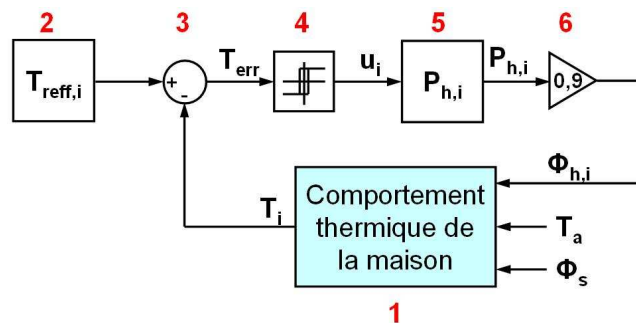


Figure 4.41. Modèle du chauffage électrique

Où : **Bloc 1** contient le système d'équations différentielles qui permet de modéliser le comportement thermique dynamique du bâtiment (voir *éq 4.12*). Il a comme entrées : les flux thermiques donnés par chaque radiateur i - $\Phi_{h,i}$; la température ambiante (à l'extérieur du bâtiment) ; le flux thermique donné par le soleil via les fenêtres - Φ_s . En sortie, il comporte la température intérieure de chaque chambre i - T_i . Si une chambre ne comporte pas de radiateur, le flux Φ_h correspondant sera nul. Ce facteur a été gardé pour l'adaptabilité du modèle. Dans ce cas là, la température dans la chambre sera influencée juste par l'échange avec les chambres voisines et par l'apport solaire via les fenêtres.

Bloc 2 donne les températures de référence pour chaque chambre i ($T_{ref,i}$). Ces grandeurs peuvent être des constantes ou non, selon qu'elles proviennent d'un système de programmation (manuel ou automatique).

Bloc 3 calcule la différence entre les températures de référence et celles réelles, dans les chambres. La sortie de ce bloc est ainsi un vecteur d'erreurs $T_{err,i}$.

Bloc 4 génère par hystérésis les ordres de commande pour chaque radiateur (u_i), à partir des erreurs de température. La précision de la régulation est fixée en fonction du type de thermostat utilisé (voir *Tableau 4.2*).

Type	Précision
Mécanique	$\pm 2^\circ\text{C}$
Electronique	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
Numérique	$\pm 0,1^\circ\text{C}$

Tableau 4.2 Précision de la régulation en fonction du type de thermostat [LER 07]

Bloc 5 transforme les ordres de commande u_i en consommation électrique pour chaque radiateur ($P_{h,i}$). En effet, nous appliquons un gain (correspondant à la puissance de chaque radiateur) à chaque ordre de commande. C'est à ce niveau que sont annulés les flux pour les chambres qui n'ont pas de radiateur (en mettant un gain nul).

Bloc 6 transforme les puissances électriques consommées en flux thermiques (Φ_{hi}). Dans le modèle présenté, le bloc consiste juste dans un gain qui correspond plutôt au cas d'un simple convecteur, sans inertie thermique ou diffusion spéciale de la chaleur.

4.2.6.2.10. Chauffe-eau

Le modèle du chauffe-eau est obtenu de la même manière que pour les charges présentées en début de ce paragraphe. Dans la *Figure 4.42* nous présentons la fenêtre de configuration du chauffe-eau, où les paramètres d'interface sont :

- le volume du chauffe-eau; ce paramètre fixe en effet la puissance du dispositif : 50l - 1000W, 75l - 1200W, 100l - 1200W, 150l - 1800W, 200l - 2300W ; les correspondances ont été réalisés à partir des données des sites des vendeurs d'appareils ;
- le niveau d'eau chaude consommée pendant la journée ; niv peut prendre trois valeurs : 1 pour 100% d'eau consommée, 2 pour 50% et 3 pour 30% ; ce paramètre impose la durée de la période de chauffage ; la relation entre niv et la durée de chauffage a été réalisée de manière intuitive ;
- le moment de début du chauffage ; un vecteur comportant des éléments de type « hh:mm » et qui permet l'obtention de plusieurs périodes de chauffage.

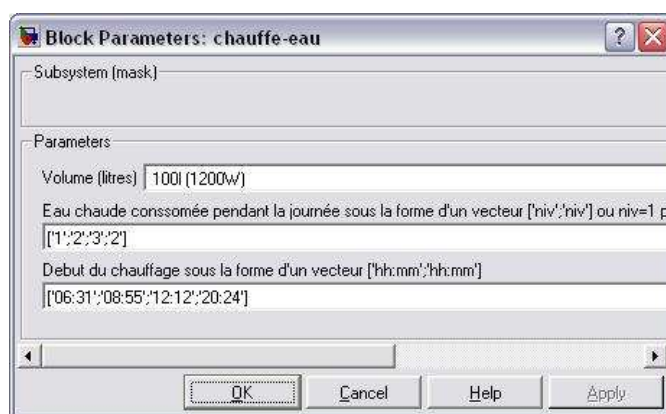


Figure 4.42. Fenêtre de configuration pour le chauffe-eau

La *Figure 4.43* présente le comportement du modèle pendant les deux premiers créneaux de chauffage (début du chauffage à 06h31 avec 100% d'eau chaude consommée et début du chauffage à 08h55 avec 50% d'eau chaude consommée).

Le modèle ci-dessus est approximatif. Il est adapté pour l'obtention des courbes de charges hypothétiques et pas pour les applications qui nécessitent une émulation plus précise de son comportement. Pour plus de précision, un modèle basé sur la modélisation du comportement dynamique thermique est nécessaire, analogue à celui conçu pour le chauffage. Cependant, il est nécessaire de bien connaître les paramètres suivants : isolation, capacité thermique, résistance de transfert thermique, relation entre la puissance électrique absorbée et

le flux thermique généré, etc. D'autres éléments nécessaires sont la température d'eau en entrée de l'appareil et le débit d'eau chaude consommée. De plus, il va falloir prendre en compte la répartition de température sur l'axe verticale, à l'intérieur du chauffe-eau.

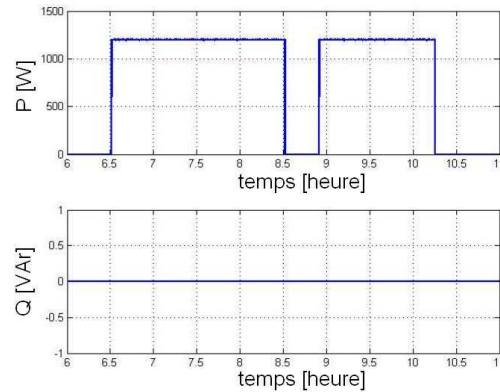


Figure 4.43. Exemple de sortie du bloc chauffe-eau

Ainsi, la réalisation d'un modèle basé sur la modélisation du comportement dynamique thermique donnera la possibilité d'une meilleure prise en compte de :

- ↻ l'inertie thermique du chauffe-eau (prise en compte du refroidissement de l'eau pendant la journée à cause des pertes thermiques vers l'extérieur) ;
- ↻ la durée du chauffage en fonction de la quantité d'eau chaude consommée.

4.2.6.2.11. Réfrigérateur et Congélateur

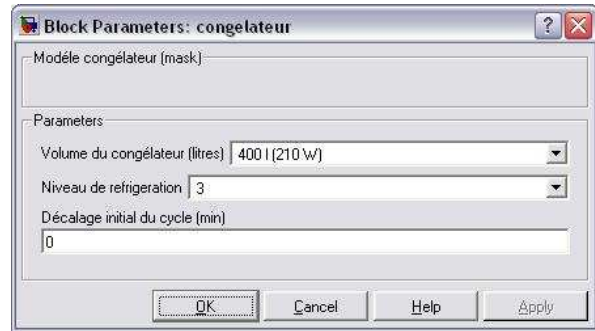
Comme dans le cas du chauffe-eau, ces deux dispositifs sont modélisés de manière simplifiée afin d'obtenir une courbe de charge, sans prendre en compte leur pilotage.

Sur la *Figure 4.44* et la *Figure 4.45* nous pouvons visualiser les fenêtres de configuration et les sorties de ces deux appareils. Les paramètres d'interface sont :

- ↻ la puissance du dispositif ; donnée soit directement soit par correspondance avec le volume de l'appareil (cf. sites vendeurs) ;
- ↻ le niveau de réfrigération ; entre 1 et 5, il fixe la grandeur des créneaux de fonctionnement des appareils, la période (fonctionnement + veille) étant constante ;
- ↻ décalage initial du cycle ; introduit juste pour réaliser une désynchronisation des deux dispositifs.

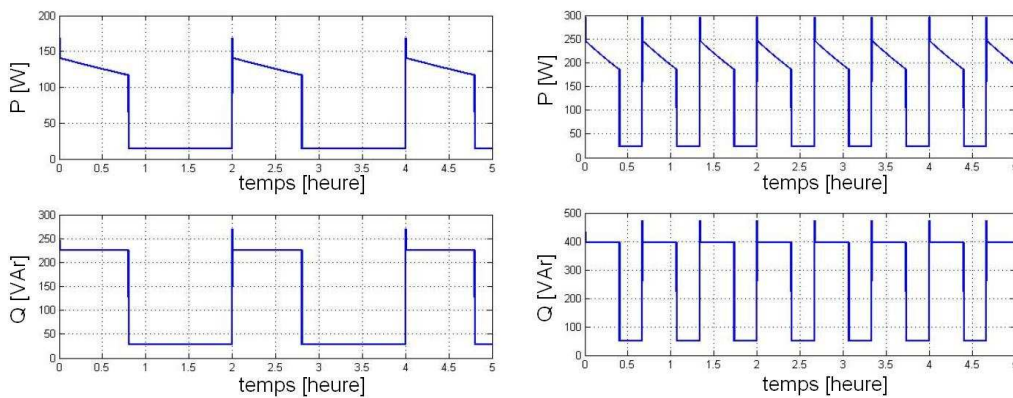


a) réfrigérateur



b) congélateur

Figure 4.44. Fenêtres de configuration pour le réfrigérateur et le congélateur



a) réfrigérateur

b) congélateur

Figure 4.45. Exemple de sortie des blocs réfrigérateur et congélateur

Nous pouvons remarquer que dans le cas de ces dispositifs, il y a une consommation de réactif plus importante (presque deux fois la consommation d'actif).

L'utilisation de ces modèles pour des applications de type prévision ou correction en temps-réel n'est pas possible étant donnée leur simplicité. L'inertie thermique et les effets du pilotage (comme l'absorption d'une plus grande énergie au redémarrage du dispositif) ne sont pas reproductibles. De plus, les habitudes de l'utilisateur (essentiellement l'ouverture de porte) influencent beaucoup la consommation de ces dispositifs. La température ambiante a aussi une grande répercussion sur le comportement de ces dispositifs, notamment quand nous désirons représenter des courbes de charges été/hiver. Les modèles envisagés pour faire face à ces exigences sont basés sur le même modèle dynamique thermique que dans le cas du chauffage et du chauffe-eau. De ce fait, il est nécessaire de connaître les paramètres intervenants : isolation, capacité thermique, résistance de transfert thermique, relation entre la puissance électrique absorbée et le flux thermique généré... Ces informations ne sont pas données par les constructeurs.

4.2.6.3. Validation et adaptation des modèles

Comme mentionné auparavant, le modèle du système PV a été validé dans un premier temps en utilisant des courbes données par les constructeurs de modules (v. § 4.2.6.1.1). En ce qui concerne la validation des autres modèles, cela peut être effectué sur une base de données (courbes expérimentales) complète. Par contre, pour obtenir cette base de données, plusieurs courbes de mesures des différents dispositifs sont nécessaires :

- ☞ de même type (par exemple pour le réfrigérateur), de différents gabarits, à différents niveaux de réglage, dans des conditions ambiantes différentes (principalement température) ;
- ☞ de différentes technologies (par exemple : pour le TV - cathodique, plasma, TFT... ; pour l'éclairage : lampes à incandescence, fluorescentes, compactes...).

Etant donnée la multitude des typologies d'un certain appareil et l'évolution rapide des technologies, il est difficile, voire impossible, de l'émuler parfaitement et d'obtenir un modèle qui sera valide pour tous les équipements d'une même catégorie. En conséquence, nous retrouvons la problématique d'*adaptation des modèles par rapport aux équipements réels*. Cette adaptation pourra être réalisée par :

- ☞ auto-apprentissage du système MULTISOL ;
- ☞ introduction des données initiales par l'utilisateur ;
- ☞ fiche d'identité de l'équipement, élaborée par le constructeur de l'équipement et récupérée par MULTISOL, via une base de données (propre ou Internet), ou directement de l'équipement via un procédé type « plug-and-play » (v. § 4.2.3).

4.2.7. Méthodologie de contrôle/commande

Pour la conduite d'un système d'une telle complexité, comme celui du bâtiment « multisource/multicharge », un mécanisme de pilotage multi-échelle a été choisi [HAD 07]. Une optimisation multi-échelle est un algorithme hiérarchisé suivant différentes échelles de temps. La structure globale du mécanisme abordé pour notre application est organisée sur trois niveaux principaux, chacun avec sa propre problématique et échelle de temps :

- ☞ une *couche anticipative*, basée sur les degrés de liberté offerts par l'utilisateur et ayant comme objectif de générer le plan d'affectation des ressources en fonction des prédictions disponibles ;

- 🔄 une *couche réactive*, basée sur les degrés de liberté offerts par le fonctionnement des équipements et ayant comme objectif d'adapter le plan d'affectation des ressources pour faire face aux événements imprévus ;
- 🔄 une *couche locale*, représentant en effet la partie de régulation locale de chaque équipement et ayant comme objectif de suivre les consignes de la couche d'anticipation et de la couche réactive en utilisant le contrôle embarqué.

4.2.7.1. Mécanisme anticipatif

Le mécanisme d'anticipation est la couche de commande ayant le niveau d'abstraction le plus haut dans l'architecture de conduite. Cette couche joue le rôle de planification des ressources énergétiques pour des valeurs globalisées (sur des périodes de temps longues). Elle s'occupe de préparer à l'avance un plan de consommation et de production d'énergie pour un horizon temporel fixé. La prédiction repose sur des prévisions météorologiques et la programmation des services par l'utilisateur. Le calcul d'anticipation reprend lorsque de nouvelles prévisions sont disponibles. Cela revient à faire glisser l'horizon de cette couche de commande.

G-SCOP a proposé une méthode de résolution générale pour les problèmes d'anticipation basée sur un algorithme hiérarchisé. Celui-ci combine méthode de résolution exacte et heuristique, afin d'accélérer la convergence vers un optimum global supposé. L'heuristique permet de tenir compte de la structure du problème et d'éviter aux méthodes exactes d'explorer des régions sans intérêt. Plusieurs méta-heuristiques (recherche tabou, recuit simulé et algorithme génétique) ont été adaptées à la génération des sous-problèmes qui sont alors résolus par un algorithme de programmation linéaire en nombre entier mixte [HAD 07].

Cette couche détermine des consignes moyennes qui sont ajustées en temps-réel par la couche réactive.

4.2.7.2. Mécanisme réactif

Comme la couche anticipative travaille avec des valeurs moyennes, un niveau plus proche de l'équipement est nécessaire pour tenir compte des valeurs réelles de consommation et de production. Une échelle de temps très courte est impérative pour éviter que, ponctuellement, les contraintes soient violées. De ce fait a été introduit le mécanisme réactif, son but étant de distribuer la ressource moyenne affectée par le niveau anticipatif en prenant

en compte également le critère confort et le respect des contraintes de capacité des ressources, en temps-réel.

Contrairement à l'approche prédictive, l'approche réactive est un algorithme de liste qui vise à construire dynamiquement la solution du problème sans chercher une solution globale. Elle requiert ainsi un temps de calcul très faible et elle tient compte de l'état courant des services et donc des perturbations pour l'affectation des ressources.

En principe, le mécanisme réactif travaille avec des échelles de temps allant de 10s à 60s. A chaque pas de temps, il vérifie l'état de la consommation et de la satisfaction des services et, en même temps, que la contrainte de ressource maximale est respectée [HAD 07].

4.2.8. Validation du système sur démonstrateur temps-réel hybride

L'étape finale du projet MULTISOL consiste à valider les concepts introduits (algorithmes, architectures, etc.) et à tester les performances des dispositifs éventuellement réalisés. Cette validation doit être réalisée principalement en utilisant des maisons expérimentales de l'INES, sur sa « Plate-forme de démonstration de bâtiments à énergie positive » (Figure 4.46) [INE 07]. Cet outil est encore en cours de réalisation et servira comme support à plusieurs projets de l'INES, ayant comme objectifs principaux : la réduction de la consommation énergétique des bâtiments, la modélisation et la conception des bâtiments du futur, le développement de la convergence transport/habitat.

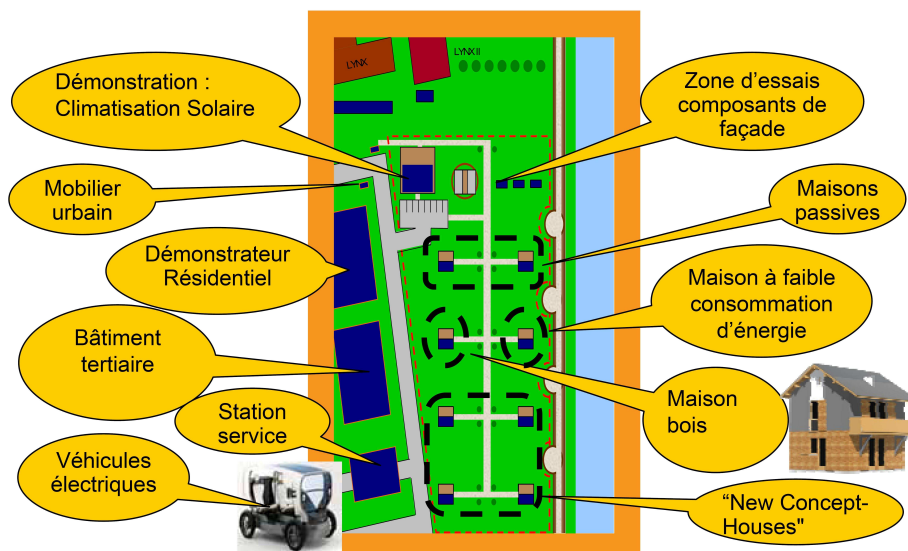


Figure 4.46. Plate-forme de démonstration de bâtiments à énergie positive [INE 07]

Néanmoins, avant cette implantation physique sur des maisons expérimentales, une validation des algorithmes prédictifs a été effectuée au sein de G-SCOP, par simulation numérique hors temps-réel [HAD 07], [HAD 08]. La suite logique de cette action est une deuxième phase de test des performances, en se rapprochant de plus en plus de la réalité. Le simulateur temps-réel hybride du G2Elab est la solution idéale pour réaliser cette tâche (Figure 4.47).

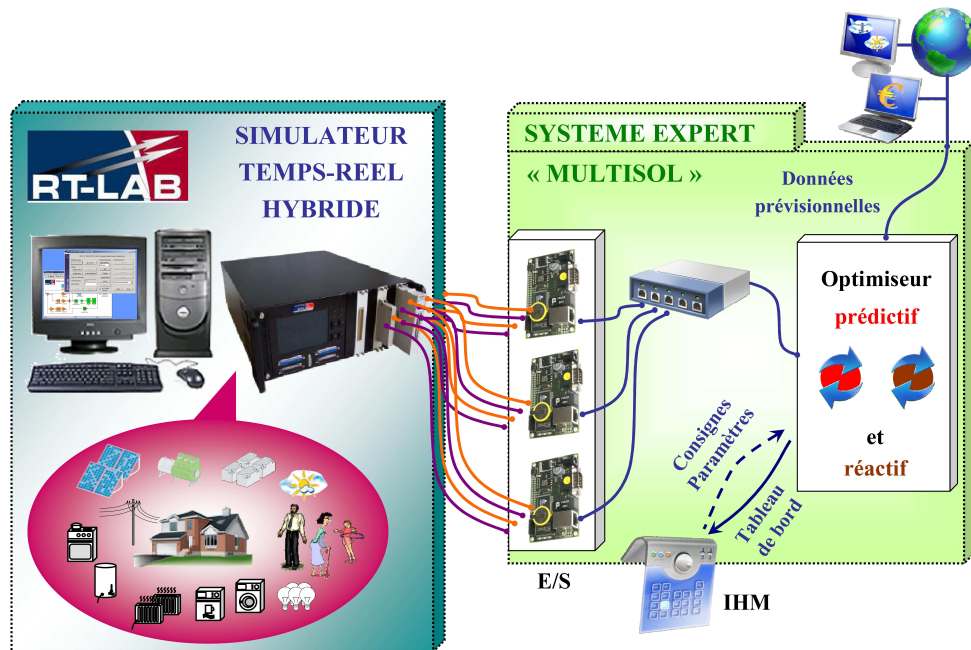


Figure 4.47. Validation du système expert en utilisant RT-LAB

L'idée est donc d'émuler la totalité des sources, des charges, le comportement thermique de la maison, les facteurs exogènes (ensoleillement, température extérieure, bourse énergétique), le comportement de l'utilisateur, etc., et de tester ainsi en temps-réel le système de gestion MULTISOL. L'émulation des éléments mentionnés ci-dessus peut être soit totalement numérique, soit hybride (numérique et analogique), comme présenté par la suite.

4.2.8.1. Phases de développement du démonstrateur temps-réel hybride

A son tour, l'étape de validation sur le démonstrateur temps-réel hybride du G2Elab peut se décliner en trois phases différentes, comme montré sur la Figure 4.48. Cette déclinaison est réalisée en fonction de l'état de développement du système de gestion MULTISOL, en se rapprochant de plus en plus du réel :

Phase 1 : Dans ce cas, nous aurons deux parties distinctes : le simulateur temps-réel numérique (RT-LAB) d'un côté, et de l'autre, un ordinateur où sont implantés les

algorithmes de gestion de MULTISOL. Tous les équipements électriques (sources, stockage, charges), ainsi que le comportement thermique de la maison, le comportement de l'utilisateur et les facteurs exogènes seront émulés sur RT-LAB, en temps-réel. Un module d'interface, destiné à mettre en forme les mesures, dans un sens, et les ordres de commande, dans l'autre, est aussi présent sur la partie RT-LAB. De cette manière, la liaison entre les deux entités peut être réalisée par réseau informatique. Si nous regardons la *Figure 4.47*, cette configuration est l'équivalent d'une frontière qui se trouve juste avant les entrées/sorties (vu du système expert).

Phase 2 : Au moment où le système de gestion sera doté d'entrées/sorties analogiques et/ou numériques, une deuxième configuration du démonstrateur sera nécessaire. La structure restera quasiment la même, mais le module d'interface passera du côté système de gestion MULTISOL. Ainsi, les grandeurs échangées entre les deux parties seront directement les mesures venant de la maison (équivalent des sorties capteurs) et les ordres venant de MULTISOL.

Phase 3 : Une fois le système validé dans la *Phase 2*, nous pouvons ensuite ajouter des équipements physiques (sources, charges, ou système de stockage), et travailler avec des facteurs exogènes réels.

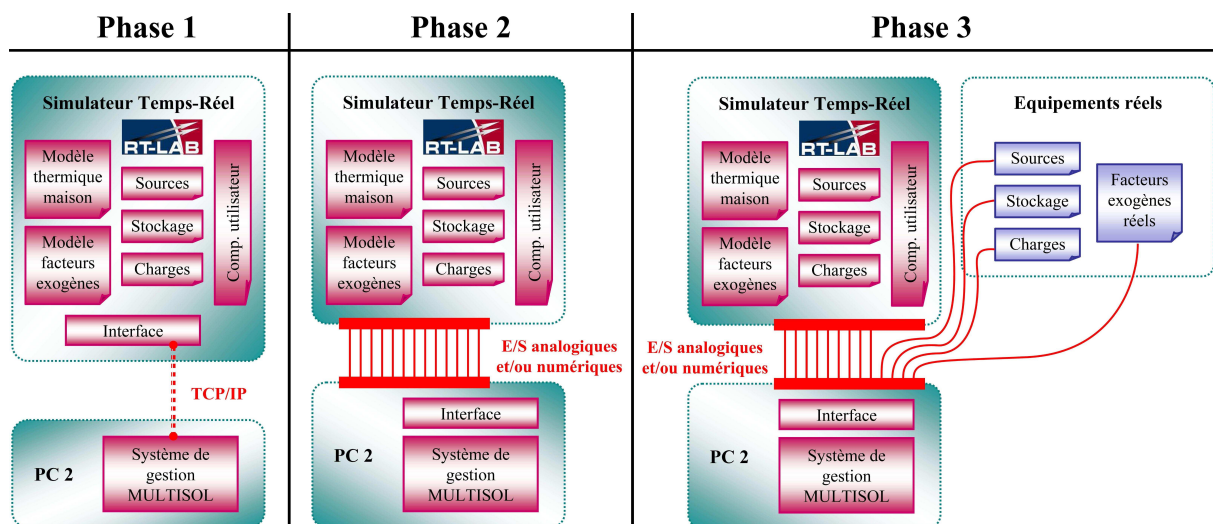


Figure 4.48. Phases de développement du démonstrateur temps-réel hybride

Conformément à la classification réalisée dans le deuxième chapitre, les deux premières phases correspondent à un démonstrateur HIL (Hardware-In-the-Loop), tandis que la dernière est de type PHIL (Power-Hardware-In-the-Loop), v. § 2.1.4. La configuration du démonstrateur correspondant à la *Phase 1* permet de valider les algorithmes de gestion, sans nécessiter une structure physique du système. En ce qui concerne les deux autres, le PC2 peut

être remplacé par le système expert physique (final), avec ses propres entrées/sorties, IHM, etc. Cette situation montre encore une fois la flexibilité d'un outil temps-réel hybride.

Par la suite, nous allons regarder plus en détail la première phase de développement du démonstrateur temps-réel hybride, avec une communication réseau entre les deux parties.

4.2.8.2. Cas d'étude

Pour la validation du système de gestion MULTISOL, nous avons décidé de travailler sur un cas d'étude. Ainsi nous avons choisi une maison qui dispose d'une surface habitable de 109,25m², d'un garage de 19,50m² et d'une terrasse de 21,90m² couverte par le toit de la maison (*Figure 4.49*). La maison est considérée comme résidence principale d'une famille de cinq personnes. Deux premières hypothèses ont été faites :

- 🔄 par rapport à son orientation : terrasse au sud ;
- 🔄 par rapport au toit : incliné à 30° pour la maison et plat pour le garage.

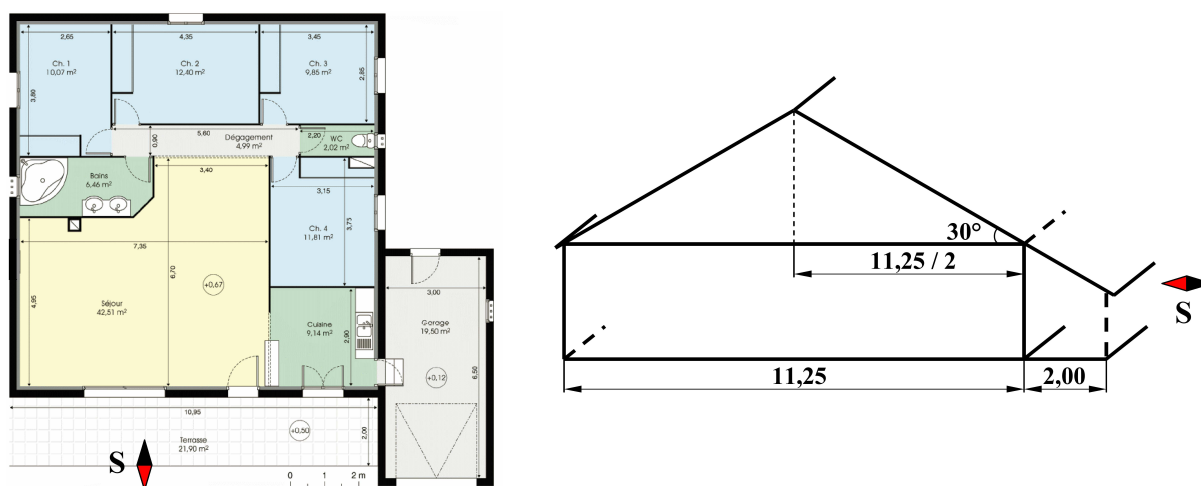


Figure 4.49. Plan de la maison choisie comme cas d'étude

Ensuite, nous avons « doté » la maison des charges électriques nécessaires (v. ANNEXE E), ce qui équivaut à une puissance totale installée d'environ 31kW, dont : chauffage électrique 9kW, éclairage 1 kW, autres appareils électroménagers 21kW. Une première estimation indique que presque 50% de cette puissance est pilotable. Il faut mentionner que le système de chauffage électrique a été dimensionné de manière générale, conformément à une estimation de type « 80W/m² » [LER 07]. Normalement, le dimensionnement du système de chauffage doit être réalisé suite à une analyse approfondie,

en fonction de plusieurs facteurs comme l'isolation de l'habitat, la localisation géographique, etc.

L'abonnement recommandé par EdF pour un tel cas (maison individuelle avec une surface supérieure à 100m², résidence principale, chauffage électrique) est de 12kW, avec l'option *Heures Pleines/Heures Creuses*. Les tarifs pour cette option sont : abonnement annuel - 276,81€, 1kWh en Heures Pleines - 0,1085€, 1kWh en Heures Creuses - 0,0661€. Cet abonnement servira comme référence pour le calcul des valeurs ajoutées du système de gestion.

Suite aux hypothèses concernant le toit, il résulte une surface utile pour le montage de panneaux PV d'environ 115m². Cela concerne la face sud du toit de la maison ainsi que le toit du garage. Cette surface implique un maximum de puissance PV installée d'environ 10kW. Néanmoins, la quantité des panneaux PV et des batteries à installer résultera finalement d'un outil de dimensionnement optimal du systèmes PV et du stockage [WUR 07], [PHA 08].

Des hypothèses ont été aussi prises sur l'enveloppe de l'habitat, ainsi que sur tous les autres paramètres utilisés dans le cadre du modèle thermique dynamique de la maison (v. § 4.2.6.2.9).

4.2.8.3. Réalisation de la liaison de communication

En ce qui concerne la communication entre le module d'interfaçage, situé côté émulateur maison et le système de gestion MULTISOL, situé sur un poste différent, nous avons à notre disposition deux façons de l'accomplir :

- ☞ *par communication synchrone* - Les deux acteurs communiquent de manière périodique, selon un signal de synchronisation. L'avantage d'un tel moyen est la connaissance permanente de l'état du système. Comme inconvénient, nous retrouvons une grande quantité d'informations échangées et, éventuellement, à stocker.
- ☞ *par communication asynchrone* - Les deux parties communiquent de manière apériodique, selon l'apparition d'un changement d'état qui doit être pris en compte ou d'un état d'urgence. L'avantage de ce système consiste dans la quantité limitée d'informations échangées.

Pour notre application, nous avons choisi l'utilisation d'une communication de type asynchrone. Cela est tout à fait réalisable avec les outils disponibles à cet effet dans RT-LAB [RTL AS], en utilisant un protocole de type UDP/IP.

Pour rappel, UDP/IP est un protocole de communication qui permet d'utiliser, en plus des *adresses IP* (une *adresse unique* attribuée à chaque ordinateur sur Internet), des numéros

de ports (un numéro unique attribué à chaque logiciel dans un ordinateur). Avec le protocole IP, nous pouvons envoyer des données d'un ordinateur A à un ordinateur B. Avec UDP/IP, nous pouvons être plus précis: nous envoyons des données d'une application x sur l'ordinateur A vers une application y sur l'ordinateur B. En effet UDP est une variante plus simple du protocole TCP, qui permet, par sa simplicité, un gain de temps par rapport à ce dernier.

Si nous revenons à notre application, un process asynchrone devra donc être utilisé. Un process asynchrone est en effet une application qui est exécutée en parallèle avec RT-LAB, mais qui n'est pas synchronisée avec. Nous pouvons mieux comprendre par l'exemple présenté sur la Figure 4.50. Ainsi, tout commence par l'introduction des blocs spécifiques dans le modèle Simulink à simuler en temps-réel (.mdl). Ensuite, une fois la simulation démarrée, RT-LAB va créer une mémoire partagée (shmem), par laquelle un ou plusieurs programmes asynchrones ($user\ async_i$) pourront échanger des données avec RT-LAB. Les applications asynchrones peuvent être démarrées par RT-LAB, ou peuvent fonctionner à leur propre pas de temps de simulation et demander de temps en temps l'échange de données. Durant la simulation, le modèle va lire et/ou écrire dans la mémoire partagée, conformément aux configurations des blocs $receive_i$ et $send_i$.

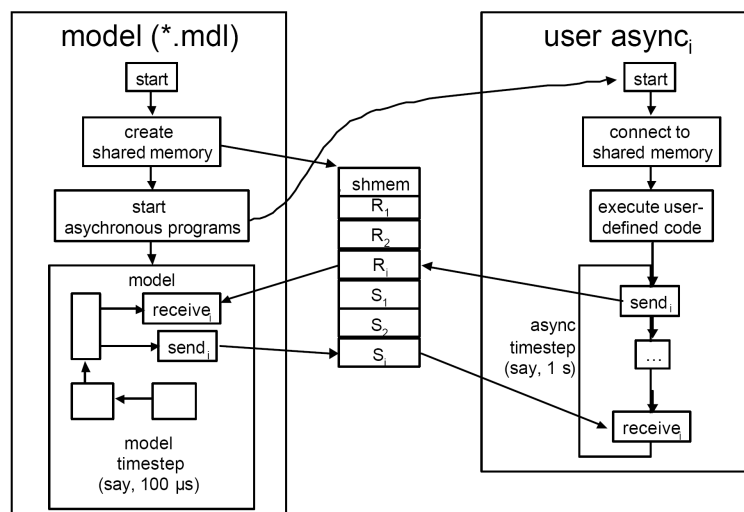


Figure 4.50. Communication entre une application asynchrone et RT-LAB

Le « .mdl » émulant la maison (avec ses sources, charges, habitants, etc.) est exécuté sur RT-LAB et les mesures désirées sont écrites en mémoire partagée. A distance, sur un autre ordinateur (v. Figure 4.48, Phase1) nous avons l'application de gestion optimale de MULTISOL, qui est exécutée à une autre fréquence que celle de simulation de la maison. MULTISOL analyse les mesures, génère les consignes nécessaires et les envoie sur la même

mémoire partagée, pour RT-LAB. Ces échanges de données sont gérés par une application de type « serveur ».

Un autre avantage de cette configuration est que la mémoire partagée mentionnée ci-dessus pourra être interrogée par tout module MULTISOL, chacun fonctionnant en asynchrone : le module d'optimisation prédictive, le module réactif, le module annuaire, les modules IHM, etc.

4.2.8.4. Scénarios de validation

Pour les tests de performance du système de gestion résultant de ce projet, plusieurs scénarios ont été envisagés, autant en régime normal de fonctionnement qu'en régime d'urgence. L'atout du démonstrateur temps-réel hybride est qu'il peut répliquer exactement les mêmes conditions pour un nombre infini d'essais, tandis que dans le cas d'une maison expérimentale les conditions vont dépendre des facteurs exogènes. Ainsi, le démonstrateur temps-réel hybride du G2Elab permettra de comparer les performances énergétiques de l'habitat dans le cas : sans et avec MULTISOL, en gardant les mêmes conditions de fonctionnement (météo, comportement utilisateur, etc.).

🔄 Régime normal de fonctionnement

- Réduire la facture d'électricité
 - Sans MULTISOL : consommation, production et stockage non optimisés
 - Avec MULTISOL : consommation, production et stockage optimisés
- Réduire l'abonnement d'EDF en gardant le même niveau de confort
 - Sans MULTISOL : abonnement 12 kWh
 - Avec MULTISOL : abonnement 9 kWh

🔄 Régime d'urgence

- Surcharge (dépassement de la puissance maximale souscrite):
 - Sans MULTISOL : perte du réseau par ouverture automatique de l'interrupteur général
 - Avec MULTISOL : élimination de la surcharge

- Perte du réseau :
 - Sans MULTISOL : perte complète de l'alimentation, ou fonctionnement non optimisé des charges sur l'énergie restante dans les batteries
 - Avec MULTISOL : alimentation des charges critiques, augmentation de l'autonomie de l'habitat en utilisant de manière intelligente le stockage, le PV et les autres sources disponibles
- Température dans une pièce en train de baisser brusquement (ouverture de fenêtre):
 - Sans MULTISOL : chauffer plus fort => Coût inutile
 - Avec MULTISOL : arrêt du chauffage jusqu'à la détection de l'élimination de la perturbation

4.3. CONCEPT DES MICRORESEAUX RESIDENTIELS ILOTABLES

Le microréseau résidentiel étudié consiste en une combinaison de systèmes de génération d'origine renouvelable (systèmes photovoltaïques et mini-turbines éoliennes), des charges résidentielles et des systèmes de soutien (microturbine et systèmes de stockage), comme présenté dans la *Figure 4.51*.

Le microréseau est doté d'une gestion centralisée et peut travailler tant en mode connecté au réseau qu'en mode îloté. Les objectifs de l'installation sont l'obtention d'une optimisation énergétique, une valorisation économique (à travers la vente d'énergie localement générée et la prestation de services systèmes) et enfin une augmentation de la fiabilité de l'installation (à travers la possibilité de travailler en mode îloté).

Pour régler le fonctionnement du microréseau résidentiel, différentes contraintes d'opération ont été proposées. Ainsi, afin de régler son fonctionnement en termes de puissance injectée, une nouvelle contrainte adaptée est proposée. Pour ce qui est du comportement face à des perturbations provenant du réseau, la priorité est donnée à la continuité de la fourniture aux charges. Finalement, le fonctionnement en termes de qualité de l'énergie générée est basé sur des normes existantes de la CEI [CEI 00] et de l'organisme de normalisation européen CENELEC [CEN 01] liés aux installations connectées au réseau de distribution [GAZ 06].

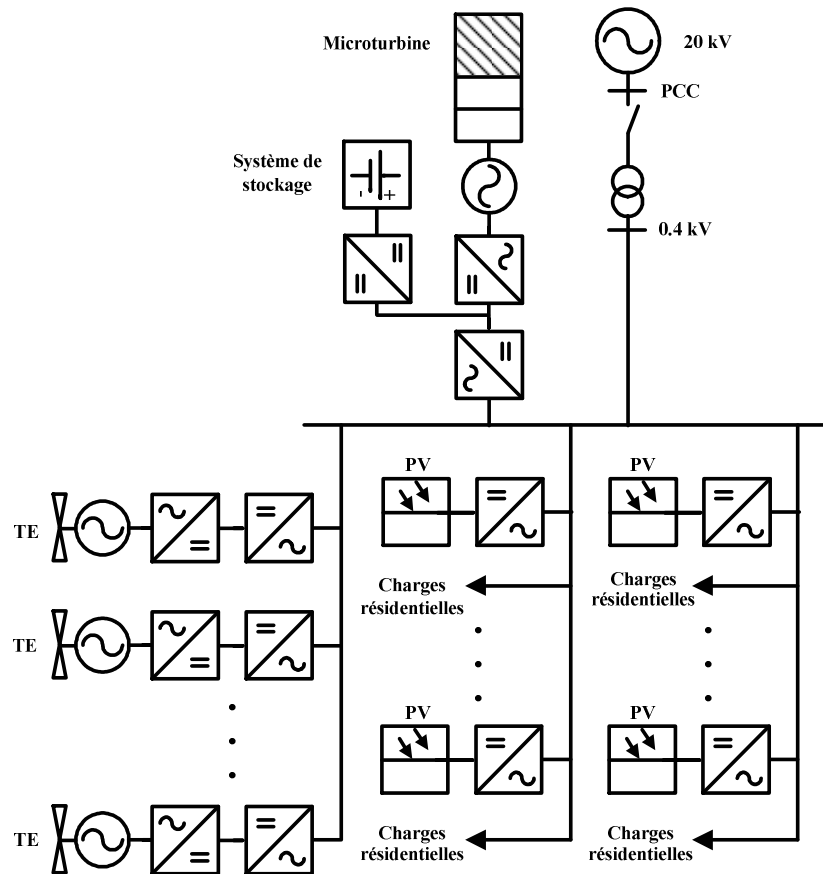


Figure 4.51. Schéma du microréseau résidentiel analysé

4.3.1. Description de la plateforme expérimentale

Dans le cadre de cette application temps-réel hybride, nous avons étudié le fonctionnement d'un prototype d'émulation d'une microturbine à échelle réduite, connecté à un microréseau résidentiel et à un réseau (tous deux simulés numériquement). Dans ces essais, les fonctions de filtrage de puissance active, l'accomplissement du programme de production et le contrôle du facteur de puissance de la microturbine ont été testés en mode connecté au réseau.

Dans la *Figure 4.52* est présenté le schéma utilisé pour cette étude, comportant quatre parties distinctes :

- Le simulateur temps-réel numérique ARENE URT, comportant le modèle du microréseau simulé et les fonctions de gestion du microréseau ;
- L'interface de puissance, comportant l'amplificateur de puissance commandé en tension et le capteur de courant ;

- L'unité de contrôle physique à tester, comportant le contrôle local du générateur esclave implanté sur le contrôleur dSPACE DS1104 R&D Controller Board [MEN 06]
- Le prototype de microturbine émulée, comportant une machine à courant continu, une machine synchrone et un convertisseur back-to-back avec sa commande.

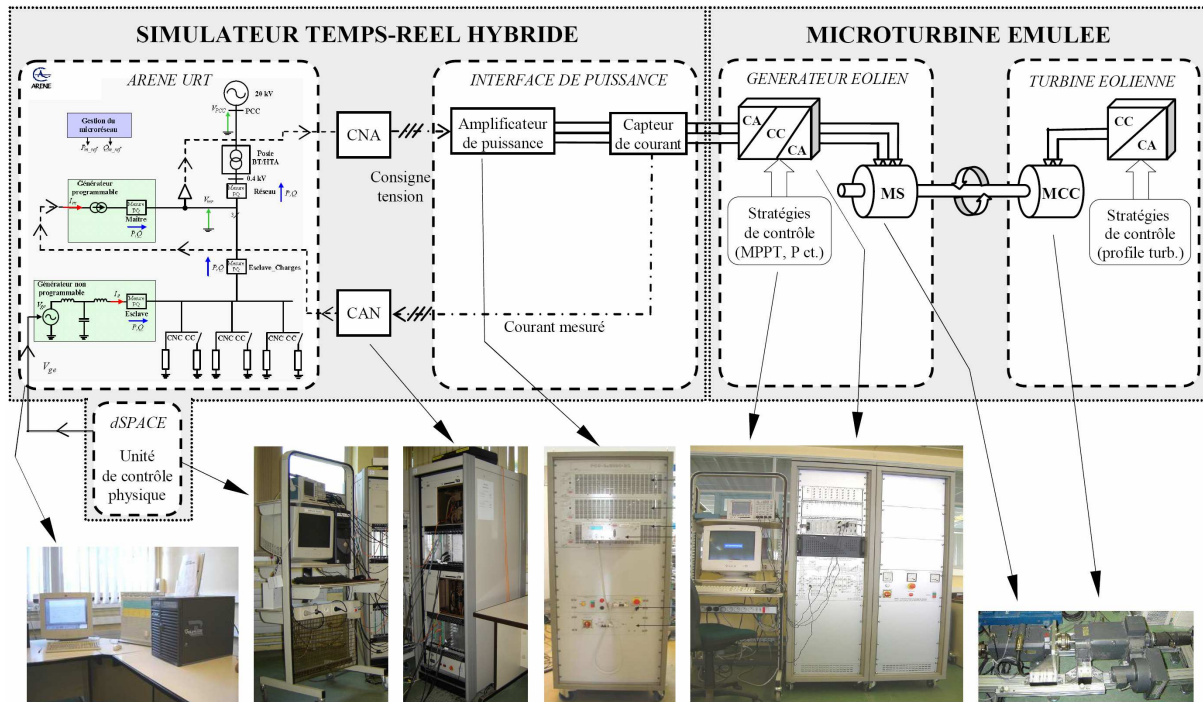


Figure 4.52. Schéma de la connexion hybride pour application microréseau résidentiel

• Le réseau simulé

Pour l'analyse, nous avons utilisé un schéma simplifié du microréseau résidentiel de la Figure 4.51. Le schéma électrique ainsi que la structure de contrôle du microréseau objet d'étude sont présentés sur la Figure 4.53.

Nous avons modélisé un microréseau basse tension (0,4kV) connecté au réseau principal à travers un poste de transformation BT/HTA. Le microréseau est constitué de deux générateurs : un générateur programmable (générateur maître) et un générateur non programmable (générateur esclave). Le générateur programmable a une puissance apparente de 35kVA (30kW) et le générateur non programmable a une puissance apparente de 24kVA (20kW). Le microréseau alimente des charges critiques, CC (consommation maximale de 10kW chacune) et des charges non critiques, CNC (consommation maximale de 5kW et 2kVAr chacune) à travers trois lignes radiales.

Le générateur programmable représente le comportement du système de soutien constitué d'une microturbine et d'un banc de batteries et de supercondensateurs connectés au

niveau du bus continu. Ainsi, l'ensemble de la microturbine avec le système de stockage sera capable de répondre correctement aux divers transitoires. Par conséquent, nous pouvons considérer qu'à tout instant, la tension du bus continu est maintenue constante : le générateur peut être modélisé comme un onduleur connecté à une source de tension constante.

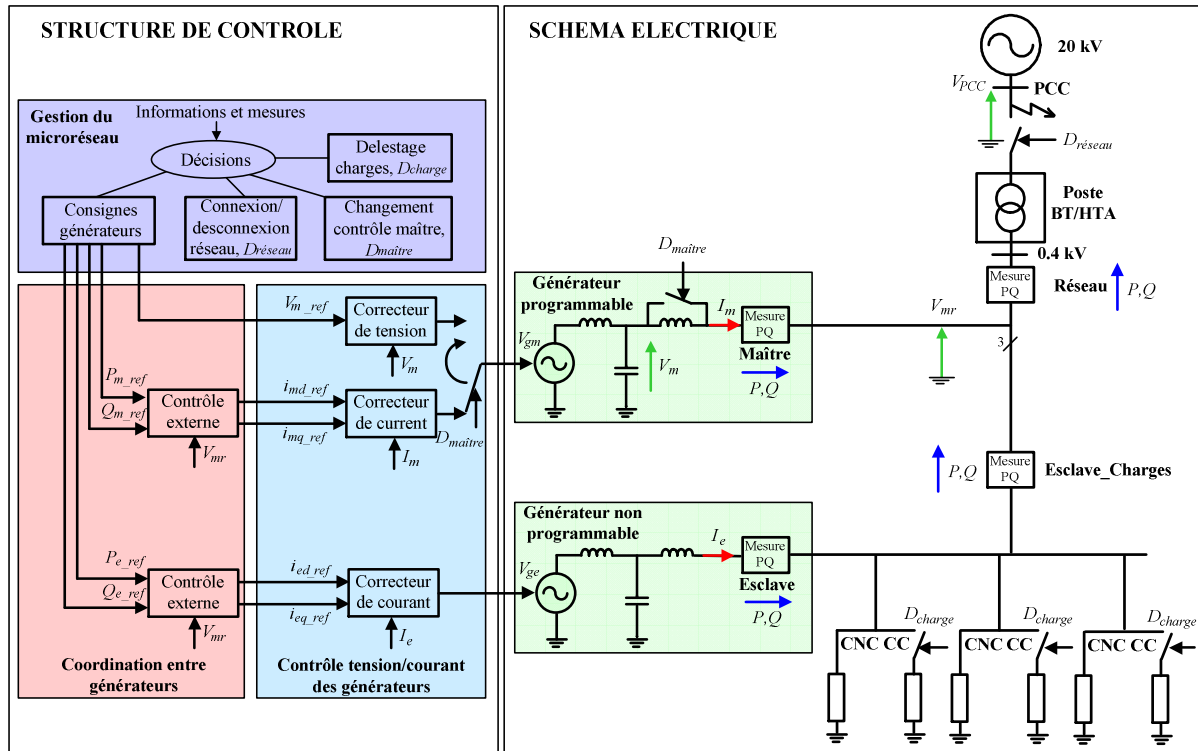


Figure 4.53. Schéma électrique et structure de contrôle du microréseau résidentiel objet d'étude

Le générateur non programmable représente le comportement d'une agrégation de générateurs d'origine renouvelable (photovoltaïques et mini éoliens). Ces générateurs sont contrôlés pour extraire le maximum de puissance de leurs sources primaires. Cela est réalisé à travers le contrôle de la tension du bus continu de leurs onduleurs. En s'assurant que cette tension est maintenue constante, le générateur non programmable agrégé peut être modélisé comme un onduleur connecté à une source de tension constante. La nature non programmable sera modélisée par les variations aléatoires de la puissance de sortie.

De plus, pour minimiser le temps de calcul des simulations et pour pouvoir réaliser des analyses temps réel, les onduleurs sont modélisés par le modèle idéalisé au lieu du modèle exact [GOM 05]. Les charges sont modélisées par le modèle à impédance constante et sont séparées en deux groupes : les charges critiques, CC, et les charges non critiques, CNC.

La structure de contrôle du microréseau est composée d'une unité de gestion, d'un niveau de contrôle dédié à la coordination, et des contrôles de tension et courant des

générateurs. Les contrôles locaux de tension et courant calculent les références de tension des sources de tension contrôlées, qui modélisent les générateurs (V_{gm} , V_{ge}). Les références de ces contrôleurs viennent de la coordination qui est gérée par l'unité de gestion. Le système de gestion calcule en fonction des informations et mesures disponibles (tensions, puissances dans les différents points du microréseau) : les consignes des générateurs pour le contrôle qui est responsable de la coordination, l'état du contacteur de connexion au réseau $D_{réseau}$, l'état du contacteur de connexion des charges non critiques D_{charge} , l'état du contacteur qui court-circuite l'inductance de connexion au réseau du générateur maître $D_{maître}$ (afin de permettre le changement de mode d'opération du maître), etc.

➤ *Le banc analogique*

La partie analogique de cette étude est basée sur le même *Banc Universel pour la Distribution Electrique* (§ 3.2.2). Ainsi, le prototype de microturbine physique émulée comporte trois parties :

- ⚡ La machine à courant continu (MCC) qui émule de manière idéalisée le fonctionnement d'une turbine à gaz contrôlée en vitesse ;
- ⚡ La machine synchrone (MS) qui émule la génératrice ;
- ⚡ L'interface d'électronique de puissance AC/DC/AC pour la connexion au réseau de la génératrice.

Le prototype à échelle réduite de la microturbine, qui fournit 2,5kVA au maximum, est sous une tension simple de 180V. Il émule en temps-réel le fonctionnement d'une microturbine de 35kVA, pour une tension de 0,4kV. Ce prototype ne prend pas en compte le fonctionnement en dynamique et la commande de la turbine à gaz. Ainsi le prototype à échelle réduite de la microturbine peut être considéré comme un générateur idéalisé, qui se comporte comme l'ensemble d'une microturbine réelle avec un système de stockage et qui peut répondre aux différents transitoires qui pourront avoir lieu dans le microréseau.

4.3.2. Résultats expérimentaux

Nous avons défini plusieurs points de mesure des flux de puissance dans le système objet d'étude (représentés par les blocs PQ dans la *Figure 4.53*). Il s'agit des puissances active et réactive injectées au réseau principal (*Mesure PQ Réseau*), des puissances active et réactive générées par le groupe formé par le générateur esclave et les charges (*Mesure PQ Esclave_Charges*), des puissances active et réactive générées par le générateur maître (*Mesure PQ Maître*) et des puissances active et réactive générées par le générateur esclave

(Mesure PQ Esclave). La Figure 4.54 présente les résultats obtenus lorsque la fonction de filtrage de la puissance active et le contrôle du facteur de puissance sont réalisés par le prototype de microturbine émulée en mode connecté au réseau. Comme nous pouvons l'observer, la puissance du générateur esclave varie pendant l'analyse. Ces oscillations représentent la nature variable de la puissance de sortie des générateurs d'origine renouvelable dont la puissance dépend de la disponibilité de la source primaire. La référence de puissance active du prototype de microturbine émulée est calculée par le système de gestion pour filtrer la puissance active injectée au réseau par le microréseau et, en même temps, pour accomplir le programme de production. Le système de gestion calcule également la référence de puissance réactive, de façon à contrôler le facteur de puissance au point de connexion commun du microréseau. Dans la Figure 4.54, le programme de puissance active à exporter au réseau varie de 5 kW à 10 kW (à $t = 32$ s). La puissance réactive injectée dépend de la référence du facteur de puissance qui varie de 1 à 0.95 capacitive (à $t = 8$ s) et ensuite à 0.95 inductive (à $t = 17$ s) pour revenir à 1 (à $t = 25$ s) pendant l'analyse. Ces variations rapides du programme de production et du facteur de puissance ont été réalisées afin de vérifier le fonctionnement correct de la structure de contrôle du microréseau face à ces événements (même si dans la réalité, leur dynamique serait bien plus lente). Comme résultat, la puissance injectée au réseau est constante, nous respectons le programme de production et nous contrôlons le facteur de puissance au point de connexion commun du microréseau.

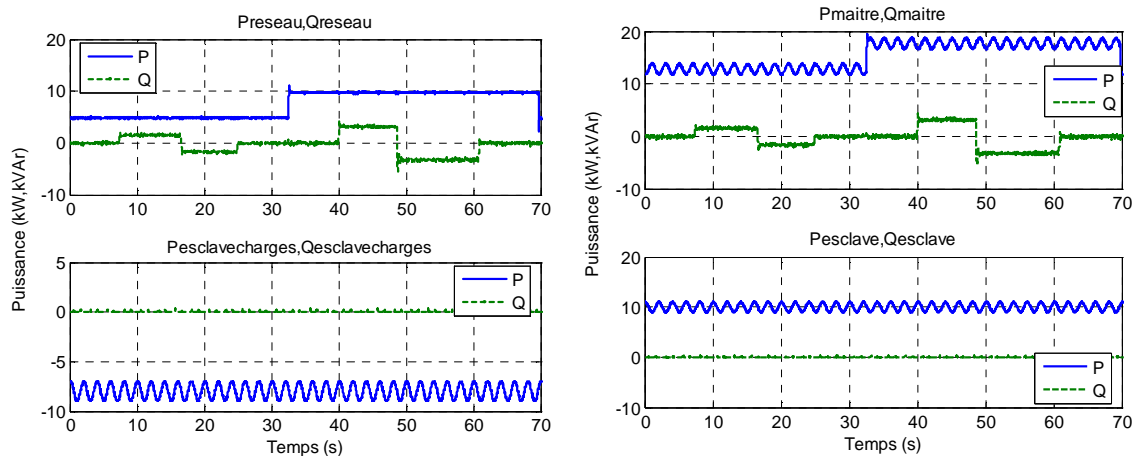


Figure 4.54. Filtrage de la puissance active et contrôle du facteur de puissance en mode connecté au réseau

Ces résultats viennent valider les résultats obtenus en simulation off line sur le filtrage de la puissance active et le contrôle du facteur de puissance [GAZ 06]. En effet nous avons validé le fonctionnement correct de la structure de contrôle du microréseau résidentiel dans l'accomplissement de ces fonctions.

4.4. SYNTHÈSE SUR CHAPITRE 4

Dans le cadre de ce quatrième chapitre nous avons étudié deux applications portant sur la gestion optimale des flux énergétiques et la facilitation de l'insertion des systèmes de production non-conventionnels.

Dans le cas du premier exemple, la source principale d'énergie est le solaire photovoltaïque, ayant comme appoint un système de stockage à batteries, le réseau, ainsi qu'un groupe électrogène. Le mécanisme de gestion doit optimiser à la fois la consommation et la production, afin d'arriver à induire un double intérêt économique et technique, tant pour l'utilisateur que pour la compagnie de distribution d'électricité (et éventuellement le gestionnaire du réseau).

Le deuxième exemple porte sur la problématique du caractère aléatoire de la source primaire des systèmes PV et éoliens, et donc de l'intermittence de la puissance injectée par ceux-ci dans le réseau de distribution. Le principe proposé afin de faciliter leur insertion, consiste dans la mutualisation d'un certain nombre de ces producteurs avec : des systèmes de génération rapidement contrôlables (générateurs Diesel, microturbines, etc.), des systèmes de stockage (batteries, supercondensateurs, etc.), ainsi qu'avec des charges pilotables. Les fonctions objectif des algorithmes de gestion sont plutôt orientées réseau (fourniture de puissance constante au réseau, fourniture de services systèmes) et dans une moindre mesure, orientées utilisateur (continuité de la fourniture d'énergie, grâce à l'îlotage).

Dans le cadre de ces applications, des travaux ont été menés sur :

- ⚡ la classification et l'identification d'équipements électriques ;
- ⚡ la réalisation de modèles de sources et de charges (pour simulation hors temps-réel et temps-réel) ;
- ⚡ la conception des architectures adaptées pour une gestion optimale des flux énergétiques ;
- ⚡ la validation des concepts et algorithmes sur le simulateur temps-réel hybride.

CHAPITRE 5. CONCLUSIONS GENERALES

La nécessité d'un simulateur temps-réel hybride en puissance a été perçue essentiellement lors des essais des systèmes de génération éoliens [LAV 05]. Plus précisément, un banc analogique éolien a été conçu au G2Elab avant le début de ce projet. Ce banc a été connecté directement au réseau de distribution d'EdF, un réseau puissant (par rapport au système éolien émulé) avec peu de liberté en ce qui concerne la génération des perturbations. La connexion de ce banc analogique à un réseau émulé à l'aide d'un simulateur temps-réel numérique a réussi à bien palier ces inconvénients [OCN 05]. L'utilisation du simulateur temps-réel hybride (TRH) a rendu possible à la fois :

- l'obtention facile des perturbations réseau comme par exemple : des variations de la tension, des variations de fréquence, etc.
- la mise à l'échelle des deux acteurs principaux : *système de génération vs. réseau*, afin d'être capable d'étudier aussi l'influence du producteur sur le réseau, (par exemple en émulant le comportement d'un parc éolien en utilisant une seule génératrice analogique).

Les considérations théoriques et pratiques fondamentales qui doivent être prises en compte lors de la mise en place et de l'exploitation d'un tel outil ont été présentées dans la deuxième partie du *CHAPITRE 2*. Cette présentation du banc hybride a été complétée par la description des composants de l'interface de puissance au début du *0*.

Après cette première application (§3.3.3), le simulateur TRH a été utilisé pour l'étude d'autres systèmes de génération non conventionnels (système éolien à base de machine synchrone - § 3.3.4 - ou asynchrone à induction - § 3.3.5, § 3.3.6 - systèmes solaires photovoltaïques - § 3.3.4 -), pour la validation des algorithmes de contrôle/commande des systèmes à base d'électronique de puissance (système de soutien shunt - § 3.3.5 - ou série - § 3.3.6 - pour l'aide à la reprise au vol des systèmes éoliens à base de machine asynchrone à induction, système série pour le contrôle des flux de puissance dans les réseaux - § 3.5 -), ainsi que pour le test en puissance des dispositifs industriels (test d'onduleurs pour l'interfaçage de générateurs photovoltaïques - § 3.3.4 -).

Un grand avantage de la simulation TRH est qu'il permet une meilleure prise en compte du comportement réel des systèmes physiques. Même réalisées à échelle réduite, les essais en hybride rendent possible l'élimination des hypothèses simplificatrices nécessaires pour l'élaboration des modèles numériques. De plus, si l'équipement physique à étudier est « fermé » (cas des équipements industriels), l'utilisation d'un simulateur TRH devient indispensable en permettant de considérer celui-ci comme une « boîte-noire ».

L'électronique de puissance a constitué une bonne partie des études menées dans cette thèse, à la fois pour l'interfaçage des systèmes de génération non conventionnels, comme système de soutien ou pour le contrôle de flux énergétiques dans les réseaux. Nous retrouvons le deux cas : électronique de puissance physique/analogique (*0*) ainsi que simulée numériquement en temps-réel (*0*).

Toutes ces applications ont contribué à la validation des fonctionnalités et de la grande flexibilité de la plateforme expérimentale TRH conçue au G2Elab.

Après avoir utilisé le simulateur TRH pour des études des *composants* de génération ou de gestion des flux dans les réseaux électriques, dans le *0* nous sommes passé à des *systèmes plus complexes*. Deux cas ont été étudiés, un portant sur l'habitat intelligent et le deuxième sur le microréseau résidentiel îlotable.

Dans le premier cas il s'agit des travaux menés au sein du projet de recherche industriel « MULTISOL : optimisation des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque ». Dans le contexte de tarifs non-préférentiel pour le rachat de l'énergie solaire par le fournisseur (cas présent en France), la consommation locale de l'énergie PV produite ainsi que la gestion optimale de la production et de la consommation devient essentiels. En conséquence, nous avons présentés dans § 4.2 des solutions possibles afin d'arriver à induire un double intérêt économique et technique, tant pour l'utilisateur que pour la compagnie de distribution d'électricité (et éventuellement le gestionnaire du réseau). Plusieurs architectures matérielles et logicielles ont été proposées en fonction du type d'installation électrique (ancienne, modernisée ou neuve ; l'indépendance des circuits au niveau de tableau électrique, etc.) capables à assurer les fonctionnalités envisagées par les algorithmes de gestion optimale.

Après une étape de classification et d'identification des équipements, des travaux ont été effectués aussi sur leur modélisation. Ces modèles ont été réalisés dans plusieurs buts, certains impliquant des dynamiques et donc des temps de simulation différents : algorithmes de dimensionnement, algorithmes prévisionnels, algorithmes réactifs et validation temps-réel de ceux-ci. Nous sommes ainsi arrivés encore une fois au simulateur temps-réel hybride pour la validation des concepts et algorithmes proposés. En utilisant cet outil, il sera possible de tester les performances du système résultant du projet dans des conditions de fonctionnement réel, avant sa mise en fabrication.

En plus de son application pour la validation du système MULTISOL, le modèle du système PV proposé dans § 4.2.6.1.1 (panneaux PV plus système d'interfaçage) est aussi utilisable par exemple pour le test de la robustesse des méthodes de suivi du maximum de puissance (MPPT - Maximum Power Point Tracking). Cet usage du modèle PV est encore plus intéressant du fait qu'on peut simuler des régimes de fonctionnement en mode dégradé (quelques cellules défectueuses ou ombrées), ou des champs PV comportant de modules avec propriétés différentes.

La plus part des applications présentés dans ce rapport ont été réalisés en utilisant ARENE URT (§ 3.3, § 3.4, § 3.5, § 4.3) comme simulateur temps-réel numérique (brique principale de la plateforme TRH). Néanmoins, il y a quelques années EdF (développeur) a arrêté tout support sur cet outil ce qui a mené à un besoin accru de rechercher d'autres outils pouvant répondre à nos besoins particuliers. Nous avons ainsi décidé l'achat d'un nouveau simulateur temps-réel numérique – RT-LAB. Le passage à ce nouvel élément, beaucoup plus performant et flexible, a été effectué avec succès et validé lors d'une application identique à § 3.3.5 [FLO 08]. C'est cet élément qui, grâce à sa puissance de calcul élevée et à l'utilisation de l'interface de Matlab/Simulink pour la création des modèles, a rendu possible la réalisation du démonstrateur TRH dans le cadre du projet MULTISOL.

Dans la deuxième partie du même chapitre (§ 4.3) il a été démontré l'aptitude du microréseaux résidentiel flottage comme structure pour améliorer l'intégration des générateurs à base d'énergies renouvelables dans le réseau ainsi que comme configuration spécialement adaptée pour l'amélioration de la fiabilité d'approvisionnement. Une architecture innovatrice et des fonctions de contrôle/commande et gestion adaptées ont été présentées et validées en temps réel à l'aide du simulateur TRH. Le lissage de la puissance active exportée ou importée a été proposé comme un service complémentaire à rendre par les microréseaux résidentiels, qui pourrait dans l'avenir faciliter l'opération du système électrique (favorisé par des signaux économiques appropriés).

La plateforme résultante à la fin de ma thèse est complémentaire à une plateforme semblable, qui se trouve à L2EP (Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de

Puissance) de Lille. Cependant, les applications réalisées pendant cette thèse ont un caractère innovant en Europe, permettant au G2Elab d'acquérir une avance considérable par rapport aux autres laboratoires de recherche dans le même domaine.

En ce qui concerne la poursuite directe de ce travail, différentes perspectives s'ouvrent :

🌀 Au sujet du projet MULTISOL :

- Une amélioration des modèles de charges, afin de rendre le démonstrateur temps-réel hybride encore plus réaliste, afin d'arriver à simuler les influences thermiques entre les équipements et l'habita, ou pour mieux estimer et simuler les possibilités de stockage (thermique). Ces améliorations concernent, entre autres, les dispositifs qui ont une influence considérable sur l'apport thermique (four, table de cuisson, etc.), les dispositifs qui permettent le stockage de l'énergie sous forme de chaud (chauffe-eau) ou de froid (réfrigérateur, congélateur), ainsi que le comportement dynamique thermique de la maison, qui doit prendre en compte tous ses apports. Toujours au sujet thermique, il peut devenir intéressant de modéliser la pompe à chaleur comme système de chauffage.
- L'introduction des services système dans le cadre des fonctionnalités des algorithmes de gestion.
- La multiplication de la typologie des sources capables à être prises en compte par le système de gestion. Nous pouvons énumérer, de façon non exhaustive, en restant toujours dans le domaine des systèmes de génération non conventionnels : les piles à combustible, les microturbines hydrauliques, les hydroliennes, etc.
- La suite logique de ce projet sera de passer à un niveau supérieur de complexité et de gérer les flux énergétiques par exemple d'un quartier. Nous serons ainsi confrontés avec plusieurs types de sources et avec plus des charges, ayant différentes propriétés et intermittences. La complexité du problème augmente, mais le même effet peut apparaître sur les degrés de liberté.

🌀 Au sujet du projet de la plateforme temps-réel hybride :

- Une première problématique qui s'aperçoit à court terme est l'étude du comportement des petits moyens de production face aux déséquilibres. Cet autre type de perturbation (à part les chutes de tension, les variations de fréquence, etc.) peut apparaître quand les départs triphasés, sur lesquelles sont connectés ces sources, ne sont pas spécifiques (il sont partagés avec des clients monophasés). Le simulateur TRH permettra l'obtention et l'étude de ces perturbations.
- L'outil résultant en fin de cette thèse - le simulateur temps-réel hybride - restera au cœur des activités de l'équipe SYREL (SYstèmes et Réseaux ELectriques). En étape de conception, validation, mise au point, ou test cette plateforme constituera le support pour des nombreuses études à venir.
- L'encadrement d'un dernier stagiaire en projet de fin d'études, a permis d'une part de transférer mes compétences, et d'autre part de rendre possible la poursuite de mes travaux. En conséquence, à la fin de ma thèse, je ne laisse pas seulement des moyens techniques à disposition de l'équipe, mais aussi une bonne partie des compétences que j'avais acquises, à la fois via mes rapports et, le plus important, via un successeur.

PUBLICATIONS

Articles aux conférences et dans revues :

H. Gaztañaga, I. Etxeberria-Otadui, **D. Ocnasu**, S. Bacha, « Real-Time Analysis of the Transient Response Improvement of Fixed-Speed Wind Farms by Using a Reduced-Scale STATCOM Prototype », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, May 2007

D. Arnoult, B. Raison, **D. Ocnasu**, X. Margueron, D.D. Rasolomampionona, J. Guiraud, G. Verneau, A. Almeida, C. Duvauchelle, « Real-time hybrid simulation facility for PV inverter testing », The 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milan, Italy, September 2007

C. Gombert, **D. Ocnasu**, S. Bacha, D. Roye, Y. Bésanger, « Test of a PWM Controller using Real-Time Digital Simulation », International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)

D. Ocnasu, C. Gombert, S. Bacha, D. Roye, F. Blache, « Real-Time Hybrid Facility for the Study of Distributed Power Generation Systems », International Conference on Renewables Energies, Bejaia, 2007

Communications scientifiques :

D. Ocnasu, « Témoignage utilisateur RT-LAB », Séminaire – « Moteurs, systèmes et réseaux électriques, solutions innovantes pour l'optimisation des développements et des essais », organisateurs : B2i, Opal-RT et MathWorks, 19 juin 2008, Paris

S. Bacha, **D. Ocnasu**, « Real-time background at G2Elab », Real Time 2008 - The 1st Annual Opal-RT International Users Conference, 12 et 13 juin 2008, Québec, Canada

D. Ocnasu, « Témoignage utilisateur RT-LAB », Séminaire – « Moteurs, systèmes et réseaux électriques, solutions innovantes pour l'optimisation des développements et des essais », organisateurs : B2i, Opal-RT et MathWorks, 18 octobre 2007, Paris

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ABG 08] Association Bernard Gregory, « Nouveau Chapitre de la Thèse » - Campagne 2008
- [ADE 05] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), « la production d'électricité raccordée au réseau », mai 2005
- [AHM 03] G.E. Ahmad, H.M.S. Hussein, H.H El-Ghetany, « Theoretical analysis and experimental verification of PV modules », *Renewable Energy*, Vol. 28, 1159-1168, July 2003
- [AND 03] P. Andrieux, D. Procacci, « Normalisation BT : Evolution de la norme NF C 15-100 », guide technique Schneider Electric, 2003
- [AND 06] A. M. Andreica, « Système aérogénérateur synchrone couplé au réseau - Réalisation d'un banc de test temps-réel », Master of Science dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, June 2006
- [AND 08] M. Andreica, S. Bacha, D. Roye, I. Exteberria-Otadui, I. Munteanu, « Micro-Hydro Water Current Turbine Control for Grid Connected or Islanding Operation », *IEEE 39th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008*
- [ANN 99] « Annexe de l'arrêté du 30 décembre 1999 relatif aux conditions techniques de raccordement au réseau public de transport (réseau à 400 kV exclu) des installations de production d'énergie électrique de puissance installée inférieure ou égale à 120 MW »
- [ARE 02] ARENE « A new generation of digital real-time power system simulators », Documentation technique, Mars 2002
- [ARN 07a] D. Arnoult, B. Raison, D. Ocnasu, X. Margueron, D.D. Rasolomampionona, J. Guiraud, G. Verneau, A. Almeida, C. Duvauchelle, « Real-time hybrid simulation facility for PV inverter testing », *The 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milan, Italy, September 2007*
- [ARN 07b] D. Arnoult, « Détection d'îlotage par saut d'impédance réseau », rapport d'obtention du diplôme d'ingénieur CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers) en électrotechnique, mai 2007
- [BAR 97] Jean-Paul Barret, Pierre Bonnard, Bruno Meyer « Simulation des réseaux électriques », Eyrolles, Juillet 1997
- [BAR 00] A. O. Barry, F. Guay, S. Guerette and P. Giroux, « Digital real-time simulation for distribution systems », *IEEE 9th Int. Conference on Transmission and Distribution Construction, Montreal, Quebec, Canada, 2000*
- [CAO 02] Jie Cao, Wenying Huang, Jianping Zhang, Masanori Matsuura, Hisanori Ito, Nobutoshi Saito, « Power System Analysis of Fujian Grid with Analog Simulator », *The IERE China Forum, 11-12 November 2002*
- [CEI 00] CEI 61000-2-8, "Voltage Dips and Short Interruptions on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurement Results", Novembre 2000

- [CEN 01] CENELEC, EN 50160, “Caractéristiques des tensions sur les réseaux publics de distribution d’électricité”, 2001
- [CHA 04] Roger Champagne, Louis-A. Dessaint, Handy Fortin-Blanchette, and Gilbert Sybille « Analysis and Validation of a Real-Time AC Drive Simulator », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 2, March 2004
- [DEK 02] B. De Kelper, L.A. Dessaint, K. Al-Haddad, K. Nakra, "A comprehensive approach to fixed-step simulation of switched circuits" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, issue 2, pp. 216 – 224, March 2002
- [DOI 90] Hirosuke Doi, Masuo Goto, Tadao Kawai, Sumio Yokokawa, Tomohiro Suzuki, « Advanced Power System Analogue Simulator », IEEE Transaction on Power Systems, vol. 5, no. 3, August 1990
- [DUF 02] Christian Dufour, Jean Bélanger, Simon Abourida, « Accurate Simulation of a 6-pulse Inverter with Real Time Event Compensation in ARTEMIS », Electrimacs, August 2002
- [DUR 93] R.C. Durie, C. Pottle, « An extensible real-time digital transient network analyzer », IEEE Transactions on Power Systems, Volume 8, Issue 1, Feb. 1993 Page(s): 84 – 89
- [EDF 07] Electricité de France, « bien choisir mon contrat », outil on-ligne d’estimation de la consommation, 2007
- [ETX 03] I. Etxeberria-Otadui, « Sur les Systèmes de l’Electronique de Puissance dédiés à la Distribution Electrique – Application à la Qualité de l’Energie », Thèse de l’Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2003
- [FLO 08] A. Florescu, « Simulation temps-réel hybride de réseaux », rapport de projet de fin d’études, G2Elab, juin 2008
- [FOR 01] Paul Forsyth, Rick Kuffel, Rudi Wierckx, Jin-Boo Choo, Yong-Beum Yoon, Tae-Kyun Kim, « Comparison of Transient Stability Analysis and Large-scale Real Time Digital Simulation », IEEE Porto Power Tech Conference, September 2001, Porto, Portugal
- [FOR 04] P. Forsyth, T. Maguire and R. Kuffel, « Real time digital simulation for control and protection system testing », 35th Int. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004
- [GAL 02] D. Galván, G. Luengo, S. Tomanovic, R. Portales, E. Llorente, « Análisis de Generación Eólica en Sistemas Eléctricos de Potencia », ABB, 2002
- [GAZ 06] H. Gaztañaga Arantzamendi, "Etude de structures d’intégration des systèmes de génération décentralisée: Application aux microréseaux", Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, December, 2006
- [GAZ 06b] H. Gaztañaga, I. Etxeberria, S. Bacha, D. Roye, « Real-Time Analysis of the Control Structure and Management Functions of a Hybrid Microgrid System », IEEE – IECON 2006, Paris.
- [GAZ 07] Haizea Gaztañaga, Ion Etxeberria-Otadui, Dan Ocnasu, Seddik Bacha, « Real-Time Analysis of the Transient Response Improvement of Fixed-Speed Wind Farms by Using a Reduced-Scale STATCOM Prototype », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, May 2007

- [GOM 03] Christophe Gombert, « Etat de l'art sur la simulation numérique temps-réel, problématique de la simulation de dispositifs à base d'électronique de puissance et solutions », Note Technique GIE No : NTe/Mo43/03/002/A, juin 2003
- [GOM 05a] Christophe Gombert, Seddik Bacha, Daniel Roye, Yvon Besanger, Renaud Chareille, Francois Blache, « Test of PWM Power Electronics Devices for Electricity Network Using Digital Real-Time Simulator », C I R E D 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 6-9 June 2005
- [GOM 05b] C. Gombert, « Simulation temps-réel des dispositifs d'électronique de puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique », Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, September, 2005
- [GOM 06] C. Gombert, D. Ocnasu, S. Bacha, D. Roye, Y. Bésanger, « Test of a PWM Controller using Real-Time Digital Simulation », International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Dec. 2006
- [GOT 98] D.J. Gotham, G.T. Heydt. « Power Flow Control and Power Flow Studies with FACTS Devices », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, February 1998
- [HAD 07] D.L. HA, « Un Système Avancé de Gestion d'Energie dans le Bâtiment pour Coordonner Production et Consommation », Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, September, 2007
- [HAD 08] D.L. HA, S. Ploix, E. Zamai, S. Bacha, « Gestion des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque », International Building Performance Simulation Association, IBPSA, Lyon, France, Novembre 2008
- [HAT 04] N. Hatzigiorgiou. "MICROGRIDS : Potential Allies for a More Efficient Power Supply". Key Note Speech, Medpower'04, Cyprus, 2004
- [HIG 00] L. Gyugyi, N. G. Hingorani. "Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", Edition IEEE Press 2000, ISBN 0-7803-3455-8
- [HUE 01] O. Huet, O. Maugeard, O. Chilard, L. Popiel, F. Klein, C. Moreau, P. Tantin, J. Pernot, D. Chatrefou, « Improving Site Tests Efficiency by Real Time Testing of a New Communication Link Between Sensors and a Protection Device », 2001
- [INE 07] Institut National de l'Energie Solaire (INES), « Fiches techniques INES RDI », novembre 2007
- [JAK 99] D. Jakominich, R. Krebs, D. Retzmann, A. Kumar, « Real Time Digital Power System Simulator Design Considerations and Relay Performance Evaluation », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
- [JUN 00] Chang-Ho Jung, Hyun-Soo Jung, Jin-0 Kim, « Dynamic Characteristic Test of Protective Relay for Double Circuit Using Real Time Digital Simulator (RTDS) », 2000 IEEE
- [KHO 99] Bahram Khodabakhchian, Louis-A Dessaint, Michel Lavoie, « Simulation en temps réel complètement numérique de grands réseaux de transport EHT, en vue d'analyser et de tester leurs circuits de commande et de protection », IEEE Canadian Review - Summer 1999

- [KRE 04] R. Krebs, O. Ruhle, « NETOMAC Real-Time Simulator - A New Generation of Standard Test Modules for Enhanced Relay Testing », 2004 IEEE
- [LAV 04] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, « *Mitigation of voltage dips effects on wind generators* », EWEC'04 Londres, Angleterre, 2004
- [LAV05] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, 9 décembre 2005
- [LED 01] P. Ledesma. "Modelos de parques eólicos para el estudio de su impacto en el comportamiento dinámico de redes eléctricas". Thèse de doctorat de l'Université Carlos III de Madrid, 2001
- [LEP 07] E. Le Pelleter, "Outil d'électronique de puissance pour le maillage/bouclage des réseaux de distribution : Application au contrôle des flux de puissance et la limitation des courants de court-circuit ", Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, December, 2007
- [LER 07] Leroy Merlin, « Le chauffage électrique », Fiche Etude, 2007
- [LIU 02] S. Liu, R. A. Dougal, « Dynamic Multiphysics Model for Solar Array », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 2, June 2002
- [MAG 00] Marcio Magalhães de Oliveira, « Power Electronics for Mitigation of Voltage Sags and Improved Control of AC Power Systems », Doctoral Dissertation, Royal Institut of Technology, Department of Electric Power Engineering, Electric Power Systems, Stockholm 2000
- [MAR 01] S. Marino, « Réseau de distribution communs GIE IDEA », note interne technique, 2001
- [MEN 06] J. Mendizabal, "Estudio de interacciones entre los elementos de una microrred controlada y la red eléctrica principal", Rapport du projet de fin d'étude d'ingénieur technique, Mondragon Unibertsitatea, Juillet 2006
- [MIC 02] « MICROGRIDS – Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids », EU Contract ENK5-CT-2002-00610, Technical Annex, Mai 2002
- [MIC 06] « MORE MICROGRIDS – Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids », <http://microgrids.power.ece.ntua.gr>.
- [MEY 98] Bruno Meyer, Michel Jerosolimski, Marc Stubbe, « Outils de simulation dynamique des réseaux électriques », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 4 120, novembre 1998
- [MOK 06] M. El Mokadem, C. Nichita, B. Dakyo, W. Koczara, «Maximum wind power control using torque characteristic in a Wind diesel system with battery storage», "Recent Developments of Electrical Drives", Springer Engineering, 2006
- [MOT 02] Hiroaki Motoki, Akihiko Yokoyama, Hitoshi Kawakami, Kensuke Kawasaki, « Experimental Study on Power Damping Enhancement by Multiple Digital Adaptive PSS's Using Analog-Type Real-Time Power System Simulator », IEEE, 2002
- [NICH02] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, E. Ceanga, « Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulators », IEEE Transactions on Energy

- Conversion, IEEE PE-074EC (05-2002), Vol. 17, No. 4, pp. 523-530, December 2002
- [NICH06] C. Nichita, M. El Mokadem, B. Dakyo, «Wind turbine simulation procedures», Wind Engineering Journal, Vol. 30 issue 3, p. 187-200, 2006
- [NIM 00] G. Nimmersjb, M.M. Saha, B. Hillstrom, «Protective relay testing using a modern digital real time simulator », 2000 IEEE
- [OCN 04] Dan Ocnasu, « Superconducting Fault Current Limiter in Power Networks », Stage PFE, LEG, 2004
- [OCN 05] Dan Ocnasu, « Connexion à ARENE Temps-Réel du Banc Expérimental Dédié à la Génération Eolienne », Master of Science dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, June 2005
- [OCN 07] D. Ocnasu, C. Gombert, S. Bacha, D. Roye, F. Blache, « Real-Time Hybrid Facility for the Study of Distributed Power Generation Systems », International Conference on Renewables Energies, Bejaia, 2007
- [ORT 04] E. I. Ortiz-Rivera, F. Z. Peng, « A Novel Method to Estimate the Maximum Power for a Photovoltaic Inverter System », 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004
- [PAP 00] Marco Papini, Paul Baracos, « Real-Time Simulation, Control and HIL with COTS Computing Clusters », <http://www.Opal-RT.com>
- [PAQ 07] J.N. Paquin, J. Moyen, G. Dumur, V. Lapointe, « Real-Time and Off-Line Simulation of a Detailed Wind Farm Model Connected to a Multi-Bus Network », IEEE Electrical Power Conference (EPC'07), Montreal, Canada. October 25-26, 2007
- [PET 97] P. Petitclair, « Modélisation et Commande des structures FACTS (Flexible AC Transmission Systems): Application au STATic COMPensator », Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, July, 1997
- [PHA 08] T.T. H. Pham, F. Wurtz, S. Bacha, S. Ploix, « Optimal sizing of PV based multi-source system for household application », OIPE 2008, The 10th Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism, Ilmenau, Germany, September, 2008
- [PHO 05] Photowatt, « Module Polycristalline – Haute Fiabilité : PWX500 - 12V », fiche produit, 2005 (www.photowatt.com)
- [PUI 05a] PUISSANCE+, « PCU-3X5000-BC Manuel utilisateur », Référence du document: MU-AC0106-05, 2005
- [PUI 05b] PUISSANCE+, « PCU-3X5000-BC - Relevé de Mesure », 2005
- [RTE RG] « RT-EVENTS Block Library Reference Guide », © 2005 Opal-RT Technologies Inc.
- [RTL AS] « RT-LAB Asynchronous User Programs », © 2005 Opal-RT Technologies Inc.
- [RTL UG] « RT-LAB Version 8.1 User Guide », © 2005 Opal-RT Technologies Inc.
- [RTL T4] « RT-LAB Training Module 4 : Parameters and Acquisition - Customizing your view into the simulation », <http://www.opal-rt.com>

- [RTL T6] « RT-LAB Training Module 6: Computational Anatomy and Synchronization », <http://www.opal-rt.com>
- [SON 99] Y.H. Song, A.T. Johns. « Flexible A.C. Transmission Systems », Edition IEE, Institution of Engineering and Technology, 1999, ISBN 978-0852967713
- [SPE 94] R. Spee, S. Bhowmik, J.H.R Enslin, « Adaptive control strategies for variable-speed doubly-fed wind power generation systems », Industry Applications Society Annual Meeting, 1994
- [STE 93] D. Stellbogen, « Use of PV circuit simulation for fault detection in PV array fields », Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Third IEEE, Page(s):1302 - 1307, May 1993
- [STE 04] M. Steurer, H. Li, K. Shi, D. Zhang, « Developement of a Unified Design, Test and Research Platform for Wind Energy Systems based on Hardware-In-the-Loop Real Time Simulation », 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Germany, 2004
- [STR 99] K. Strunz, H. Fromont, "Space variant integration in digital real time simulators for electromagnetic transients", Proceedings of the 3rd International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS), Västerås, Sweden, May 1999
- [TEO 04] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, « Flexible Control of Small Wind Turbines With Grid Failure Detection Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Mode », IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 19, no. 5, september 2004
- [TRI 07] P. Tritschler, « Emulation of Fuel Cell Systems », Master of Science dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, June 2007
- [WAT 03] N.R. Watson, « Accuracy of Discretization Methods for Electromagnetic Transient Simulation », presented at the 2003 International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA
- [WUR 07] F. Wurtz, S. Bacha, T.T.Ha. Pham, G. Foggia, D. Roye, G. Warkosek, « Optimal Energy Management in buildings: sizing, anticipative and reactive management », Energy Management System Workshop, Torino, Italy, May 2007
- [YUN 04] Yunwei Li, D. Mahinda Vilathgamuwa, Poh Chiang Loh, « Design, Analysis, and Real-Time Testing of a Controller for Multibus Microgrid System », IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 19, no. 5, September, 2004

**ANNEXE A. VALORISATION DES COMPETENCES DES
DOCTEURS : «UN NOUVEAU CHAPITRE DE LA THESE
®» [ABG 08]**

Dan OCNASU

Ecole Doctorale : « Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal »

Université Joseph Fourier - Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble

Mentor : Jean Christophe KLEIN



Sujet académique de la thèse

**« Modélisation, Commande et Simulation Temps-Réel Hybride
des Systèmes de Génération Non Conventionnels »**

Directeur de thèse : Seddik BACHA

Co-encadrant : Daniel ROYE

Date probable de soutenance de la thèse : Septembre 2008

I.1 Présentation succincte

Avant de rentrer dans le cœur de mon sujet, je vous propose un rappel sur ce qu'il s'est passé le 28 septembre 2003 en Italie. Il s'agissait d'une panne généralisée d'électricité, ou « black-out », mais peu importe l'appellation, le bilan est le même : *56 millions d'habitants dans le noir*. A l'origine de cet événement reste l'incompatibilité persistante entre la raison commerciale et les lois physiques. Ainsi, la nuit, l'Italie préférait arrêter une partie de ses propres centrales pour importer du courant électrique meilleur marché. Aucun souci jusqu'à ce qu'une des grandes lignes électriques qui assurait l'alimentation de l'Italie par la Suisse ait claqué. Encore un événement sans importance évidente, mais qui, ajouté à d'autres petites erreurs, a mené par un effet de domino au collapse du système électrique italien.

Au lendemain du black-out, de nombreuses entités, comme l'UCTE (Union de Coordination du Transport Electrique) ou des ONG environnementales, ont commencé à plaider pour de plus petites capacités de production décentralisées et régionales pour réduire les distances de transit. Nous nous approchons ainsi du contexte de mon travail.

Les réseaux électriques, afin de limiter les pertes et d'optimiser le transit de l'énergie entre les producteurs et les consommateurs, sont conçus sur plusieurs niveaux de tension. De ce fait, à partir de sa génération et jusqu'à son arrivée dans la prise à 230V, l'électricité passera par plusieurs étapes de transformation.

Il y a quelques années (*Figure 1(a)*), il y avait que des grands producteurs (centrales nucléaires, centrales au charbon ou au gaz, etc.) qui étaient connectés à la très haute tension (pouvant arriver jusqu'aux centaines de milliers de volts), ce qu'on appelle *réseau de transport*. De l'autre côté, juste quelques grands consommateurs industriels étaient connectés au même réseau, quant à la majorité, elle était raccordée à des tensions plus basses, sur les *réseaux de distribution*.

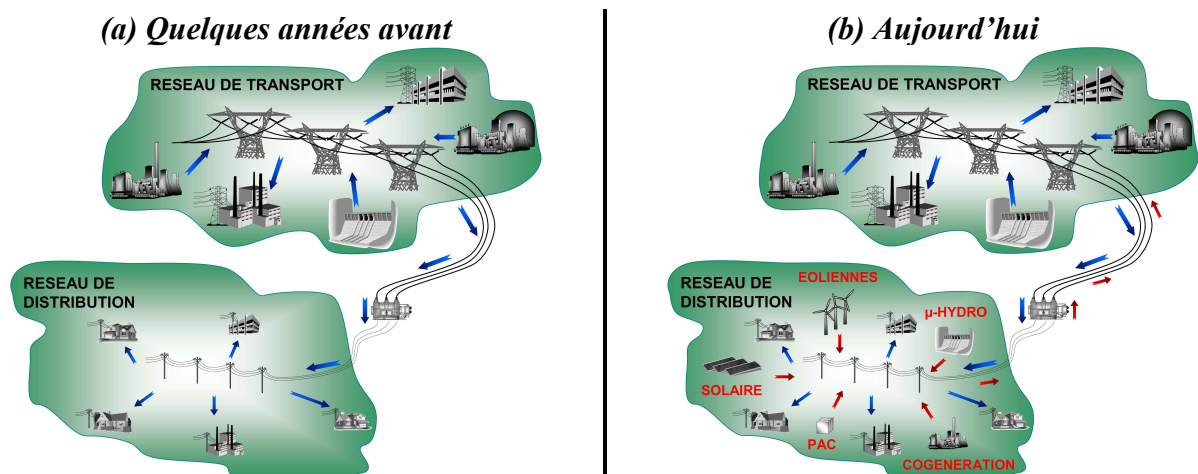


Fig. 1 : Contexte

Aujourd'hui (*Figure 1(b)*) en raison des problèmes environnementaux et suite à la diminution des ressources disponibles, de nombreux petits producteurs d'origine renouvelable (vent – éoliennes, soleil – photovoltaïque, eau – petites centrales hydrauliques, hydrogène – pile à combustible, etc.) viennent se connecter au niveau du réseau de distribution. Ce changement, peut avoir de lourdes conséquences sur le fonctionnement d'ensemble du système électrique, diverses interactions étant présentes entre les différents acteurs :

- impact des producteurs sur le réseau : principalement dû au caractère intermittent de certaines sources primaires, comme le vent ou le soleil ;
- impact du réseau sur les producteurs : certains producteurs sont sensibles aux perturbations qui peuvent apparaître dans les points de raccordement ;
- interaction entre les différents producteurs.

C'est pour cette raison que nous avons besoin de développer des outils de simulation et d'étude, bien adaptés à la complexité et à la dynamique de ces domaines !

C'est dans ce contexte que mon travail se situe, son but principal étant le développement et la mise en oeuvre d'une *nouvelle plateforme de recherche, d'enseignement et de démonstration*, basée sur un simulateur temps-réel hybride. En d'autres termes, l'idée est d'allier des outils de simulation numériques (sur ordinateur) avec des éléments analogiques, réels, afin d'arriver à étudier le comportement de certains dispositifs, dans des conditions réelles de fonctionnement.

Toujours sur la thématique des énergies renouvelables, en parallèle avec la gestion de cette plateforme, un projet industriel a constitué aussi le sujet de ma thèse - *MULTISOL*. Plus précisément, il s'agit d'un projet de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) portant sur la gestion optimale de l'énergie dans un habitat photovoltaïque. Le but de ce projet est de réaliser un outil qui, à partir de prévisions (conditions météorologiques, prix de l'énergie, comportement de l'utilisateur), gère de manière optimale la totalité des charges et des sources disponibles, sans affecter le confort de l'utilisateur.

1.2 Ma thèse dans son contexte

L'activité de recherche de ma thèse, a été effectuée sous l'encadrement de Monsieur Seddik BACHA, responsable de l'équipe *SYREL* (SYstèmes et Réseaux ELectriques) au sein de *G2Elab* (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble). Ce dernier, précédemment connu comme LEG (Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble), est le premier laboratoire universitaire français et européen de Génie Electrique. Il associe Grenoble INP (Institut National Polytechnique de Grenoble), CNRS (Centre Nationale de la Recherche Scientifique) et UJF (Université Joseph Fourier). Ses recherches couvrent la majorité des thèmes actuels du Génie Electrique : matériaux (magnétiques, supraconducteurs, ...) et leurs applications, la modélisation, la conception et l'optimisation des composants et des systèmes électriques, les machines et les réseaux électriques, les microsystemes.

Avec un financement donné par l'Etat Français (allocation de recherche), cette thèse a été préparée dans le cadre de l'Ecole Doctorale EEATS – « Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal ».

🔄 Situation du projet au regard de la concurrence

La plateforme résultante de mon projet est complémentaire à une plateforme semblable, qui se trouve à L2EP (Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance) de Lille. Cependant, les applications réalisées pendant cette thèse ont un caractère unique en Europe, permettant à G2Elab d'acquérir une avance considérable par rapport aux autres laboratoires de recherche dans le même domaine.

Des principes similaires sont utilisés dans l'environnement industriel, dans des domaines comme l'automobile ou l'aéronautique, et dans une plus petite proportion, dans le génie électrique : à EdF (Electricité de France) pour le test d'équipements. Encore une fois, G2Elab a pris une longueur d'avance, à la fois par le type d'applications abordées et par les outils techniques utilisés.

🔗 Compétences scientifiques, techniques et humaines mises à la disposition du projet

Dans cette rubrique, nous verrons toutes les entités et les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon projet.

De ce fait, il faut mentionner tout d'abord le laboratoire lui-même, qui a toujours mis à ma disposition tous les outils nécessaires pour l'activité menée : bureau, ordinateur, outils de calcul et simulation, matériel d'expérimentation, ainsi que les éléments souvent oubliés comme : imprimante, photocopieuse, fax et papeterie. Ensuite, en terme de compétences humaines il faut évoquer : mes deux encadrants et leurs précieux conseils, les deux ingénieurs de recherche et leur aide sur les plateformes expérimentales, les techniciens, les doctorants et mes stagiaires avec lesquels j'ai eu des collaborations directes sur des applications, tous les membres de l'équipe et tous les échanges avec eux. Il ne faut pas oublier non plus les fournisseurs et les partenaires industriels et universitaires.

🔗 Appartenance de l'équipe à des réseaux scientifiques, socio-économiques, ...

En effet, le budget du G2Elab est constitué dans une proportion de plus de 70% de contrats, ce qui montre une collaboration industrielle très développée. Ces collaborations peuvent se manifester sous forme : d'actions de recherche classiques (c'est-à-dire des stages de master ou thèse), de contrats cadre, ou de montages industriels communs (comme par exemple le groupe d'intérêt économique IDEA - Inventer la Distribution Electrique de l'Avenir -, constitué par notre laboratoire, Electricité de France et Schneider Electric). D'autres exemples de partenaires peuvent être : ALSTOM, AREVA, STµelectronics, THALES, etc.

Coté universitaire de nombreuses collaborations sont présentes aussi, sur le site Grenoblois (GIPSA, G-SCOP...), au niveau national (Ampère - Lyon, LAAS - Toulouse, L2EP – Lille...) et même au niveau international (USA, Italie, Roumanie, Algérie...).

1.3 Moi dans ce contexte

🔗 Mes raisons du choix de faire une thèse et de travailler sur ce sujet

En fin d'études d'ingénierie en Roumanie, avec un fort caractère théorique, j'ai eu l'opportunité par une bourse ERASMUS/SOCRATES d'effectuer mon projet de fin d'études au LEG (Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble). Pendant ce stage de 5 mois, j'ai eu l'occasion d'appliquer en pratique les considérations théoriques déjà connues et d'en acquérir de nouvelles. Les sujets complexes et multi domaines avec lesquels j'ai été confronté, mélangeant la conception avec les manipulations, l'innovation avec le réel, ont continué d'accroître mon goût pour la recherche. Ainsi j'ai décidé de poursuivre mon activité avec un master de recherche et une thèse de doctorat au sein du même laboratoire, toujours sur le même sujet captivant de la simulation temps-réel hybride.

🔗 Mon rôle dans la définition et la programmation du projet

Contrairement aux financements de type industriel, ma bourse d'Etat a conféré un caractère très flexible à ma thèse. Ainsi, en gardant toujours la thématique de base (simulation temps-réel hybride des systèmes de génération non conventionnels), mon directeur et moi de thèse nous avons pu varier l'orientation du sujet, vers les directions qui nous ont paru les plus intéressantes.

II. DEROULEMENT, GESTION ET COUT DU PROJET

II.1 Préparation et cadrage du projet

🔗 Evaluation des facteurs de succès et de risques, stratégies de maîtrise des risques envisagées, choix des partenaires nationaux ou internationaux

Comme mentionné auparavant, l'objectif principal de mon projet est l'obtention d'une plateforme expérimentale utilisable pour la recherche, l'enseignement et les démonstrations. Afin de réaliser ce but, plusieurs étapes ont été identifiées comme essentielles, chacune avec ses facteurs de risque et de succès :

- *Concevoir* la plateforme, en partant des éléments déjà existants et en identifiant ceux encore nécessaires. Afin de minimiser les risques d'incompatibilité entre les composants, nous avons élaboré les cahiers des charges spécifiques pour certains équipements clé (comme par exemple un amplificateur de puissance) et nous avons lancé les commandes. Une autre mesure prise pour le bon déroulement de cette phase a été la collaboration avec le support d'Electricité de France (concepteur de l'un des éléments de la plateforme).
- *Etudier la compatibilité* entre les différents composants. Une étape nécessaire pour éliminer certains risques mais qui peut engendrer ses propres aléas, en raison du manque des données constructeur ou à cause de non prise en compte des divers phénomènes perturbateurs (comme par exemple la compatibilité électromagnétique). Des sous-étapes de validation par composante et par sous-système ont par ailleurs été programmées.
- *Mettre en place la plateforme*. Afin d'éviter tout risque de manipulation pendant cette phase, il a été prévu que je suive une habilitation électrique, assurée par un organisme externe (APAVE).
- *Valider le bon fonctionnement* (stabilité, précision, etc.) de la plateforme. Suite à l'étude de la compatibilité entre les différents composants et à la validation par sous-systèmes, la probabilité de succès de cette étape était très élevée. Les tâches mentionnées antérieurement ont permis de limiter les facteurs de risque pour celle-ci.
- *Elargir l'aire d'applicabilité* de la plateforme ainsi conçue. Etant au dernier stade de mon projet, dépendant du bon déroulement de ceux qui précèdent, le plus grand risque identifié est le manque de temps et la surcharge en fin de ma thèse. En vue d'éviter ce risque, j'ai planifié l'évolution de cette phase en collaboration avec d'autres doctorants du laboratoire, sur des applications concrètes. Une autre mesure prise a été l'encadrement de stagiaires, en utilisant les réseaux scientifiques déjà existants (voir § I.2).

Comme nous pouvons apercevoir dans la *Figure 2*, une autre phase de ma thèse a été l'étude des systèmes photovoltaïques. Etant un sujet relativement nouveau pour l'équipe et le laboratoire, nous avons choisi de travailler en collaboration avec INES (Institut National de l'Energie Solaire). De plus, le démarrage du projet industriel de recherche MULTISOL a rajouté à la panoplie de collaborations trois autres partenaires : Schneider Electric, G-SCOP (Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble) et ARMINES. Le lancement de ce projet (MULTISOL) a été effectué un an après le début de ma thèse.

🔗 Contribution à la mobilisation de financements externes à l'équipe

En effet, en raison de ressources mutualisées entre les équipes du G2Elab, tout investissement doit être soumis et approuvé par le Conseil de Laboratoire. D'autres sources de

financement externes ont été impliquées aussi, comme par exemple l'Ecole Doctorale ou les partenaires industriels lors de déplacements. Dans le *Paragraphe II.3* j'ai présenté la totalité des ressources mises en jeu lors de mon projet, ainsi que leur répartition entre les différents contributeurs.

🌀 *Gestion des aspects contractuels : confidentialité, propriété intellectuelle et industrielle, éthique...*

Au cours de l'exécution de mes contrats de financement (allocations de recherche et complément de bourse), je suis tenu au *secret professionnel*. Cette obligation demeurera même après la fin des contrats. Etant donné que le contrat de travail s'inscrit dans le cadre d'une mission inventive, tous les résultats de mes études appartiennent au G2Elab.

En ce que concerne le projet industriel MULTISOL, les concepts et les algorithmes de gestion développés dans le cadre du projet sont confidentiels et sont la propriété des partenaires du consortium (INES, G2Elab, Schneider Electric, G-SCOP et ARMINES). Les résultats des simulations et des tests de performance effectués sur les systèmes résultants seront publics.

Conformément au *règlement intérieur* du laboratoire G2Elab, dû au fait que je réalise des manipulations avec fort courants, j'ai été amené à effectuer une habilitation pour mesures et essais électriques à basse tension (BTA).

II.2 Conduite du projet

🌀 *Principales étapes*

Contrairement aux financements de type industriel (CIFRE), ma bourse d'Etat a fait que l'interaction avec mes encadrants n'a pas été caractérisée par une périodicité fixe des réunions, mais plutôt par une relation de type besoin/conseil. Ce fait a contribué en effet au développement de mon autonomie.

A l'inverse, le projet MULTISOL par son côté spécifique industriel, a imposé différents types de réunions : d'avancement du projet, ou de travail effectif en collaboration.

Dans la figure ci-dessous, je vous présente les principales étapes du déroulement de mon projet. En partant de mon master, effectué sur la même thématique de recherche, j'ai mis en place une première version de la plateforme d'expérimentation. Par conséquent, au démarrage de ma thèse, j'avais déjà un bon point de départ, la tâche principale étant la validation et le perfectionnement de cette plateforme. En plus de la gestion de cet outil, j'ai été chargé de l'élargissement de son aire d'applicabilité, par de nombreuses collaborations avec d'autres chercheurs de l'équipe et du laboratoire. Suite à un problème d'interruption de support, nous avons décidé de remplacer le cœur de la plateforme par un nouvel outil de simulation. De ce fait, j'ai participé au choix du remplacement et j'ai reçu la tâche d'évaluer et de valider cet outil.

Une autre direction de ma thèse, comme son titre l'indique, est l'étude des systèmes de production renouvelables, dont les systèmes solaires (photovoltaïques). Dans ce contexte, un an après le démarrage de ma thèse, j'ai été sollicité dans le cadre d'un projet industriel (MULTISOL), portant sur la « gestion optimale des flux énergétiques dans un bâtiment photovoltaïque ».

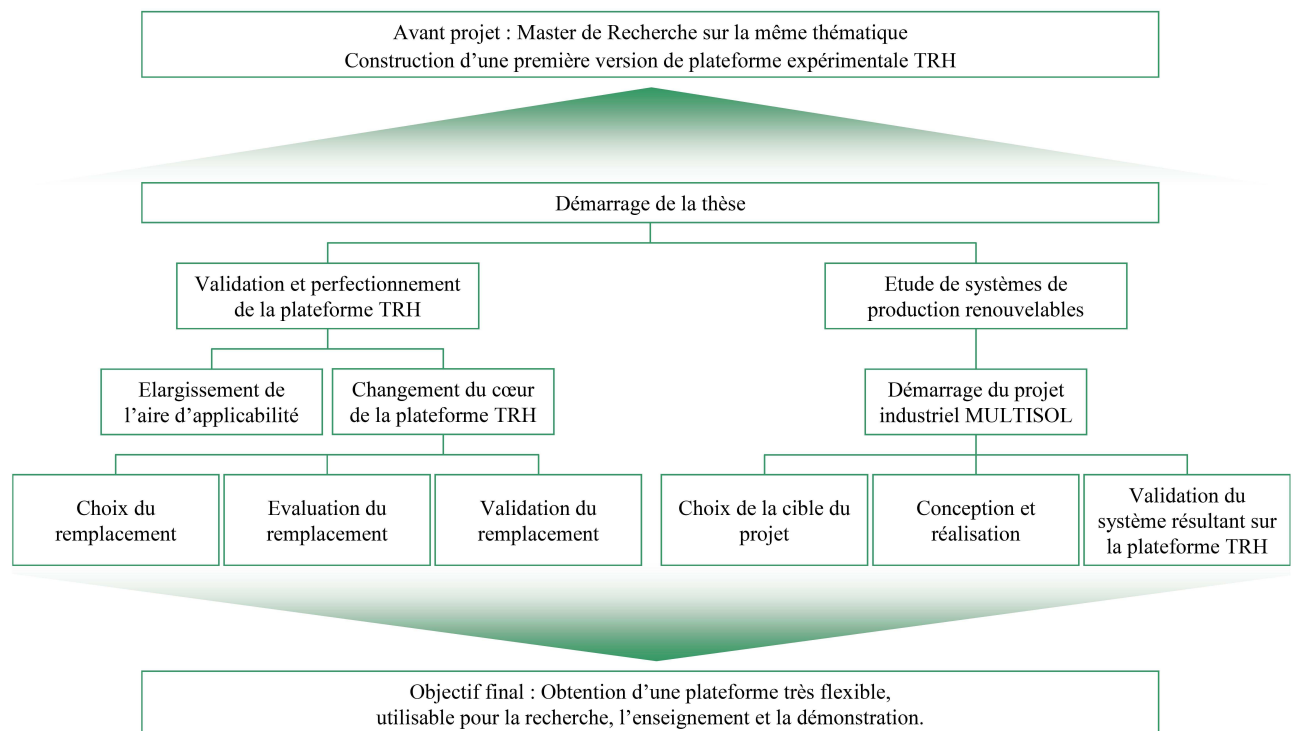


Fig. 2 : Principales étapes et phases du projet Temps-Réel Hybride (TRH)

En conclusion, le résultat final de mon activité de recherche dans le cadre du G2Elab est l'obtention d'un outil extrêmement flexible, utilisable pour un maximum d'applications pouvant apparaître dans le projet global de mon équipe et du laboratoire.

🔗 *Gestion des relations avec les partenaires scientifiques, socio-économiques, industriels, sous-traitants...*

Mis à part quelques retards de livraison, les relations avec les fournisseurs et les sous-traitants se sont toujours bien passées. De même pour les rapports avec les partenaires, qu'ils soient scientifiques ou industriels.

🔗 *Problèmes rencontrés et solutions apportées*

Un problème, rencontré dès le début du projet, a été un retard de quelques jours dans l'arrivée d'un élément clé de la plateforme, qui avait été commandé chez un sous-traitant. Le retard a été annoncé par le fournisseur mais, lors de la validation du produit par rapport au cahier des charges, le produit n'était pas totalement conforme. Ainsi, nous avons retourné le dispositif en demandant la mise en conformité, ce qui a conduit à de délais plus importants. En attendant, j'ai essayé de trouver d'autres dispositifs similaires, me permettant de valider le fonctionnement du reste du système global. De cette manière, la perte de temps a été minimisée et l'intégration rapide du dispositif à son arrivée a été possible.

Un autre événement critique dans le déroulement du projet a été l'arrêt du support assuré par Electricité de France sur une autre composante essentielle du système (l'outil de calcul en temps-réel). Après la recherche d'autres outils pouvant répondre à nos besoins particuliers, nous avons décidé l'achat d'un nouveau simulateur. Ainsi, j'ai été chargé de l'essai et de la validation de celui-ci sur une période de 6 mois. Cela a été suivi par un

déplacement chez le fournisseur au Canada, pour un échange de compétences et plusieurs formations d'approfondissement.

A part ces deux difficultés marquantes, tout au long de mon projet sont intervenus de petits manques de matériel (par exemple câbles de connexions, boîtes de raccordements, etc.), que je suis arrivé à contourner en les réalisant moi-même.

II.3 Evaluation et prise en charge du coût du projet

Je profite de l'occasion et je remercie le service comptable du laboratoire pour l'aide apporté à l'évaluation du coût total consolidé. Cette aide m'a permis de vous présenter dans la *Figure 3* une estimation très proche des coûts réels.

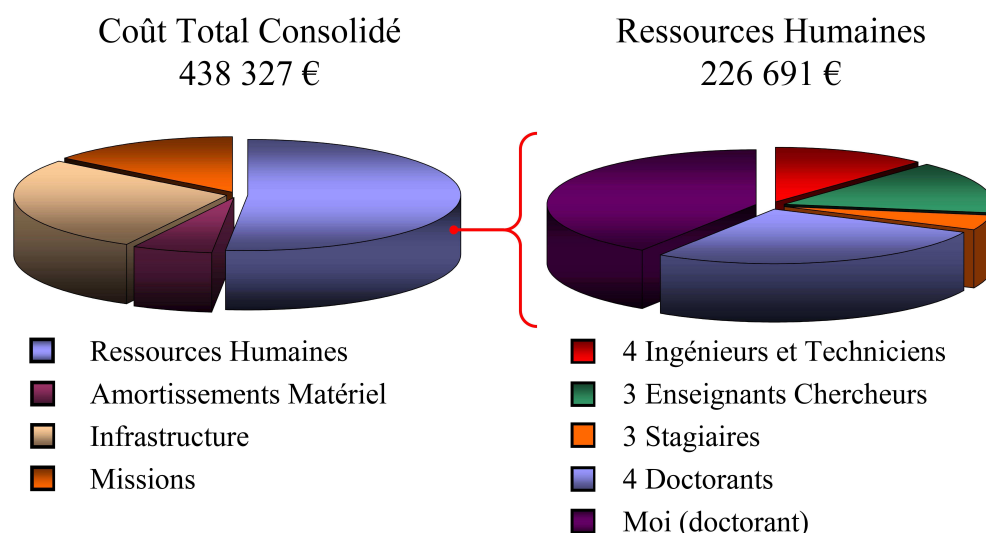


Fig.3 Evaluation du coût du projet

En ce que concerne le coût total consolidé (*Fig. 3* côté gauche), il comporte les *frais d'infrastructure* des tutelles CNRS/INPG/ENSIEG, plus les frais généraux. Les chiffres totaux sont divisés par le nombre de personnes. De même pour les *missions*, où le coût afférent total a été divisé par le nombre de participants.

Les ressources humaines sont détaillées sur la partie droite, à la fois en terme de frais et d'effectifs. Concernant les *enseignants chercheurs* et les *ingénieurs*, le montant correspondant a été estimé à partir du salaire annuel, divisé par deux (temps partiel : 50% recherche - 50% enseignement), et corrigé au prorata du temps affecté au projet. Pour les *stagiaires* et *moi-même*, j'ai considéré un travail à temps plein, contrairement aux autres *doctorants*, où un temps partiel a été encore une fois pris.

Les ressources humaines externes, ainsi que les coûts supportés par les partenaires industriels, n'ont pas été pris en compte dans ce calcul.

Quant à la répartition de la charge financière, celle-ci est effectuée en proportion de 27% CNRS et 73% Ministère et Université. Sous ce dernier contributeur, nous retrouvons en effet : Grenoble INP, l'Ecole Doctorale, INPG SA (pour tout ce qui est relatif aux contrats industriels).

III. COMPETENCES, SAVOIR-FAIRE, QUALITES PROFESSIONNELLES ET PERSONNELLES

III.1 Mes qualités personnelles

Le domaine de la recherche, par sa nature, a la propriété de développer le *caractère créatif et innovateur* de la personne qui réalise une telle activité. A cause de la grande quantité d'informations impliquée, une grande *capacité d'analyse et de synthèse* ainsi qu'une bonne dextérité d'*identification des objectifs prioritaires* sont demandées afin de mener la thèse à bien. Si à ces éléments nous ajoutons un sujet multi-domaine (électrique, thermique...), avec plusieurs changements de direction, une autre qualité devient essentielle : l'*adaptabilité*. Cette dernière est encore plus importante quand l'activité est menée dans un environnement mixte recherche/industrie, international et multiculturel.

🌀 Mes compétences techniques

Elles sont multiples : *modélisation* de systèmes physiques, *réalisation et manipulation* de dispositifs électriques. J'ai développé ces compétences suite à la conception, la réalisation et l'utilisation d'une plateforme expérimentale à G2Elab. L'exécution de *mesures précises et fiables* est une qualification que j'ai acquise au cours des étapes de validation et d'utilisation de la plateforme mentionnée ci-dessus et lors d'une période d'évaluation d'un nouvel outil de simulation. J'ai également développé mes aptitudes d'évaluations des *conditions de sécurité électrique*, résultant du besoin d'assurer la sûreté de la plateforme.

Suite au sujet de mon travail de recherche, j'ai eu l'occasion d'acquérir des connaissances de *programmation* (langage C, Matlab), d'utilisation des outils de *simulation* (ARENE, RT-LAB, Matlab/Simulink, dSPACE, EUROSTAG, Mathcad, TestDrive) ou *bureautique* (Word, Power Point, Excel, MS-Project).

🌀 Mes compétences méthodologiques

Bonnes aptitudes de *gestion du temps* et *organisation personnelle du travail* acquises suite à plusieurs formations durant ma thèse. Compétences de *gestion par objectifs* et de *prise de décisions* développées au cours du projet industriel MULTISOL et de l'activité de recherche. Capacités d'*élaboration de rapports*, accomplies par l'élaboration de rapports ou de présentations techniques, posters ou publications. Aptitudes d'*enseignement* acquises suite à plusieurs heures de travaux pratiques et dirigés (de niveau universitaire et master). Formations sur l'*organisation de réunions* et organisation pratique de réunions d'équipe ou d'avancement du projet industriel.

🌀 Mes compétences de management

Capacités managériales acquises par l'*encadrement* de stagiaires et par formation. Connaissances de *gestion de projet* accumulées à la fois par formation et suite à la participation au projet industriel de recherche MULTISOL.

🌀 Mes compétences sociales

Travail en équipe avec des personnes ayant différents niveaux d'expérience : partenaires industriels, ingénieurs, professeurs, doctorants, stagiaires. Capacité de travailler

dans un *environnement international et multiculturel*, acquise en France et au Canada. Aptitudes de *communication*, développées en rencontrant des fournisseurs, clients et partenaires, ou en participant aux séminaires techniques. Participation à l'organisation d'événements type « portes ouvertes », *animation* de stands de présentation et démonstration, face à un public varié : des spécialistes techniques jusqu'aux élèves de CM1.

III.2 Construction de mon réseau professionnel personnel

L'activité menée au cours de ma thèse m'a permis d'avoir de nombreux contacts dans l'environnement de recherche, qu'il soit universitaire ou industriel, et de commencer ainsi le développement d'un propre réseau professionnel. Ces contacts ont été réalisés à la fois avec les partenaires du projet industriel sur lequel je suis intervenu, ou suite aux échanges que j'ai eus lors de séminaires scientifiques et conférences. Une autre source est représentée par l'entourage professionnel quotidien, dont mes encadrants, les collègues d'équipe ou de laboratoire, d'anciens collègues du laboratoire qui travaillent maintenant dans l'industrie. Les collaborations menées avec différents fournisseurs ont contribué aussi à l'évolution de ce réseau.

Un élément marquant pour le développement de mon réseau professionnel personnel a été un séminaire technique au cours duquel j'ai donné, comme représentant de G2Elab, mon témoignage d'utilisateur d'un outil de simulation. Lors de cet événement j'ai eu l'opportunité de rencontrer des spécialistes d'autres secteurs d'activité et de découvrir que l'aire d'applicabilité des concepts utilisés au cours de ma thèse étaient très recherchés, y compris en dehors du génie électrique.

III.3 Transférabilité des compétences en dehors de mon domaine de recherche

Les compétences de base, acquises jusqu'à présent au cours de mes années de formation et d'activité, sont entièrement compatibles avec les deux secteurs : *privé* et *public*. En prenant en compte les statistiques de plusieurs sources (Grenoble INP, G2Elab, ED-EEATS, ABG...), la répartition des docteurs en fin de thèse est assez équilibré, avec des faibles variations en fonction du domaine.

Plus concrètement, dans la *Figure 4*, j'ai mis en évidence plusieurs métiers, où mon potentiel personnel professionnel peut être transférable. La partie supérieure de la figure correspond aux métiers qui font partie de mon domaine. La partie inférieure met en évidence la possibilité d'utiliser mes compétences dans d'autres métiers. Ainsi, par exemple un post-doctorat ou un ATER (contrat à durée déterminé, habituellement d'un an, avec un mixte : recherche/enseignement) peut donner lieu à un poste d'enseignant chercheur en génie électrique, mais aussi dans d'autres domaines connexes, comme par exemple le génie thermique, etc. Les aptitudes d'enseignement et de communication déjà acquises pendant mon activité au G2Elab, permettront aussi un emploi de type formateur (technique) dans le secteur privé.

Des métiers hors de mon domaine de base sont accessibles aussi, comme par exemple le traducteur technique (pour des moyens mass media, ou pour interpréter les éléments techniques d'une demande de moyens, etc.) ou conseiller gouvernemental (sur la problématique du développement durable, etc.). En associant mes compétences techniques et mon esprit d'analyse, des métiers comme celui d'inspecteur de mise en conformité ou d'ingénieur sécurité, sont de même envisageables.

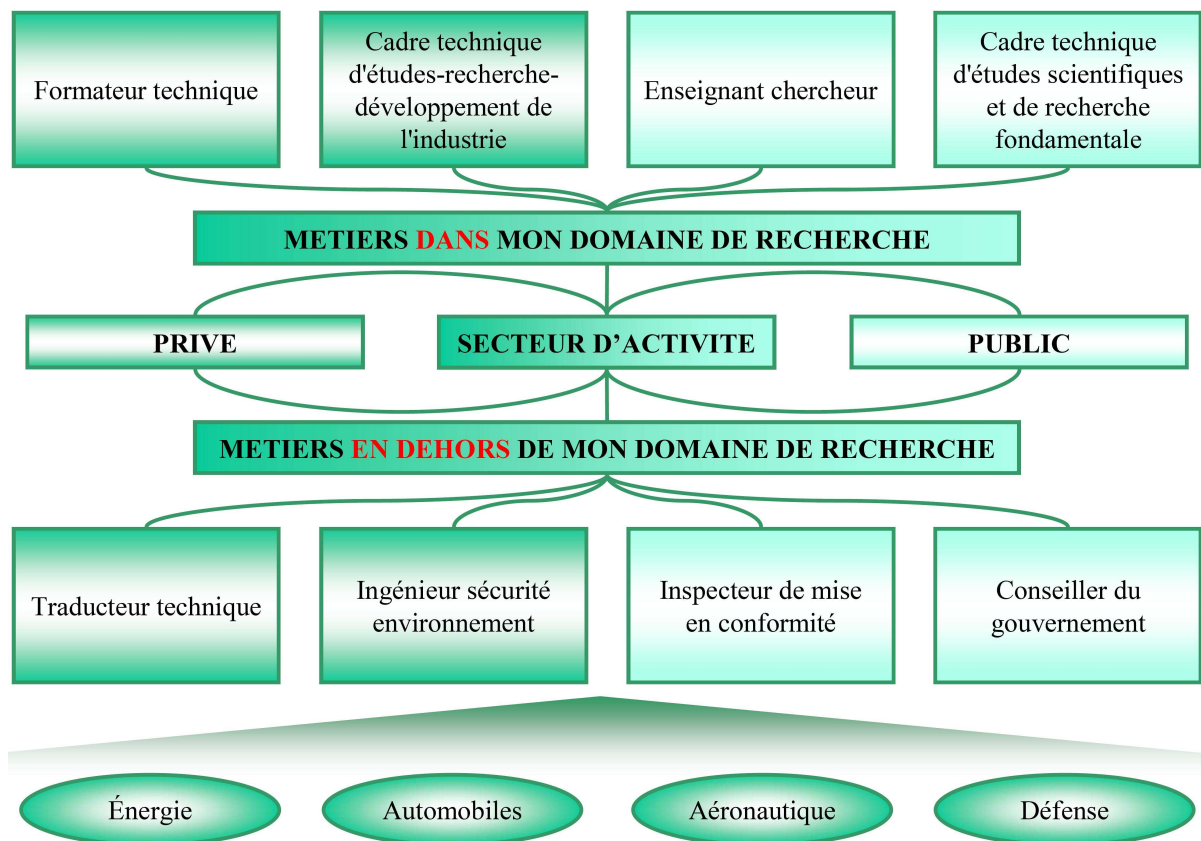


Fig. 4 : Domaines d'application des compétences personnelles (métiers et secteurs d'activité)

Tous ces métiers présentés succinctement ci-dessus, ajoutés à l'actualité de mon activité de recherche, donnent une transférabilité élevée à mes compétences personnelles. Ainsi, toutes mes connaissances et aptitudes peuvent être utilisées en dehors du génie électrique, plus précisément dans de domaines d'application comme l'automobile, l'aéronautique, ou la défense.

IV. RESULTATS, IMPACT DE LA THESE

IV.1 Pour le laboratoire ou l'équipe, pour les partenaires du projet, pour la Recherche, l'Economie, la Société, ...

L'équipe SYREL, le laboratoire et même la communauté de recherche en génie électrique, auront à leur disposition en fin de ma thèse une plateforme de recherche, d'enseignement et de démonstration totalement opérationnelle. Une des applications possible de cet outil, peut être par exemple l'étude des systèmes de production à base d'énergies renouvelables dans de conditions de fonctionnement quasi réels, ce qui constitue un sujet de très grande actualité.

En plus des questions de gestion du temps (fin de thèse), l'encadrement d'un dernier stagiaire en projet de fin d'études, a permis d'une part de transférer mes compétences, et d'autre part de poursuivre mes travaux. En conséquence, à la fin de ma thèse, je ne laisse pas seulement à disposition des moyens techniques mais aussi une bonne partie des compétences que j'avais acquises, à la fois via mes rapports et, le plus important, via un successeur.

IV.2 Pour moi-même

Pour moi, les sujets multi-domaine abordés lors de cette thèse ont permis de développer mes compétences personnelles et d'élargir encore mes pistes professionnelles. En effet, j'ai accumulé plus de trois ans d'expérience dans un domaine qui est utilisé intensément dans les industries automobile et aéronautique. Ainsi, en plus de l'ouverture des possibilités d'embauche vers le secteur privé, due aux nombreuses interactions que j'ai eues avec l'industrie, ce projet me permettra de continuer ma carrière aussi en dehors du génie électrique.

Parmi toutes les possibilités présentées dans la *Figure 4*, à court et moyen terme, le plus attirant pour moi reste le métier « *cadre technique d'études-recherche-développement de l'industrie* ». Ce métier peut se décliner aussi sous d'autres appellations, comme par exemple : chef de projet (études), ingénieur d'application (industrie), ingénieur de conception et développement, ingénieur d'études (industrie), ingénieur procédé (études), ingénieur de projet (études), ou ingénieur de recherche appliquée. Le titulaire conçoit, définit et effectue les travaux de conception et de développement des nouveaux produits ou des nouveaux procédés en milieu industriel, ainsi que les études d'amélioration des produits et procédés existants. Il réalise des recherches appliquées, des études, des mises au point, des analyses, des essais, ou la mise en oeuvre des innovations. Il anime et dirige des équipes de techniciens ou de cadres.

J'ai précisé court et moyen terme, car mon intention est de continuer à développer et approfondir mes compétences et connaissances, afin d'arriver à un statut d'expert dans mon domaine d'activité. A long terme, j'imagine la poursuite de ma carrière à un niveau plus élevé dans la hiérarchie de l'entreprise, avec des responsabilités de personnels.

La possibilité d'effectuer des formations de type « Gestion de projets » ou « Gestion du temps et organisation personnelle du travail », m'ont permis d'aller un pas encore plus loin vers l'intégration dans un environnement de travail de plus en plus orienté projet.

La preuve de toutes ces affirmations est donnée par les trois propositions concrètes d'embauche que j'ai reçues en fin de travaux de thèse. Il s'agit en effet de deux opportunités en Ile-de-France, une dans le domaine du génie électrique, une seconde dans l'automobile, la troisième étant en Roumanie (mon pays d'origine). Les sources de ces opportunités sont très variées, montrant que chaque méthode de recherche d'emploi peut être fructueuse. Ainsi, la première a été obtenue via le réseau professionnel personnel (collaborateurs de l'industrie), la deuxième suite à un salon pour l'emploi, et la troisième via les sites Internet spécialisés.

Si nous ajoutons à ces opportunités la proposition de mon encadrant de continuer mon activité dans l'enseignement, j'ai également eu une proposition dans le secteur public.

En conclusion, je considère que cette thèse a eu un impact très positif sur mon évolution, à la fois professionnelle et personnelle.

ANNEXE B. DETAILS SUR L'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE

Pour les applications de type PHIL, le G2Elab a acquis sur commande, avec un cahier de charges très spécifique, un amplificateur triphasé de *PUISSANCE+* (Figure 3.47).

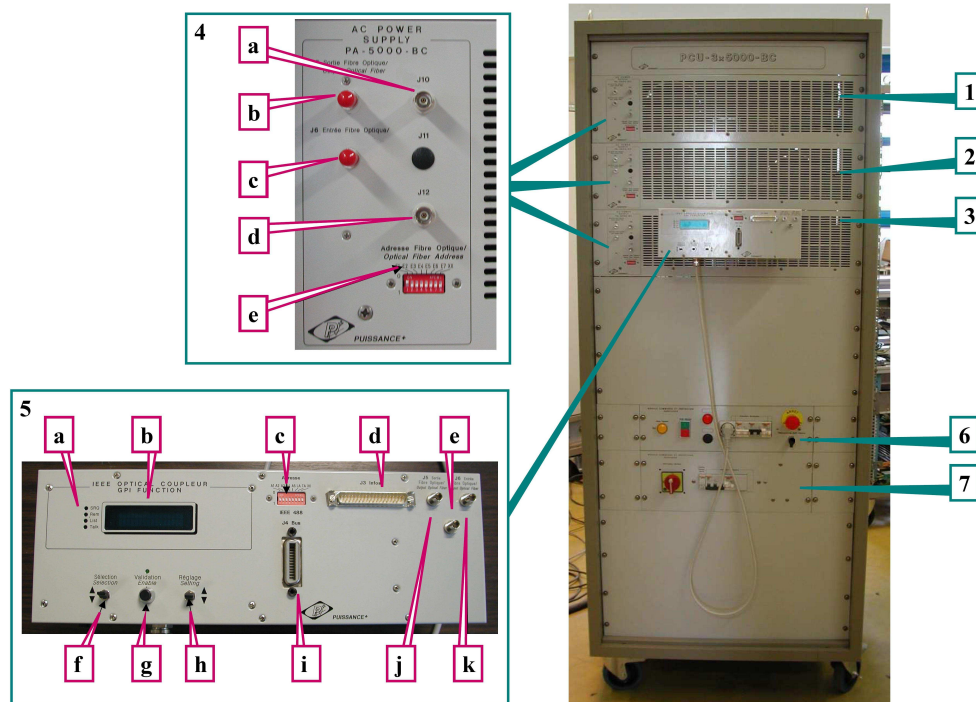


Figure 3.47. Amplificateur de puissance *PUISSANCE+*

Celui-ci comporte [PUI 05a] :

1. **Trois étages amplificateurs** (un par phase), ayant chacun les caractéristiques
2. nominales comprises dans le *Tableau 3.1*. Ainsi l'amplificateur peut être piloté en triphasé ou monophasé.
- 3.
4. **Des bornes d'entrées/sorties consignes** :
 - a. Un connecteur BNC d'entrée consigne $\pm 10V$ pilotage externe. Dans le cas de nos applications c'est là qu'ils arriveront les consignes sortant du simulateur temps-réel numérique. La tension ou le courant de sortie de l'amplificateur est pilotée par ces bornes (entrée isolée par rapport à la sortie). Le gain est programmable de 0 à 100% sur chaque voie à partir du pupitre de commande

(5). Le gain maximum est de $200V_{\text{eff}}$ pour $7.07V_{\text{eff}}$ en mode tension, et de $20A_{\text{eff}}$ pour $7.07V_{\text{eff}}$ en mode courant.

- b. | Des connecteurs entrée/sortie de liaison (en fibre optique) avec le pupitre de
- c. | commande (5).
- d. Un connecteur « mise en veille » de l'amplificateur. L'amplificateur nécessite la présence d'un signal de $5V_{CC}$ sur cette borne pour la validation de la sortie.
- e. Adressage pour la fibre optique.

5. ***Un pupitre de commande***, comportant :

- a. Des leds d'état (IEEE).
- b. Un affichage alphanumérique pour la visualisation et le paramétrage.
- c. Adressage pour la fibre optique.
- d. | Des connecteurs pour la synchronisation entre plusieurs pupitres de commande
- e. | éventuels (Trigger).
- f. Un commutateur de sélection du paramètre à modifier.
- g. Un bouton poussoir de validation de la modification effectué.
- h. Un commutateur de réglage du paramètre à modifier.
- i. Un connecteur entrée Bus GPIB, permettant le paramétrage et pilotage à distance par un système compatible.
- j. | Des connecteurs entrée/sortie de liaison (en fibre optique) avec les étages
- k. | d'amplification (4).

6. ***Un module de commande et protection servitude***, contenant deux boutons arrêt/marche, des protections (fusibles et disjoncteurs différentiels) pour le circuit de servitude, une prise servitude (utilisable pour l'alimentation du pupitre de commande) et un bouton « arrêt d'urgence ».

7. ***Un module de commande et protection puissance***, contenant l'interrupteur général et des protections pour le circuit de puissance.

ANNEXE C. STRUCTURE DE COMMANDE DE L'INTERFAÇAGE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MASDA

Les convertisseurs d'électronique de puissance offrent des possibilités de contrôle extrêmement utiles au pilotage de l'ensemble : contrôle de la qualité des courants et des puissances active et réactive injectés au réseau, meilleur suivi de trajectoire des courants, maîtrise fine et rapide des points de fonctionnement.

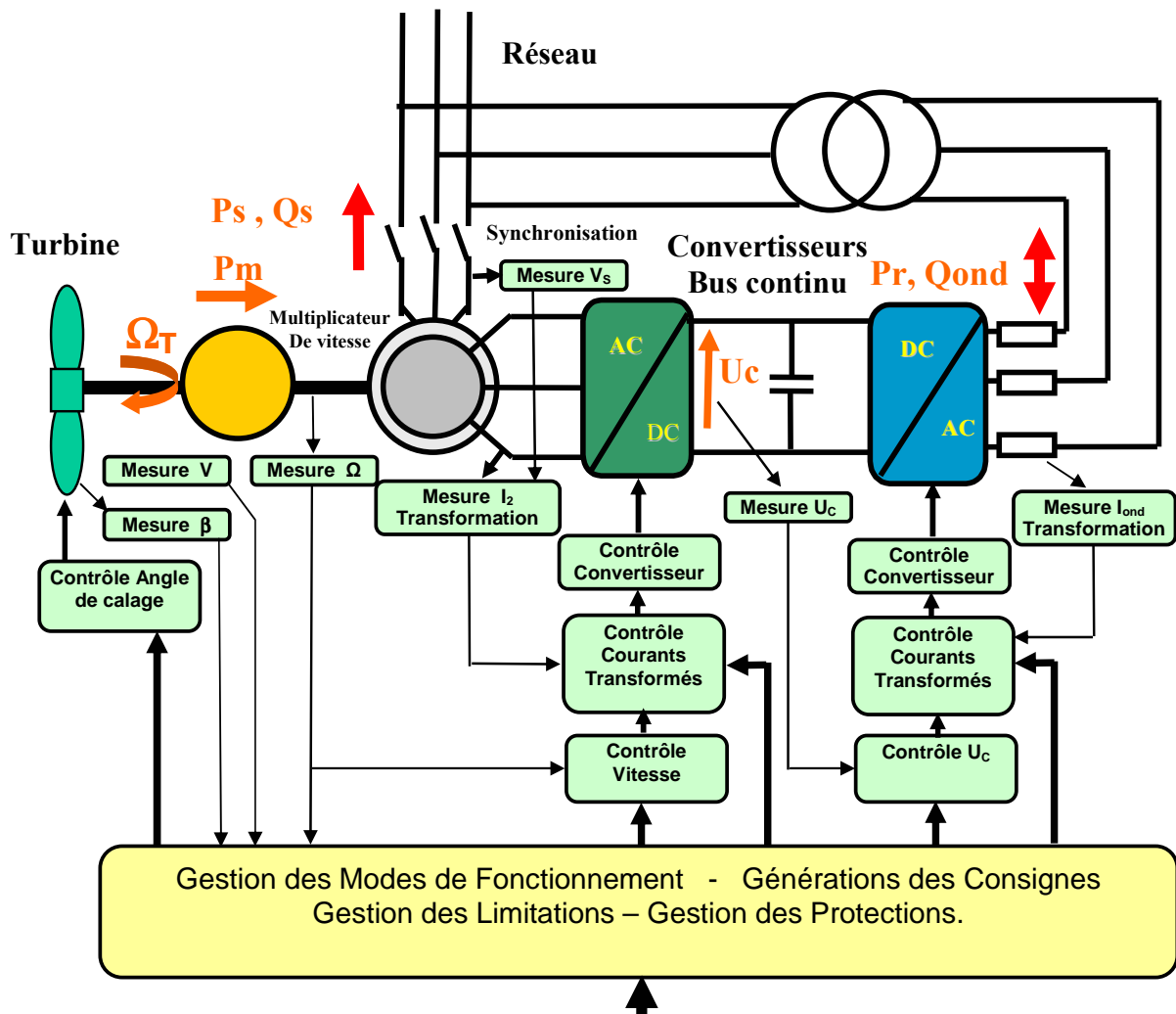


Figure 3.48. Structure de commande de l'interfaçage d'un système éolien à base de MASDA [LAV 05]

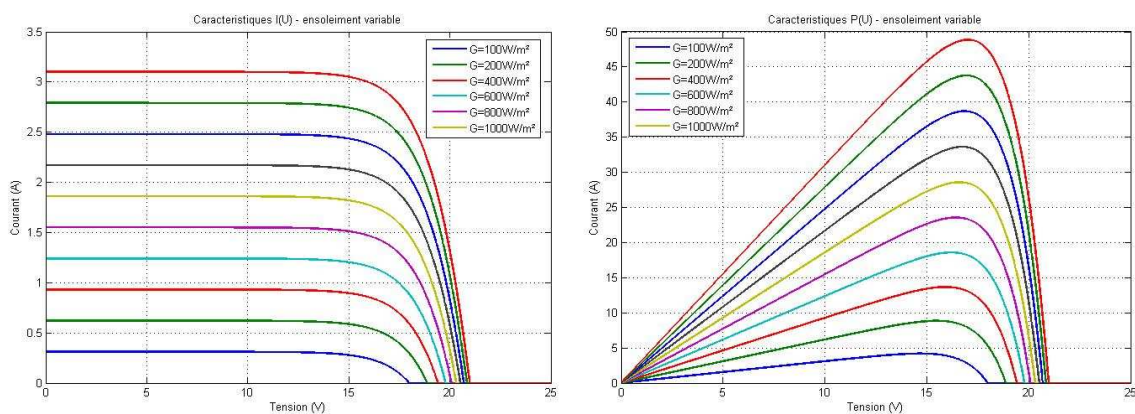
La commande de l'onduleur côté rotor permet le contrôle de la puissance convertie. Il s'agit en fait de contrôler le couple du générateur afin d'obtenir la vitesse de rotation

souhaitée. Les dynamiques des grandeurs électriques et mécaniques étant très différentes, il est avantageux de contrôler la machine par une structure générale en cascade avec des boucles imbriquées. Le couple et le flux sont contrôlés par l'intermédiaire de boucles de courant internes très rapides. Ces commandes sont réalisées dans un référentiel tournant. La consigne de couple provient généralement d'une boucle d'asservissement de vitesse externe plus lente. La consigne de vitesse peut être calculée à partir de la vitesse du vent pour obtenir un fonctionnement optimal aux faibles et moyennes vitesses du vent et pour obtenir un fonctionnement à vitesse de rotation constante (en général) aux fortes vitesses du vent lorsque la puissance captée est limitée.

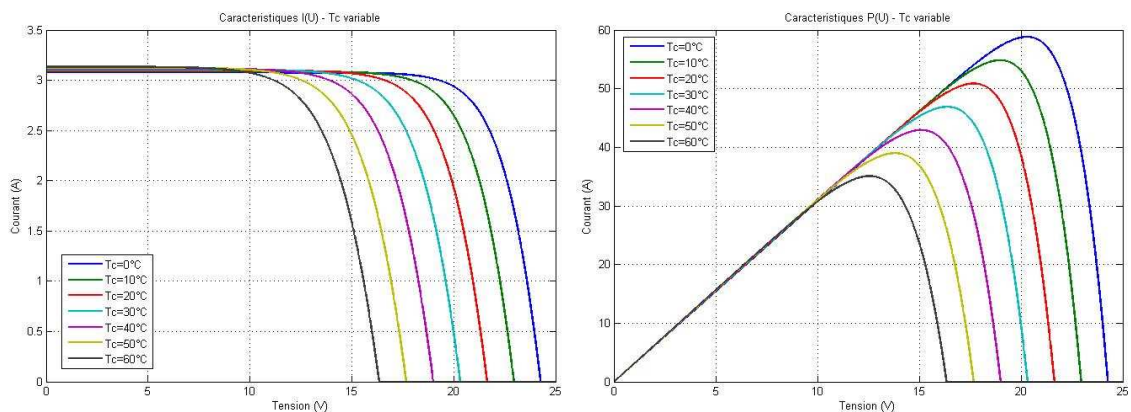
La commande de l'onduleur côté réseau permet le contrôle du transfert de puissance. Il s'agit d'assurer le transfert de la puissance rotorique en contrôlant le niveau de la tension du bus continu à une valeur garantissant un fonctionnement correct de l'onduleur. Ce contrôle se fait par le contrôle du courant continu dans l'onduleur et des courants triphasés. Le contrôle de tension fournit une consigne de courant continu d'où l'on déduit des consignes de courants triphasés (ou transformés) fournies aux contrôleurs de courant. Il est donc nécessaire d'insérer des inductances aux bornes de l'onduleur. En fait la puissance réactive est en principe fournie plutôt par le stator. [LAV 05]

ANNEXE D. INFLUENCE DES GRANDEURS D'ENTREE ET DES PARAMETRES DU MODELE PV SUR LES CARACTERISTIQUES DE COURANT (V-I) ET DE PUISSANCE (V-P)

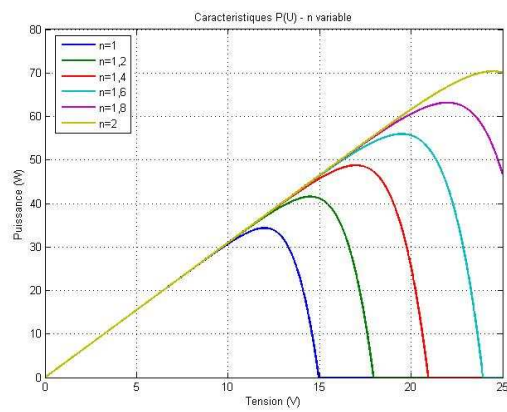
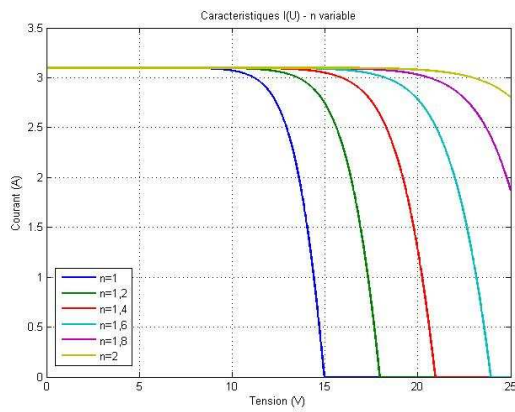
Variation de l'éclairement global dans le plan de la cellule (G) :



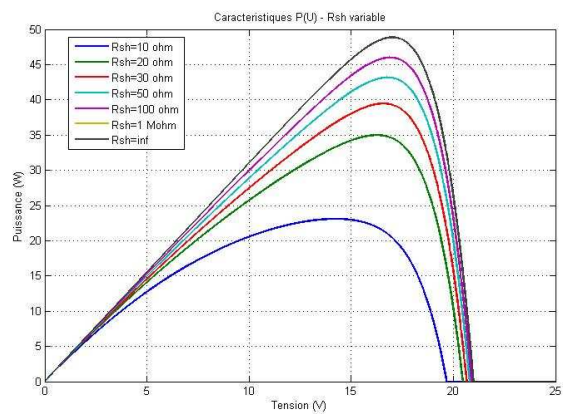
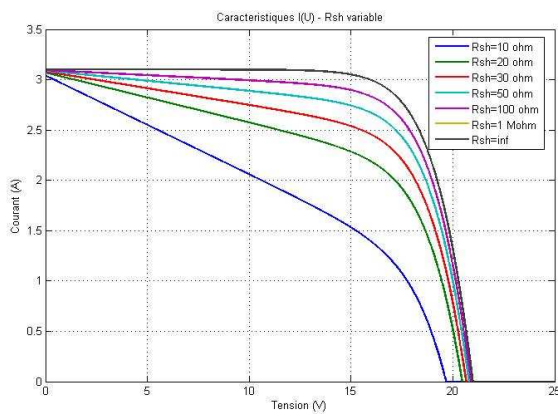
Variation de la température de la cellule (T_{cel}) :



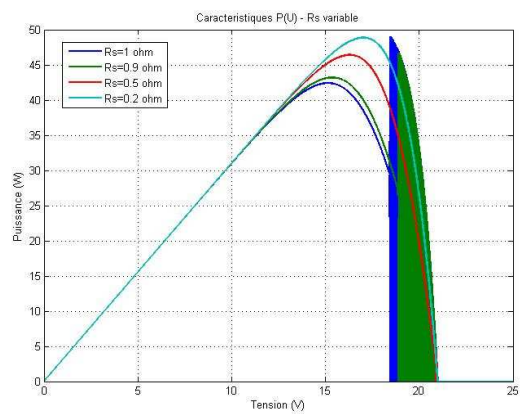
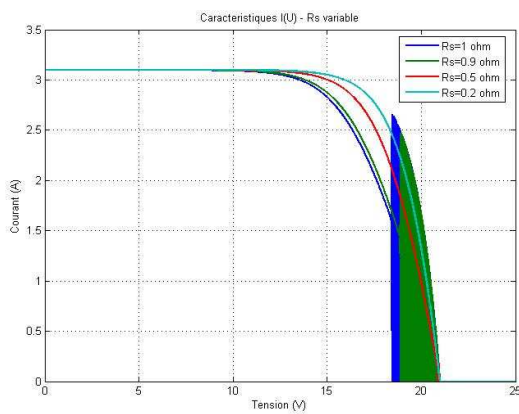
Variation du facteur d'idéalité de la jonction (n) :



Variation de la résistance shunt (R_{sh}) :



Variation de la résistance série (R_s) :



ANNEXE E. ENSEMBLE DES CHARGES ELECTRIQUES DU CAS D'ETUDE CHOISIT POUR LA VALIDATION DU SYSTEME MULTISOL

Nature	Lieu	Nom d'appareil	Puissance installée	Nombre d'appareils	Possibilité de pilotage
Chauffage	Chambre	Radiateur	1 kW	4	Oui
	Salon	Radiateur	2 kW	2	Oui
	Salle de bain	Radiateur	1 kW	1	Oui
Appareils électro-ménager	Salle de cuisine et salon	Table de cuisson	(2x1.5 kW) + (2x1 kW)	1	non
		Frigo	120 W	1	non
		Congélateurs	210 W	1	non
		Chauffe-eau	1.2 kW (100 litres)	1	Oui
		Lave-vaisselle	1.6 kW	1	Oui
		Lave-linge	2.1 kW	1	Oui
		Bouilloire	1.4 kW	1	non
		Cafetière	1 kW	1	non
		Grille-pain	1 kW	1	non
		Micro-onde	1.5 kW	1	non
		Four	3 kW	1	non
		Aspirateur	1 kW	1	non
		Fer à repasse	750 W	1	non
Multimédia	Salon + chambre	Télévision	600 W	2	non
	Chambre	Ordinateur	250 W	1	non
Eclairage	Chambre	Lampe	60 W	4	non
			40 W	4	non
	Cuisine		60 W	1	non
	Garage		60 W	2	non
	Terrasse		100 W	2	non
	Salon		100 W	2	non
	Salle de bain		60 W	2	non
	Dégagement		60 W	1	non
	Toilette		60 W	1	non

