

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé:

Modélisation et simulation temps-réel sous RT-LAB.

Présenté par

**Bouazza Hanane
Chikhi Yahia Boubakar**

Devant le jury composé de :

Dr. YAHIAOUI. M.

Président

Dr. BEKRI. O. L.

Encadreur

Dr. BENYAHIA. M.

Examineur

Soutenu le 21 /10/21
Promotion 2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Avant toutes choses, Nous tenons à remercier Dr. Yahiaoui.M Pour avoir accepté de présider notre jury de soutenance.

Nous tenons également à remercier Dr.Benyahia.M pour l'intérêt qu'il a porté à nos travaux en acceptant de faire partie de notre jury de mémoire de fin d'études.

Sans eux ces travaux n'auraient aucune valeur.

Nos remerciements les plus sincères vont au Dr. Bekri .O.L d'avoir efficacement dirigé nos travaux de mémoire de fin d'études. Nous la remercions aussi pour les bonnes conditions de travail qu'elle nous a assuré et les conseils qu'elle nous a prodigué tout au long de ce travail.

Nous voulons aussi dire un mot à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont soutenus pour réaliser ce travail, et nous ont permis de le finaliser: Merci !

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de nos études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mes respects, mon considération et mes profonds sentiments envers eux.

À mes sœurs et mes frères
Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils m'ont cessé de nous porter.

À tous mes amis et mes collègues qu'ils trouvent ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant mes études.

« *YAHIA* »

Dédicaces

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mes très chers frères Yacine, Mostapha et Dadi et ma très chère sœurs Bouchra, Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille spécialement ma chère tante Fatima, et mes cousins Asma, Emir Mohamed mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis et mes collègues spécialement mon amie d'enfance Khadidja et ma chérie KENZA et mon ami Stain et mon cher Dirar qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

« HANANE »

Résumé

Les simulateurs en temps réel deviennent des outils important pour les chercheurs pour tester et valider leurs systèmes de contrôle et de protection. Dans le cadre de ce travail, nous avons simulé en temps réel sous l'environnement Matlab/Simulink avec le simulateur temps réel d'OPAL-RT un dispositif FACTS (le TCSC) inséré dans une ligne de transport HT dans l'objectif de présenter une comparaison des paramètres; courants, tensions et puissances actives et réactives avec et sans condensateur série contrôlée par thyristor (TCSC), et la caractéristique de performance du TCSC sur le simulateur temps réel OPAL-RT-OP4510.

Les résultats obtenus indiquent une amélioration des paramètres de la ligne, et augmentation de la puissance active transmise, à travers la ligne par rapport au cas sans le TCSC.

Mots-clés: Simulation Temps-Réel, RT-LAB, OP4510, TCSC.

Abstract

Real-time simulators are becoming important tools for researchers to test and validate their control and protection systems. As part of this work, we simulated in real time under the Matlab / Simulink environment with the real time simulator of OPAL-RT a FACTS device (the TCSC) inserted in an HV transmission line in order to present a comparison of the parameters; currents, voltages and active and reactive powers with and without thyristor-controlled series capacitor (TCSC), and the performance characteristic of the TCSC on the OPAL-RT-OP4510 real-time simulator.

The results obtained indicate an improvement in the parameters of the line, and increase in the active power transmitted, through the line compared to the case without the TCSC.

Keywords: Real-Time Simulation, RT-LAB, OP4510, TCSC.

Introduction générale 1

Chapitre I

Concepts de la simulation temps réel

I.1	Introduction.	3
I.2	C'est quoi la simulation en temps réel	3
I.2.1	Le temps s'écoule et le temps réel l'emporte	3
I.2.2	Timing et contraintes	5
I.2.3	Choisir le bon simulateur pour le bon moment	5
I.2.4	Classification des simulateurs	6
I.3	Simulateur hors temps –réel numérique	7
I.3.1	Les avantages des simulateurs numériques	8
I.3.2	Simulateurs temps-réel	8
I.4	Classification des simulateurs temps-réel	10
I.4.1	Simulateurs temps-réel analogique	10
I.4.2	Simulateurs temps-réel numériques	11
I.4.3	Les simulateurs temps-réel hybrides	11
I.5	Catégories d'application des approches en temps réel	14
I.5.1	Prototypage rapide de contrôle – RCP	14
I.5.2	Matériel dans la boucle – HIL	15
I.5.3	Simulateur dans la boucle – SIL	16
I.6	Evolution des simulateurs en temps réel	16
I.6.1	Conception basée sur un modèle - Model-based Design MBD	19
I.7	Interaction avec le modèle	20
I.8	Plateforme RT-LAB	21
I.9	Applications	22
I.10	Les avantages de la Simulation en temps réel	23
I.11	Outils de simulation et interface Logiciel du simulateur (OPAL RT-LAB)	23
I.11.1	HYPERSIM	24

I.11.1.1	Le simulateur des réseaux électriques (de demain)	24
I.11.1.2	Les composants principaux de HYPERSIM	24
I.11.1.3	Le meilleur des technologies temps réel avec HYPERSIM	25
I.11.1.4	Applications typiques	26
I.11.2	eMEGASIM	26
I.11.2.1	Les atouts d’eMEGASIM	27
I.11.3	RT-LAB	27
I.11.3.1	Applications typiques	28
I.11.4	eFPGASIM	29
I.11.4.1	eFPGASIM pour les transports électriques	30
I.11.4.2	eFPGASIM : boîte à outils logicielle	30
I.11.4.3	Applications typiques	32
I.11.5	ePHASORSIM	32
I.11.5.1	Simulation en temps réel de la stabilité électromécanique des grands réseaux électriques	32
I.11.5.2	ePHASORSIM pour les laboratoires et centres de recherche en électricité	33
I.11.5.3	ePHASORSIM : un environnement intégré	33
I.11.5.4	Fonctionnalité d’import	33
I.12	Types de simulateur développés par opal RT-LAB	34
I.12.1	Le simulateur OPAL 4510	34
I.12.2	Caractéristiques spécifiques	35
I.12.3	Architecture et périphériques	35
I.13	Conclusion	38

Chapitre II

Modélisation sous RT-LAB

II.1	Introduction	39
II .2	Regroupement en sous-systèmes	41
II .2 .1	distinction des sous-systèmes temps réel et des sous-systèmes graphiques (CPU)	43
II .2.2	Attribution des sous-systèmes temps réel à différents cœurs de processeur	44
II .2 .3	Nommer les sous-systèmes	44
II .2.3.1	sous-systèmes graphiques : SC_n’importe quel nom : « SC_anynome »	44

II .2.3.2	sous-systèmes de calcul	44
II.3	L'ajout de blocs OpComm	45
II.3.1	Dans les sous-systèmes de calcul (SM ou SS)	47
II.3.2	Dans le sous-système de console (SC)	47
II.4	Présentation de l'interface graphique du logiciel RT-LAB	48
II.5	Construction du modèle et lancement de simulation sous RT-LAB	52
II.5.1	Construction du modèle sous RT-LAB : « Build »	52
II.5.2	Exécuter le modèle	52
II.5.3	Enregistrement de données	54
II.5.3.1	Enregistrement sur avec «OpWriteFile »	54
II.5.3.2	Enregistrement avec « ScopeView »	56
II.6	Bloc OpTrigger	57
II.7	ARTEMIS	58
II.7.1	Les avantages de ARTEMIS	58
II.8	Ajout des blocs d'entrées-sorties	60
II.9	Implantation logicielle	61
II.10	Aperçu de la surveillance(Monitoring)	62
II.10.1	Mesure du temps de calcul du sous-système modèle	63
II.10.2	Mesure du temps de calcul de la source du code utilisateur	62
II.10.3	Utilisation du bloc OpMonitor	63
II.11	Processus asynchrones RT-LAB	64
II.12	lab VIEW	67
II.13	Conclusion	68

Chapitre III

Présentation du concept FACTS

III.1	Introduction	70
III.2	Classification des dispositifs FACTS	70
III.3	Les différents types des systèmes FACTS	70
III.4	Brève description et définitions des dispositifs FACTS	71
III.4.1	Dispositifs FACTS Shunt	71
III.4.2	Dispositifs FACTS séries	73
III.4.3	Dispositifs FACTS combinés série –parallèle	74

III.4.4	Autres dispositifs FACTS	74
III.5.	Compensateur Série Contrôle par Thristors (Thyristor Controlled - Series Compensator- TCSC)	75
III.6	Mode de fonctionnement du TCSC	78
III.7	Les avantages des dispositifs FACTS	79
III.8	Les inconvénients des dispositifs FACTS	79
III.9	Rôle des dispositifs FACTS	80
III.10	Coût des dispositifs FACTS	80
III.11	Conclusion	81

Chapitre IV

Simulation d'un exemple de RT-Lab

IV.1	Introduction	82
IV.2	Description du circuit	82
IV.3	Contrôle TCSC	83
IV.4	Modélisation de la ligne étudiée en temps réel	83
IV.5	Résultats de Simulation	86
IV.5.1	Allocation du processeur et performances en temps réel	86
IV .6	Scénario 1 : Simulation en temps réel de la ligne de transport avec le TCSC en mode capacitif	86
IV.6.1	Réglage du TCSC	86
IV.6.2	Les graphes des tensions triphasées du premier et du deuxième système d'alimentations.	87
IV.6.3	Les graphes des courants triphasés des deux systèmes d'alimentation	87
IV.6.4	Les graphes des grandeurs du système de contrôle (TCSC)	88
IV.6.5	Les graphes de la puissance active et réactive injectée par le TCSC	89
IV.7	Scenarior 2 : Simulation en temps réel de la ligne de transport avec le TCSC en mode inductif	90
IV.7.1	Réglage du TCSC	90
IV.7.2	Les graphes des tensions triphasées du premier et du deuxième système d'alimentation pour le mode inductif.	90
IV.7.3	Les graphes des courants triphasés des deux systèmes d'alimentation	91
IV.7.4	Les graphes des grandeurs du système de contrôle (TCSC) en mode inductif	92
IV.7.5	Les graphes de la puissance active et réactive injectée régulée par le TCSC	93
IV.8	Scénario 3: Démonstration d'une réponse dynamique en temps réel	93

Table des matières

IV.8.1	Réglage du TCSC	93
IV.8.2	Les graphes de la réponse dynamique	93
IV.9	Conclusion	96
Conclusion générale		97
Bibliographie		99
Annexes		101

Chapitre I

Concepts de la simulation temps réel

Figure I.1:	Exigences de simulation en temps réel	4
Figure I.2:	Les exigences de temps et de puissance de calcul	6
Figure I.3:	Classification des simulateurs	7
Figure I.4	Principe d'adaptation du pas variable	8
Figure I.5:	Principe du pas fixe	9
Figure I.6:	Schéma de principe de la simulation hybride (cas de la connexion Shunt).	12
Figure I.7:	Les deux classes de simulateurs hybrides temps-réel	13
Figure I.8:	Catégories des approches en temps réel	14
Figure I.9:	Prototypage rapide de contrôle RCP	15
Figure I.10:	Matériel dans la boucle HIL	15
Figure I.11:	Simulateur dans la boucle SIL	16
Figure I.12:	Evolution de simulateurs en temps réel	17
Figure I.13:	Diagramme « V » illustrant l'application de la simulation en temps réel.	19
Figure I.14:	Interaction avec le modèle	21
Figure I.15:	Simulateur en temps réel développé par RT-Lab	22
Figure I.16:	Pack logiciel OPAL RT-LAB de simulation temps réel	24
Figure I.17:	Simulation temps réel avec HYPERSIM	25
Figure I.18:	Simulation temps réel avec Emegasim	26
Figure I.19:	Fréquences des phénomènes transitoires simulés par eMEGASIM ePHASORSIM et eFPGASIM	28
Figure I.20:	Simulation temps réel avec eFPGASIM	30
Figure I.21:	Solveur électrique pour FPGA générique et reprogrammable	31
Figure I.22:	Modèles de convertisseurs modulaires multiniveaux (MMC) sur FPGA	31
Figure I.23:	Structure interne : Co-simulation CPU/FPGA	32
Figure I.24:	Vue frontale du simulateur + Architecture de l'OP4510	36
Figure I.25:	Vue d'arrière de l'OP4510	37
Figure I.26:	Périphériques internes du simulateur OP4510	37

Chapitre II

Modélisation sous RT-LAB

Figure II.1 :	Intégration de RT-LAB au travers certaines applications.	39
Figure II.2:	Évolution du modèle Simulink jusqu'à la simulation en temps réel	40
Figure II.3 :	Modélisation sous RT-LAB - Création des sous-systèmes.	41
Figure II.4:	Regroupement en sous systèmes	42
Figure II.5:	Création et distinction des 2 sous systèmes	42
Figure II.6:	Contenu de chaque sous système	43
Figure II.7 :	Échange entre modèle (PC) et simulateur RT-LAB	43
Figure II.8:	traitement des sous systèmes du modèle par le simulateur RT-LAB	44
Figure II.9:	Bloc de communication « OpComm ».	45
Figure II.10:	Séparation du diagramme Simulink en sous-systèmes et placement des blocs opcomm (rouge=synchrone, bleu=asynchrone)	45
Figure II.11:	Fenêtre de la bibliothèque RT-LAB sous Matlab/Simulink	46
Figure II.12:	Présentation d'un Bloc OpComm	46
Figure II.13:	Traitement des blocs OpComm par le simulateur RT-LAB	47
Figure II.14:	Fenêtre principale après lancement du logiciel RT-LAB	48
Figure II.15:	Fenêtres de création d'un projet sous RT-LAB	48
Figure II.16:	Fenêtres de l'ajout d'un modèle au projet sous RT-LAB	49
Figure II.17:	Fenêtres de création d'un modèle vierge au projet sous RT-LAB	49
Figure II.18:	Fenêtres pour « Add » ou « Import » des modèles existants	50
Figure II.19:	Fenêtres de sélection de la version Matlab/simulink pour «Editer »le modèle	51
Figure II.20 :	Fenêtres d'addition de la cible « target » PC-Simulateur	51
Figure II.21:	Fenêtres de construction de modèle sous RT-LAB « BUILD»	52
Figure II.22 :	Exécution du modèle et console générée par RT-LAB sous Matlab/Simulink.	53
Figure II.23:	La fenêtre de console des résultats générée sous Matlab/Simulink.	53

Liste des figures

Figure II.24:	La fenêtre de arrêter la simulation	54
Figure II.25:	Insertion et parametrage du bloc « OpWriteFile »	55
Figure II.26 :	Principe d'enregistrement de données avec « OpWriteFile »	55
Figure II.27:	Fenêtre ScopeView et formulaire Signal.	56
Figure II.28:	OpTrigger block	57
Figure II.29:	Bloc de contrôle ARTEMIS Guide	58
Figure II.30 :	Effet de l'utilisation de ARTEMIS	60
Figure II.31 :	Vue d'ensemble de l'implantation sur RT-LAB/Simulink	61
Figure II.32 :	Utilisation de la vue de surveillance	62
Figure II.33:	Bloc OpMonitor	63
Figure II.34 :	Bibliothèque de programmes asynchrones RT-LAB dans l'navigateurSimulink	64
Figure II.35:	bloc OpAsyncGenCtrl	65
Figure II.36:	bloc OpAsyncRecv	66
Figure II.37:	bloc OpAsyncSend	66
Figure II.38 :	Exemple de sous-système de modèle avec blocs asynchrones RT_LAB	67
Figure II.39 :	Exemple d'interface utilisateur pour une simulation de micro-grille en temps réel avec labview	68

Chapitre III

Présentation du concept FACTS

Figure III.1:	Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques.	72
Figure III.2:	Différents dispositifs FACTS	76
Figure III.3:	Compensateur Série Contrôlé par Thyristors : a) schéma de base, b) réactance apparente, c) caractéristique statique du TCSC	77
Figure III.4:	Régime de fonctionnement du TCSC	79
Figure III.5:	Module et phase de l'impédance du TCSC	80

Chapitre IV
Simulation d'un exemple de RT-Lab

Figure IV.1:	La ligne de transport HT avec le TCSC.	82
Figure IV.2:	La ligne du transport d'énergie.	83
Figure IV.3:	Les deux sous-systèmes du dispositif TCSC sous RT-LAB.	84
Figure IV.4:	Les détails du sous-système SM_TCSC.	84
Figure IV.5:	Les détails du sous-système SC_Console.	85
Figure IV.6:	Les détails du bypass_control.	85
Figure IV.7:	La tension V_{abc1} de la source (1).	87
Figure IV.8:	La tension V_{abc2} de la source (2).	87
Figure IV.9:	Courant triphasée I_{abc1} de la source (1).	88
Figure IV.10:	Courant triphasée I_{abc2} de la source (2).	88
Figure IV.11:	L'impédance capacitive Z_{cap} .	89
Figure IV.12:	Le courant I_{tcsc} du TCSC.	89
Figure IV.13:	La tension V_{tcsc} du TCSC.	89
Figure IV.14:	Alpha du TCSC.	89
Figure IV.15:	Puissance active injectée par le TCSC.	90
Figure IV.16:	Puissance réactive injectée par le TCSC.	90
Figure IV.17:	La tension triphasée V_{abc1} .	91
Figure IV.18:	La tension triphasée V_{abc2} .	91
Figure IV.19:	Courant triphasée I_{abc1} du premier système (1).	91
Figure IV.20:	Courant triphasée I_{abc2} du deuxième système (2).	91
Figure IV.21:	L'impédance inductive Z_{ind} .	92
Figure IV.22:	Le courant du TCSC (I_{tcsc}).	92
Figure IV.23:	la tension du TCSC V_{tcsc} .	92
Figure IV.24:	Alpha inductif .	92
Figure IV.25:	La puissance active injectée par le TCSC.	93
Figure IV.26:	La puissance réactive injectée par le TCSC.	93
Figure IV.27:	Puissance active et réactive injectée par le TCSC.	94
Figure IV.28:	Le courant du TCSC.	94
Figure IV.29:	La tension du TCSC.	95

Chapitre I

Concepts de la simulation temps réel

Tableau I.1:	Résumé des principales caractéristiques des simulateurs rapportées dans la littérature	18
Tableau I.2:	Configurations des groupes E/S (I/Os) de l'OP 4510	38

Chapitre IV

Simulation d'un exemple de RT-Lab

Tableau IV.1	Allocation du processeur et performances en temps réel	86
---------------------	--	-----------

Annexes

Tableau A	Comparaison des coûts des contrôleurs FACTS	101
Tableau B	Paramètres de la ligne HT	102

Acronymes

PC	Ordinateur personnel
RT	Temps réel.
MIL	Model In the Loop : (Modèle dans la boucle)
HIL	Hardware In the Loop : (Matériel dans la boucle)
RCP	Rapid Control Prototyping : (Prototypage de control)
PHIL	Power Hardware In the Loop : (Matériel de puissance dans la boucle).
HYBRID	simulation hybrides complexes.
I/O	Input/output (entrée/sortie).
FPGA	Field programmable gate array (un circuit intégré composé d'un réseau de cellules programmables.).
CPU	Processeur (unité centrale de traitement).
TCP	Transmission Control Protocol (Protocol de contrôle de transmission)
IP	Internet Protocol
eHS	solveur électrique générique et reprogrammable pour FPGA
SM SS SC	Sous-système de calcul Sous-systèmes de calcul additionnels Sous-système de l'interface console
HYPERSIM	Simulateur temps réel de grands réseaux
eMEGASIM	Simulateur temps réel de systèmes électriques et d'électronique de puissance
ePHASORsim	Simulateur temps réel pour les études de stabilité électromécanique
eFPGAsim	Simulateur temps réel d'électronique de puissance sur FPGA
ARTEMiS	A dvanced R ead-Time E lectro- M agnetic Solvers
HW	Hardware

Liste des termes

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
GTO	Gate Turn Off
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TCPAR	Régulateur d'angle de phase commandé par thyristor
TCPST	Transformateur déphaseur commandé par thyristo
SSSC	Compensateur Statique série synchrone
TCR	Inductance Commandée par Thyristors
TSC	Condensateur Commuté par Thyristors
UPFC	Contrôleur de transit de puissance universel
SSSC	Compensateur Statique série synchrone
TCVR	Régulateur de Tension Commandé par Thyristor
SSG	Générateur Statique Synchrone
BESS	Système de Stockage par Batterie
SMES	Système de Stockage d'Énergie par Aimant Supraconducteur
SVS	Système Statique de Puissance Réactive
TCBR	Résistance de Freinage Contrôlée par Thyristors
IPFC	Contrôleur de transit de puissance entre lignes
TSSR	Inductance Série Commutée par Thyristors
TCVL	Régulateur de Tension Commandé par Thyristor
TCVR	Régulateur de Tension Commandé par Thyristor
MBD	Model-based Design
EMT	Electromagnetic Transient

Symboles

I	courant de ligne
$\alpha_{L \text{ lim}}$	angle d'amorçage limite dans la zone inductive
α_r	angle d'amorçage dans la zone de résonance
$\alpha_{C \text{ lim}}$	angle d'amorçage limite dans la zone capacitive

Liste des termes

V_{TCSC}	tension du TCSC
$V_{TCSC \max}, V_{TCSC \min}$	tensions limites de fonctionnement en régulation
$I_{\max}$	courant de ligne maximum
$I_{\min}$	courant de ligne minimum
$V_{Tcscrms}$	la tension du TCSC
V_{abc1}	la tension de la source (1)
V_{abc2}	la tension de la source (2)
I_{abc1}	Courant triphasée de la source (1)
I_{abc2}	Courant triphasée de la source (2)
I_{tcsc}	le courant du TCSC
Z_{cap}	l'impédance capacitive
Z_{ind}	l'impédance inductive
Alpha	angle d'amorçage du TCSC.
Power1	Puissance active injectée par le TCSC.
Power1	puissance réactive injectée par le TCSC.

Introduction générale

La simulation en temps-réel est une technique largement utilisée aujourd'hui par les secteurs de l'industrie de haute technologie tels que l'automatique et l'aéronautique (avion, satellite, commande haute performance, etc.). Pour ces industries, la simulation en temps réel avec intégration de matériel dans la boucle (en anglais hardware-in-the-loop « HIL ») permet de faire le prototypage rapide des systèmes de contrôle de façon économique, sécuritaire et rapide.

La simulation en temps réel est un outil d'analyse puissant, permettant de prévoir le comportement d'un système sous l'action d'un événement particulier et de voir son évolution en temps réel.

Cette méthode de conception permet de déceler les problèmes potentiels du système, de réduire le facteur d'erreur humaine et les risques d'interruption du système. L'utilisation du temps réel est donc un outil idéal pour concevoir des systèmes de toute sorte comparativement aux méthodes de conception traditionnelles.

RT-LAB « en: Real Time LABoratory » est une plateforme de simulation temps-réel distribuée. C'est le premier logiciel de simulation et de contrôle doté d'un algorithme de séparation des modèles mathématiques, ceci pour l'exécution en parallèle sur un réseau d'ordinateurs de bureau standards. La modularité des architectures parallèles des plateformes d'OPAL-RT et leurs modules d'entrées et de sorties permettent à RT-LAB de communiquer avec son environnement extérieur et de simuler des systèmes complexes.

Dans ce contexte, nous sommes intéressés dans notre travail, aux contrôles des puissances sur les longues lignes de transport en intégrant un dispositif FACTS.

Les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) peuvent être utilisés pour la compensation de l'énergie réactive, pour augmenter la capacité de transmission, améliorer la stabilité et le comportement dynamique, et assurer une meilleure qualité de puissance dans les systèmes de puissance modernes.

Notre travail consiste à réaliser des simulations en temps réel sur le simulateur OP4510 disponible au laboratoire de recherche LGE (Electrotechnical Engineering Laboratory) de la Faculté de Technologie de l'Université de Saida, dans le but de comprendre les principes de base et de bien maîtriser les différentes manipulations.

Pour atteindre cet objectif, notre mémoire est organisée en quatre chapitres.

- ✚ Le premier chapitre est axé sur la présentation du concept de simulation temps-réel avec OPAL RT-LAB qui est utilisé dans le cadre de ce projet et les différentes catégories et l'évolution de simulateurs en temps réel avec une description du simulateur OP-4510.

- ✚ Dans le second chapitre, nous sommes intéressés aux principes de la simulation temps réel sous RT-LAB. Les différentes étapes du processus de la simulation temps réel y sont approfondies avec le réglage nécessaire des paramètres de simulation.
- ✚ Le troisième chapitre, est une présentation générale du concept «FACTS». Une classification des différents types est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits, en ce qui concerne le condensateur Série contrôlé par Thyristor (en anglais, Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC) ce dernier est utilisé dans la simulation dans le dernier chapitre, afin d'étudier le comportement d'une ligne de transport avec et sans l'intégration du TCSC.
- ✚ Afin de valider la théorie et les modèles exposés dans les chapitres un et deux une simulation temps réel structurée est exécutée dans l'environnement RT-LAB est consacrée en chapitre quatre pour analyser la simulation du TCSC placé dans une longue ligne de transport sous différents modes de réglage, un cas d'une réponse dynamique sera aussi traité.

Lorsque tout ce qui précède aura été exposé, il ne nous restera plus qu'à conclure et à proposer des perspectives d'études futures permettant de compléter le travail réalisé tout le long de ce mémoire.

Chapitre I

Concepts de la simulation temps réel

I.1 Introduction

Aujourd'hui, la simulation numérique en temps réel est une technique, largement utilisée par les secteurs de l'industrie de haute technologie tels que l'automatique et l'aéronautique (avionique, satellite, commande haute performance, etc.). Pour ces industries, la simulation hybride (with hardware integration in the loop) en temps réel permet de faire le prototypage rapide des systèmes de contrôle de façon économique, sécuritaire et rapide. La simulation en temps réel est un outil d'analyse puissant, permettant de prévoir le comportement d'un système sous l'action d'un événement particulier et de voir son évolution dans le temps réel. Cette méthode de conception permet de déceler les problèmes potentiels du système, de réduire le facteur d'erreur humaine et les risques d'interruption du système. L'utilisation du temps réel est donc un outil idéal pour concevoir des systèmes de toute sorte comparativement aux méthodes de conception traditionnelles.

I.2 C'est quoi la simulation en temps réel ?

I.2.1 Le temps s'écoule et le temps réel l'emporte

Une simulation est une représentation du fonctionnement ou des caractéristiques d'un système par l'utilisation ou le fonctionnement d'un autre système. Pour les types de simulation numérique discutés dans ce chapitre, il est supposé qu'une simulation avec une durée de temps discrète et constante est effectuée. Pendant la simulation en temps discret, le temps avance par paliers de durée égale. Ceci est communément appelé simulation de pas de temps fixe.

Il est important de noter qu'il existe d'autres techniques de résolution qui utilisent des pas de temps variables. Ces techniques sont utilisées pour résoudre les dynamiques à haute fréquence et les systèmes non linéaires, mais ne conviennent pas à la simulation en temps réel [1].

Pour résoudre des fonctions et des équations mathématiques à un instant donné, chaque variable ou état de système est résolu successivement en fonction de variables et d'états à la fin du pas de temps précédent. Au cours d'une simulation en temps discret, la quantité de temps réel nécessaire pour calculer toutes les équations et les fonctions représentant un système pendant un pas de temps donné peut être plus court ou plus longue que la durée du pas de temps de simulation. **La Figure I.1** représente ces deux possibilités. En **(a)**, le temps de calcul est plus court qu'un temps fixe (time-step, également appelée simulation accélérée) tandis qu'en **(b)**, le temps de calcul est plus long.

Ces deux situations sont appelées simulation hors ligne. Dans les deux cas, le moment auquel un résultat devient disponible. En règle générale, lors de la simulation hors ligne, l'objectif est

d'obtenir des résultats aussi rapidement que possible. La vitesse de résolution du système dépend de la puissance de calcul disponible et de la complexité du modèle mathématique du système.

Inversement, lors de la simulation en temps réel, la précision des calculs ne dépend pas seulement de la représentation dynamique précise du système, mais aussi de la durée de réalisation des résultats. La Figure I.1 illustre le principe chronologique de la simulation en temps réel. Pour qu'une simulation en temps réel soit valide, le simulateur en temps réel utilisé doit produire avec précision les variables internes et les sorties de la simulation dans le même laps de temps que son équivalent physique. En fait, le temps requis pour calculer la solution à un pas de temps donné doit être plus court que la durée d'horloge du pas de temps [1].

Cela permet au simulateur en temps réel d'effectuer toutes les opérations nécessaires pour rendre une simulation en temps réel pertinente, y compris de piloter les entrées et sorties (E/S) vers et à partir de dispositifs externes connectés. Pour un pas de temps donné, les opérations de simulation précédant ou suivant le temps d'inactivité sont perdues; par opposition à la simulation accélérée, où le temps d'inactivité est utilisé pour calculer les équations au pas de temps suivant. Dans un tel cas, le simulateur attend jusqu'à ce que l'horloge passe au pas suivant. Cependant, si les opérations du simulateur ne sont pas toutes réalisées dans l'intervalle de temps requis, la simulation en temps réel est considérée comme erronée. Ceci est communément appelé "dépassement" [1].

Sur la base de ces définitions de base, on peut conclure qu'un simulateur en temps réel fonctionne comme prévu si les équations et les états du système simulé sont résolus avec précision, avec une ressemblance acceptable avec sa contrepartie physique, sans apparition de dépassements.

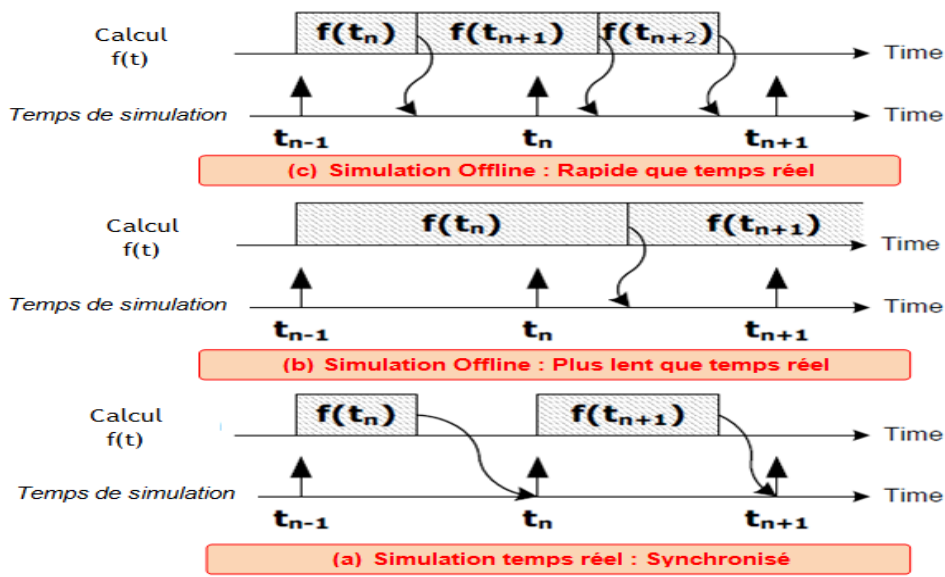


Figure I.1 Exigences de simulation en temps réel [1].

I.2.2 Timing et contraintes

Comme précédemment discuté, la simulation numérique en temps réel est basée sur des pas de temps discrets où le simulateur résout successivement les équations du modèle. Une durée de pas de temps appropriée doit être déterminée pour représenter avec précision la réponse en fréquence du système jusqu'au transitoire d'intérêt le plus rapide. Les résultats de simulation peuvent être validés lorsque le simulateur atteint son temps réel sans dépassement.

I.2.3 Choisir le bon simulateur pour le bon moment

Le premier défi auquel sont confrontés les spécialistes de la simulation consiste à choisir un simulateur en temps réel qui répondra à leurs besoins. Les capacités, la taille et le coût du simulateur sont déterminés par nombre de critères, y compris **1)** la fréquence des transitoires les plus élevés à simuler, qui à son tour dicte un pas de temps minimum, et **2)** la complexité ou la taille du système à simuler qui, avec la durée du pas de temps, dicte la puissance de calcul requise. Le nombre de canaux d'E/S requis pour interfacer le simulateur avec des contrôleurs physiques ou d'autres matériels est également d'une importance critique, affectant la performance totale et le coût du simulateur.

La **Figure I.2** présente les exigences de temps et de puissance de calcul typiques pour une variété d'applications. Le côté gauche du graphique illustre des systèmes mécaniques à dynamique lente qui nécessitent généralement un pas de temps de simulation entre 1 et 10 millisecondes, selon la règle de base que l'étape de simulation doit être inférieure à 5% à 10% de la plus petite constante de temps du système. Un pas de temps plus petit peut être nécessaire pour maintenir la stabilité numérique dans les systèmes rigides. Lorsque des phénomènes de frottement sont présents, des pas de temps de simulation aussi faibles que 100 microsecondes à 500 microsecondes peuvent être nécessaires.

C'est une pratique courante avec les simulateurs EMT (Electromagnetic Transient) d'utiliser un pas de temps de simulation de 30 à 50 microsecondes pour fournir des résultats acceptables pour les transitoires jusqu'à 2 kHz. Parce qu'une plus grande précision peut être obtenue avec des pas de temps plus courts, la simulation de phénomènes EMT avec un contenu fréquentiel jusqu'à 10 kHz nécessite typiquement un pas de temps de simulation d'environ 10 microsecondes [1].

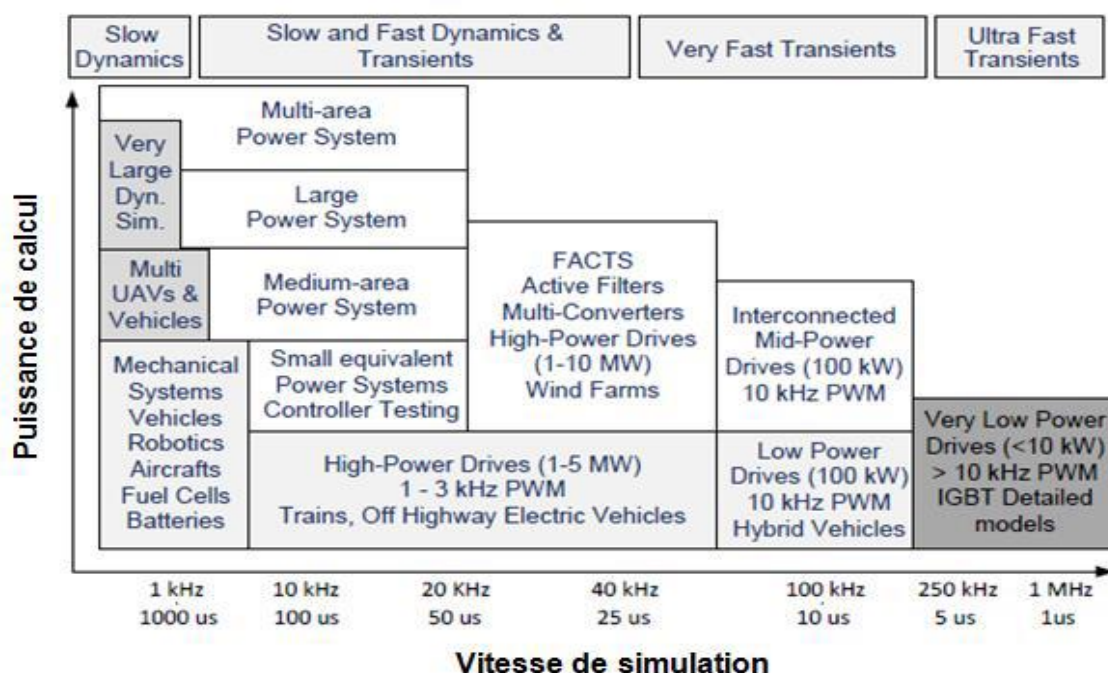


Figure I.2: Les exigences de temps et de puissance de calcul [1].

I.2.4 Classification des simulateurs

Les simulateurs dédiés au réseau peuvent être classés en deux grandes familles en fonction de leur échelle de temps, les simulateurs d'étude «*hors temps-réel*» et les simulateurs «*temps-réel*» d'après la **Figure I.3**. 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 exactement en 2 heures, en suivant à chaque instant le comportement du système réel [1].

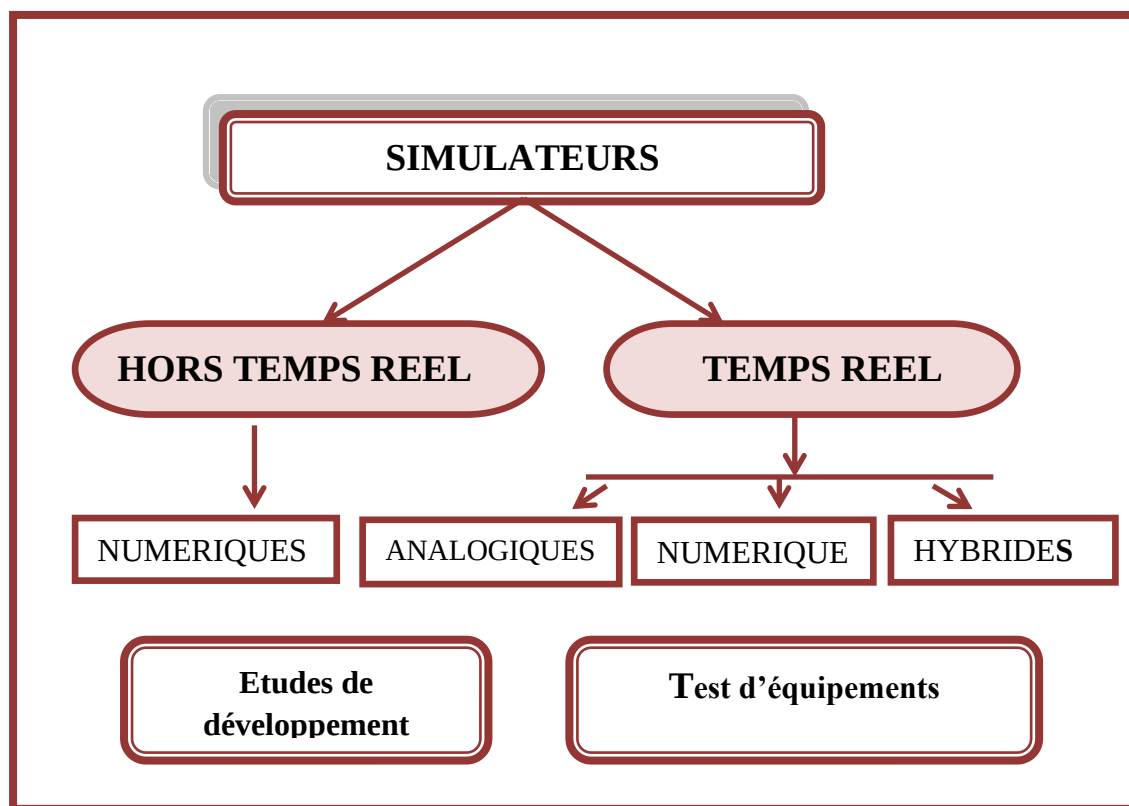


Figure I.3: Classification des simulateurs [1].

Les applications de type «test d'équipements de réseaux» peuvent être effectuées en utilisant des simulateurs temps-réel, qu'ils soient analogiques, numériques, ou hybrides (c'est-à-dire associant analogique et numérique), La plage fréquentielle qui doit être assurée pour l'étude de ces systèmes est comprise entre 1Hz et 10MHz. 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 temps-réel.

I.3 Simulateur hors temps-réel numérique

Les simulateurs numériques hors temps-réel servent en général à des études de la conception d'équipements, aux réglages de systèmes tels que les boucles d'asservissement et à l'analyse de phénomènes transitoires ou dynamiques tels que ceux causés par le court-circuit 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. Ce type de simulateur peut utiliser un pas de temps variable

(Figure I.4). Le pas de calcul s'adapte alors à la dynamique des grandeurs simulées et peut changer lors de la simulation pour gérer les disparités dynamiques pouvant apparaître.

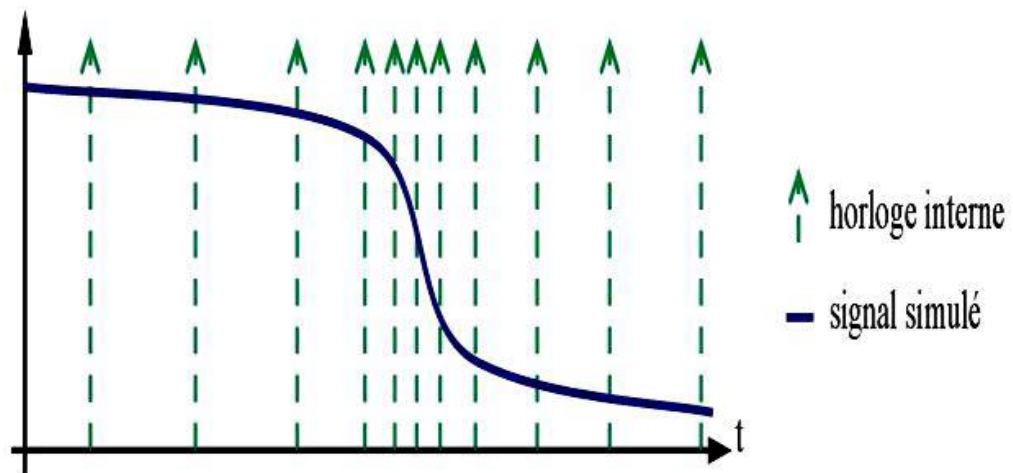


Figure I.4 : Principe d'adaptation du pas variable [1].

I.3.1 Les avantages des simulateurs numériques

- ✚ 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.

I.3.2. Simulateurs temps-réel

Les simulateurs temps-réel doivent, quant à eux, reproduire le plus fidèlement possible le comportement d'un système physique. Il est ainsi possible de présenter à un équipement électrique des phénomènes ou des événements tels qu'il les percevrait dans la réalité. L'objectif du simulateur temps-réel est de tester des équipements dans des conditions les plus naturelles possibles: comme si ceux-ci étaient connectés aux vrais systèmes physiques leur étant associés. Ce type de simulateur subit donc une contrainte forte appelée **contrainte temps réel** qui est **le respect du temps imposé par les lois régissant les phénomènes concernés**. Aussi, les signaux échangés entre le simulateur et le système testé doivent être synchronisés par rapport à une horloge temps-réel. Cela nécessite le recours à un pas de temps de simulation fixe qui ne peut évoluer dans le temps (Figure I.5).

Contrairement aux simulateurs d'étude, le temps que dure une simulation est rigoureusement le «temps réel» physique. On appellera **simulation temps-réel** le processus d'interaction réalisé par le **simulateur temps réel** sur l'équipement testé [2].

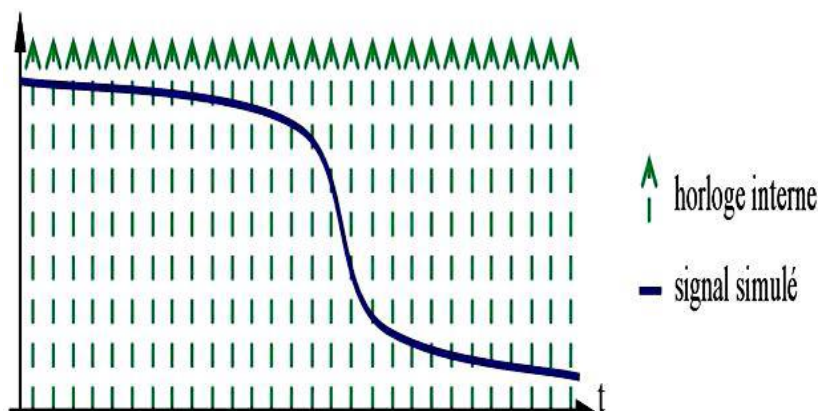


Figure I.5 : Principe du pas fixe [2].

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. Ils permettent de détecter le franchissement de seuils de tensions et de courants qu'ils contrôlent (relais de protections, indicateurs de passage de défauts,...etc.). En cas de défaut, un signal d'information ou de déclenchement peut alors être généré ;
- ✚ 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...) ;
- ✚ les systèmes électriques de puissance. Dans ce cas, il faut amplifier les signaux en sortie du simulateur pour tester les équipements en puissance. Il faut alors que les caractéristiques de l'amplificateur de puissance soient en adéquation avec l'équipement testé (linéarité, réversibilité, caractéristiques électriques...).

Les systèmes de contrôle de dispositifs à base d'électronique de puissance, à savoir les dispositifs FACTS, les systèmes HVDC et les systèmes d'interfaçage de producteurs d'énergie (systèmes éoliens, photovoltaïques, etc.). Dans ce cas, les signaux en entrée du simulateur sont les ordres de commandes des interrupteurs d'électronique de puissance en tout ou rien $\{0;1\}$, fortement discontinus. Pour réaliser ces tests, un simulateur temps-réel est très bien approprié car il permet de tester l'équipement dans des modes de fonctionnement classiques mais aussi dans des modes

perturbés. Des perturbations peuvent être réalisées du côté de la simulation: dans l'exemple de la simulation d'un réseau électrique via des enclenchements de charge, ou des courts circuits. Et du côté de l'équipement pour étudier son impact sur le réseau, en faisant varier, par exemple, ses caractéristiques (paramètres, gains et point de fonctionnement, etc.). Il est aussi possible de tester un équipement ayant causé un dysfonctionnement sur le réseau. Les études de perturbations sur la stabilité ou les perturbations harmoniques sur le réseau mais aussi l'analyse des interactions entre plusieurs dispositifs est possible en garantissant une certaine sécurité pour les personnes et pour le matériel face aux risques [2].

I.4 Classification des simulateurs temps-réel

I.4.1 Simulateurs temps-réel analogique

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. Les avantages des simulateurs analogiques sont :

-  Un fonctionnement naturel en temps-réel, puisque baser sur des composants physiques.
-  La reproduction physique de la réalité (en valeurs réduites et/ou à facteur d'échelle respecte).
-  Des grandeurs physiques d'un réseau électrique (les courants et les tensions) réelles (en valeurs réduites et/ou à facteur d'échelle respecte) [2].

Ils présentent les inconvénients suivants :

1. La limitation dans la taille des réseaux représentés;
2. le manque de souplesse quant aux changements de topologie, bien que des systèmes de connexion automatique aient été réalisés.
3. l'encombrement important lié à la taille des réseaux modélisés
4. les coûts élevés d'exploitation et de maintenance;
5. 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 ou les simulateurs numériques montrent leurs limites (fréquences de découpage élevées, systèmes trop complexes à modéliser, etc.).

I.4.2. 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 teste, le pas de temps de simulation de ces simulateurs est fixe et ne peut pas évoluer dans le temps. L'essor des calculateurs et l'augmentation de leurs puissances de calcul ont fait que les simulateurs temps-réel numériques ont pu voir le jour il y a déjà une vingtaine d'années. En effet, la taille et la complexité des systèmes simulés en temps-réel ainsi que les fréquences des phénomènes étudiés dépendent directement de la puissance des calculateurs utilisés. La simulation numérique présente des avantages déterminants tels que [2]:

- ✚ Une bonne représentation des éléments et phénomènes électriques de par l'utilisation de modèles pouvant être adaptés facilement aux études réalisées;
- ✚ une préparation plus rapide et plus aisée aux tests, car les caractéristiques des composants ainsi que les paramètres de simulation peuvent être modifiés par simple programmation.
- ✚ la reproductibilité des essais grâce à l'invariance des caractéristiques électriques des composants simulés.
- ✚ la sécurité des personnes et du matériel, car les machines tournantes peuvent être modélisées, les tensions et courants peuvent être paramétrés à des valeurs faibles pour ne pas causer de risques aux utilisateurs.
- ✚ l'évolutivité des simulations et la possibilité de création de scénarii d'évènements.
- ✚ la possibilité de lire et de simuler des fichiers de mesures réalisés à partir d'un équipement réel. Parmi les simulateurs numériques temps-réel utilisés dans le monde, on peut citer :
 - ✚ RT-LAB (Opal-RT Technologies, Canada)
 - ✚ ARENE URT (EDF R&D, France)
 - ✚ RTDS (RTDS Inc., Manitoba/Canada)
 - ✚ HYPERSIM (HydroQuebec, Canada)
 - ✚ NETOMAC (SIEMENS, Allemagne)

Le simulateur utilisé dans le cadre de ce mémoire est le simulateur temps-réel numérique RTLAB (Opal-RT Technologies, Canada).

I.4.3 Les 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 (**Figure I.6**) [2].

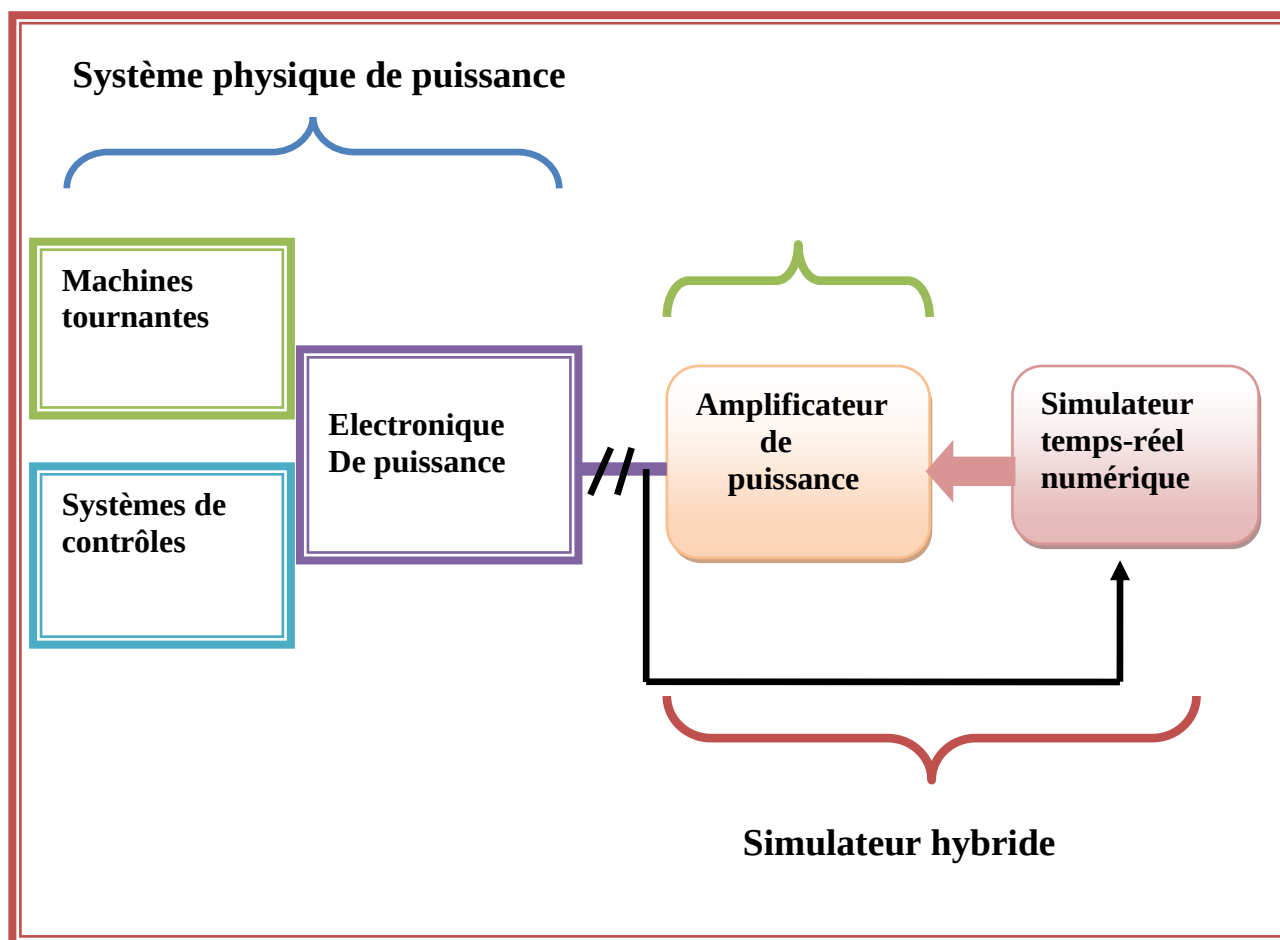


Figure I.6: Schéma de principe de la simulation hybride (cas de la connexion Shunt) [2].

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»*.

En fonction des grandeurs qui sont échangées entre les parties constituantes, nous pouvons identifier deux classes distinctes de simulateurs hybrides temps-réel (**Figure I.7**).

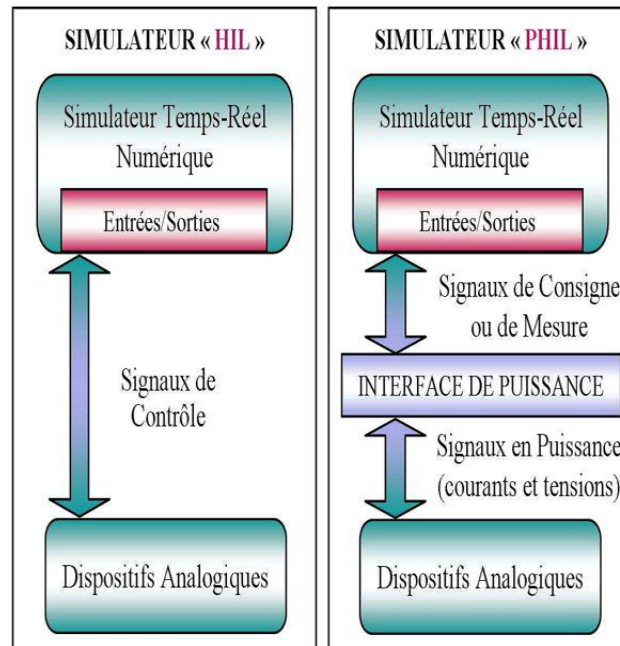


Figure I.7 : Les deux classes de simulateurs hybrides temps-réel [2].

- ✚ 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 deux parties, ce qui rend nécessaire une interface de puissance (des amplificateurs de puissance et des capteurs de tensions ou courants).

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. 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 courts-circuits, des creux de tension, des variations de fréquence, etc.

Tous les simulateurs numériques temps-réel mentionnés 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.

I.5 Catégories d'application des approches en temps réel

À l'ère des supercalculateurs et des processeurs rapides, la simulation de systèmes volumineux, complexes et dynamiques est réalisable en temps réel comme le montre la **Figure I.8**, la simulation en temps réel a principalement trois catégories d'application [1].

1. Simulateur dans la boucle (Software-In- the- loop, SIL).
2. Matériel dans la boucle (Hardware- In- the -loop, HIL).
3. Prototypage rapide de contrôle (Rapid Control Prototyping, RCP).

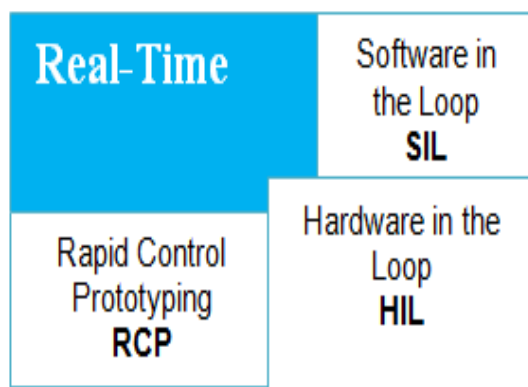


Figure I.8 : Catégories des approches en temps réel [1].

I.5.1 Prototypage rapide de contrôle - RCP

Les simulateurs en temps réel sont généralement utilisés dans trois catégories d'applications différentes, comme illustré à la **Figure I.9**. Dans les applications RCP (Rapid Control Prototyping) un contrôleur d'installation est implémenté à l'aide d'un simulateur en temps réel. Le RCP offre de nombreux avantages par rapport à la mise en œuvre d'un prototype de contrôleur réel. Un prototype de capteur développé à l'aide d'un simulateur en temps réel est plus flexible, plus rapide à implémenter et plus facile à déboguer.

Le prototype du contrôleur peut être réglé à la volée ou complètement modifié en quelques clics de souris [1].

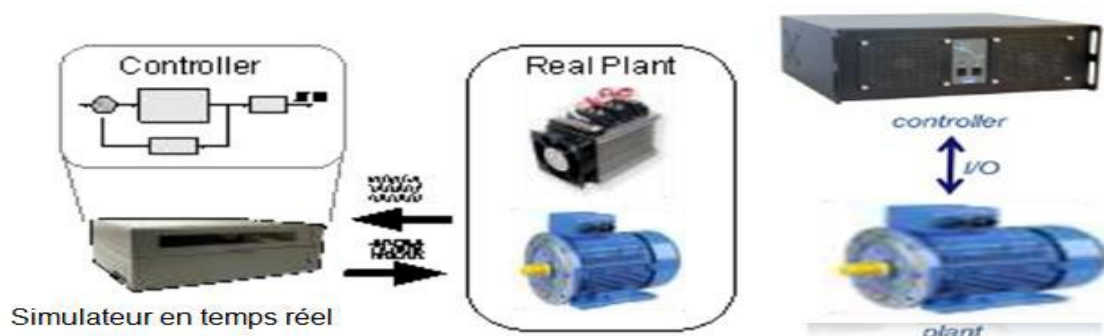


Figure I.9 : Prototypage rapide de contrôle RCP [1].

I.5.2 Matériel dans la boucle – HIL

Pour les applications HIL (*Hardware In the Loop*), un contrôleur physique est connecté à une installation virtuelle exécutée sur un simulateur en temps réel, plutôt qu'à une installation physique.

La Figure I.10. Illustre une petite variation de HIL; une implémentation d'un contrôleur utilisant RCP est connectée à une installation virtuelle via HIL. En plus des avantages de RCP, HIL permet de tester rapidement les contrôleurs lorsque des bancs d'essai physiques ne sont pas disponibles. Les plantes virtuelles coûtent généralement moins cher et sont plus constantes. Cela permet d'obtenir des résultats plus reproductibles et fournit des conditions de test indisponibles sur du matériel réel, telles que des tests d'événements extrêmes [1].

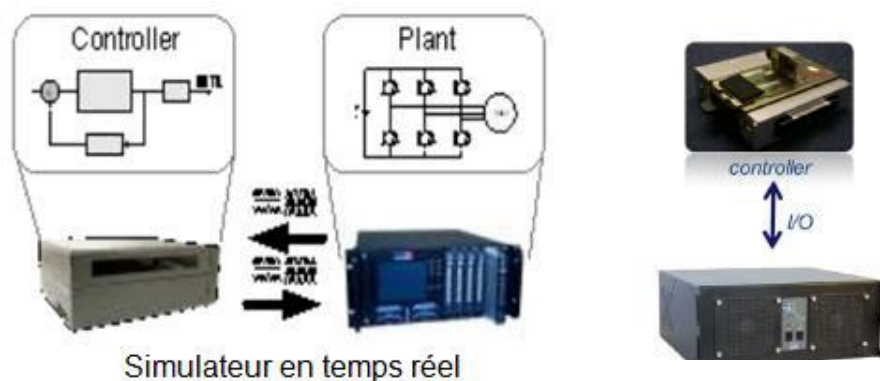


Figure I.10: Matériel dans la boucle HIL [1].

I.5.3. Simulateur dans la boucle – SIL

SIL (Simulation In the Loop) représente la troisième étape logique au-delà de la combinaison de RCP et HIL, comme le montre la **Figure I.11**. Avec un simulateur suffisamment puissant, le contrôleur et l'installation peuvent être simulés en temps réel dans le même simulateur. SIL a l'avantage sur RCP et HIL qu'aucune entrée et sortie n'est utilisée, préservant ainsi l'intégrité du signal. De plus, étant donné que le contrôleur et les modèles d'installation fonctionnent sur le même simulateur, la synchronisation avec le monde extérieur n'est plus critique; il peut être plus lent ou plus rapide que le temps réel sans impact sur la validité des résultats, ce qui rend SIL idéal pour une classe de simulation appelée simulation accélérée. En mode accéléré, une simulation s'exécute plus rapidement qu'en temps réel, ce qui permet d'effectuer un grand nombre de tests sur une courte période. Pour cette raison, SIL est bien adapté pour les tests statistiques tels que les simulations de Monte-Carlo. SIL peut également fonctionner plus lentement qu'en temps réel. Dans ce cas, si le simulateur en temps réel manque de puissance de calcul pour atteindre le temps réel, une simulation peut toujours être exécutée à une fraction du temps réel, généralement plus rapidement que sur un ordinateur de bureau [1].

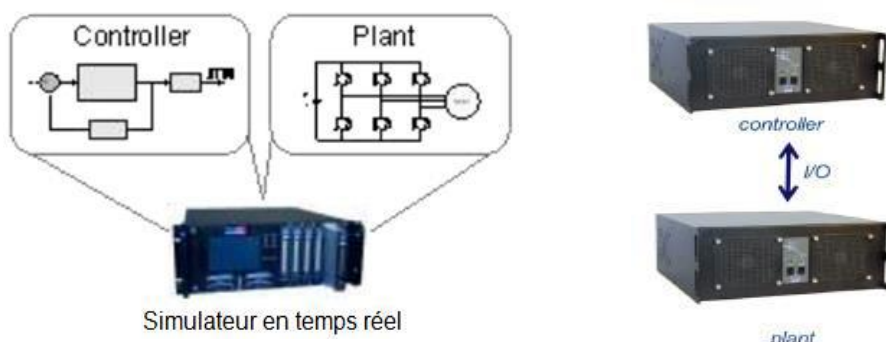


Figure I.11 : Simulateur dans la boucle SIL [1].

I.6 Evolution des simulateurs en temps réel

La technologie des simulateurs a évolué, des simulateurs physiques/analogiques (simulateurs HVDC et Transient Network Analyzer TNA) pour les études EMT, de protection et pour le contrôle, aux simulateurs TNA/analogiques/numériques hybrides capables d'étudier le comportement EMT [1], aux simulateurs en temps réel entièrement numériques, comme illustré par la **Figure I.12**.

Les simulateurs physiques ont bien servi leur objectif. Cependant, elles étaient très importantes, coûteuses et nécessitaient des équipes techniques hautement qualifiées pour gérer les tâches fastidieuses liées à la mise en place des réseaux et au maintien de vastes stocks d'équipements complexes. Avec le développement des technologies DSP à microprocesseur et à virgule flottante,

les simulateurs physiques ont été progressivement remplacés par des simulateurs en temps réel entièrement numériques [1].

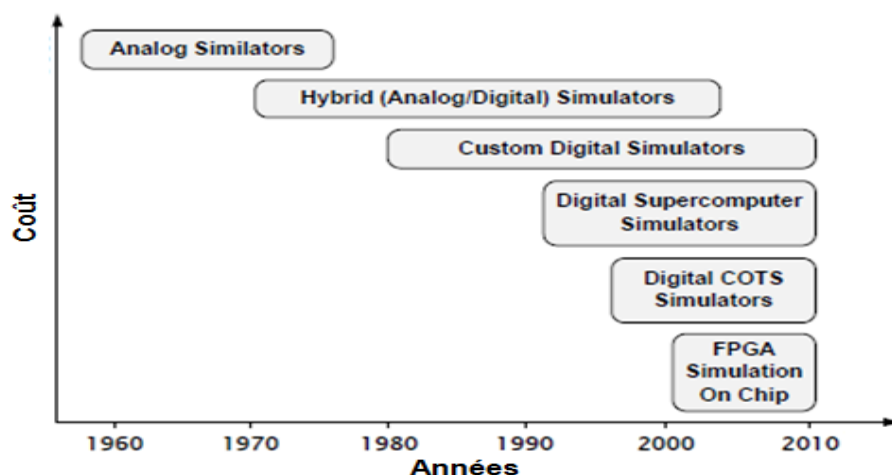


Figure I.12 : Evolution de simulateurs en temps réel [1].

La dernière tendance en matière de simulation en temps réel consiste à exporter des modèles de simulation vers le FPGA [1]. Cette approche a de nombreux avantages. Premièrement, le temps de calcul à l'intérieur de chaque pas de temps est presque indépendant de la taille du système en raison de la nature parallèle des FPGA. Deuxièmement, les dépassements ne peuvent pas se produire une fois que le modèle est en cours d'exécution et les contraintes de synchronisation sont remplies. Un dernier point mais surtout, le pas de temps de la simulation peut être très faible, de l'ordre de 250 nanosecondes. Il y a encore des limitations sur la taille du modèle puisque le nombre de portes est limité dans les FPGA. Cependant, cette technique est prometteuse [1]. Le tableau I.1 illustre les différents simulateurs en temps réel trouvés dans la littérature.

<u>Simulateur en temps réel</u>	<u>Matériel (Hardware)</u>	<u>Application de la Simulation</u>	<u>Modélisation et Solution</u>	<u>Domaine d'application</u>
<u>RTDS par RTDS technologies</u>	Super PC RISC Processeur implémenté dans les cartes GTFPGA	Hôte :windows Cible : Vx works Application : RSCAD	Librairie de composantes EMTP, temps à petit pas	Simulation en temps réels des systèmes de puissances, électronique de puissance, système de control, test des équipements via simulation –HIL
<u>E MEGAsin par OPALRT technologies</u>	Multi-coeurs CPU	Hôte :windows Cible : Linux basé sur RedHat. Application : Matlab/Simlink, RT-lab training, analyse EMTP	Simulink/MATLAB, C/C++, Fortran, ARTEMIS	Simulation en temps réels des systèmes de puissances, électronique de puissance, système de control et automatique, test des équipements via simulation-HIL
<u>HYPERSIM</u>	Multi-coeurs CPU utilisé avec SGI NUMALink processeur interconnecté, possibilité d'utiliser plus de 2500 coeurs, FPGA	Hôte :windows Cible :Linux. Application : Hypersim	GUI basé sur des composants de librairie HYPERISM, méthodes d'intégrations multiples	Simulation en temps réels des systèmes de puissances avec électronique de puissance, système de control, test équipements via HIL approches, FACTS et HVDC.
<u>dSPACE</u>	CPU	Hôte :windows Cible :Linux.	Simulink, Stateflow, AUTOSTAR, models sur le code C.	Control en temps réels par prototypage rapide – RCP pour la génie automatique, aérospatial et contrôle industriel
<u>VTB</u>	Multi-coeurs CPU/FPGA	Hôte :windows Cible :Linux.	Compagnon résistif Modifié	Système de puissances
<u>rtX par ADI</u>	CPU	Hôte :windows Cible :QNX RTOS.	GUI spécialisé avec possibilité de connection avec SIMULINK/MATLAB , code C, Fortran, ADEPT	simulation des systèmes de puissances, industrie, simulation aéronavale.
<u>xPC target</u>	CPU/FPGA	Hôte :windows Cible :Real-time optimize kernel	Simulink, Stateflow pour le développement des modèles, code C, code HDL	Prototypage rapide de contrôle – RCP, simulation via HIL.
<u>Typhon RTDs</u>	FPGA	Hôte :windows Cible :FPGA.	Editeur typhoon, MTALAB	Test des contrôleurs d'électronique de puissances.

Tableau I.1: Résumé des principales caractéristiques des simulateurs rapportées dans la littérature [3].

I.6.1 Conception basée sur un modèle - Model-based Design MBD

MBD est une méthode mathématique et graphique de résolution de problèmes associés à la conception de systèmes complexes. MBD est une méthodologie basée sur un travail connu sous le nom de diagramme V, comme illustré dans la **Figure I.13**. Elle permet à plusieurs ingénieurs impliqués dans un projet de conception et de modélisation d'utiliser des modèles pour communiquer la connaissance du système en cours de développement [1].

Quatre étapes de base sont nécessaires dans le processus:

- 1) Construire le modèle de l'usine.
- 2) Analyser le modèle de la centrale et synthétiser un contrôleur pour celle-ci.
- 3) Simuler l'installation et le contrôleur ensemble.
- 4) Déployer le contrôleur.

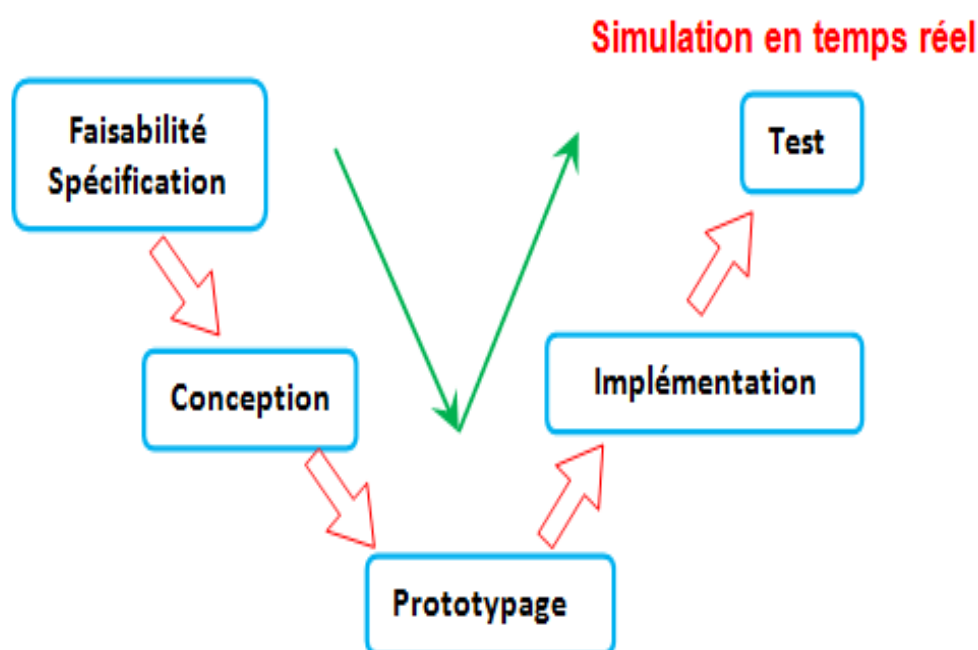


Figure I.13: Diagramme « V » illustrant l'application de la simulation en temps réel [1].

MBD offre de nombreux avantages. En utilisant des modèles, un environnement de conception commun est disponible pour chaque ingénieur impliqué dans la création d'un système du début à la fin. En effet, l'utilisation d'un ensemble commun d'outils facilite la communication et l'échange de données. La réutilisation de conceptions plus anciennes est également plus facile car l'environnement de conception peut rester homogène à travers différents projets. En plus de MBD, des outils de modélisation graphique, tels que la boîte à outils SimPower System pour Simulink de The MathWorks [1], simplifie la tâche de conception en réduisant la complexité des modèles grâce à l'utilisation d'une approche hiérarchique. Des techniques de modélisation ont également été utilisées

pour intégrer des modèles codés indépendants dans l'outil de simulation de systèmes d'alimentation PSCAD/EMTDC [1]. La plupart des outils de simulation commerciaux fournissent un générateur de code automatique qui facilite la transition du modèle de contrôleur à l'implémentation du contrôleur.

En utilisant un générateur de code automatique avec un simulateur en temps réel, un RCP peut être implémenté à partir d'un modèle avec un minimum d'effort. Le prototype peut ensuite être utilisé pour accélérer les tests d'intégration et de vérification, ce qui ne peut pas être fait en utilisant une simulation hors ligne. La même chose vaut pour les tests HIL. En utilisant un banc d'essai HIL, les ingénieurs de test font partie du processus de conception plus tôt dans le processus, parfois avant qu'une usine réelle devienne disponible. Par exemple, en utilisant la méthodologie HIL, les ingénieurs de test automobile peuvent commencer à tester tôt un contrôleur de voiture avant qu'un banc d'essai physique ne soit disponible. Combiner RCP et HIL, tout en utilisant l'approche MBD, présente de nombreux avantages:

- ✚ Les problèmes de conception peuvent être découverts plus tôt dans le processus, ce qui permet de déterminer et d'appliquer les compromis requis, réduisant ainsi les coûts de développement.
- ✚ La durée du cycle de développement est réduite en raison de la parallélisations dans le travail.
- ✚ Les coûts de test peuvent être réduits à moyen et à long terme car les configurations de test HIL coûtent souvent moins cher que les configurations physiques et le simulateur en temps réel utilisé peut généralement être utilisé pour de multiples applications et projets.
- ✚ Les résultats des tests sont plus reproductibles car la dynamique du simulateur en temps réel ne change pas dans le temps comme le font les systèmes physiques.
- ✚ Peut remplacer les tests risqués ou coûteux en utilisant des bancs d'essai physiques.

I.7 Interaction avec le modèle

La Figure I.14 illustre les avantages de l'interaction du modèle. Ces interactions peuvent être (a) avec un utilisateur du système, (b) avec un équipement physique ou (c) avec les deux en même temps. Lorsqu'un utilisateur ou un équipement physique interagit avec un modèle en temps réel, il peut fournir des entrées de modèle et obtenir des sorties de modèle, comme il le ferait avec une installation réelle. Un modèle exécuté sur un simulateur en temps réel peut également être modifié en ligne, ce qui n'est pas possible avec une installation réelle. De plus, tout paramètre du modèle peut être lu et mis à jour en continu. Par exemple, dans une simulation de centrale électrique, l'inertie d'une turbine peut être modifiée pendant la simulation pour déterminer son effet sur la stabilité, ce qui est impossible sur une centrale électrique réelle.

De plus, avec un simulateur en temps réel, toute quantité de modèle est accessible pendant l'exécution. Par exemple, dans une application d'éolienne, le couple imposé au générateur par la boîte de vitesses est disponible, puisqu'il s'agit d'une quantité modélisée.

Dans une vraie éolienne, il est pratiquement impossible d'obtenir une valeur de couple précise en temps réel en raison du coût prohibitif d'un couple mètre. La configuration du modèle en ligne et la disponibilité complète des données rendent possibles des applications inimaginables. Par exemple, vérifier si un contrôleur peut compenser les changements dans la dynamique de l'usine causés par le vieillissement des composants [1].

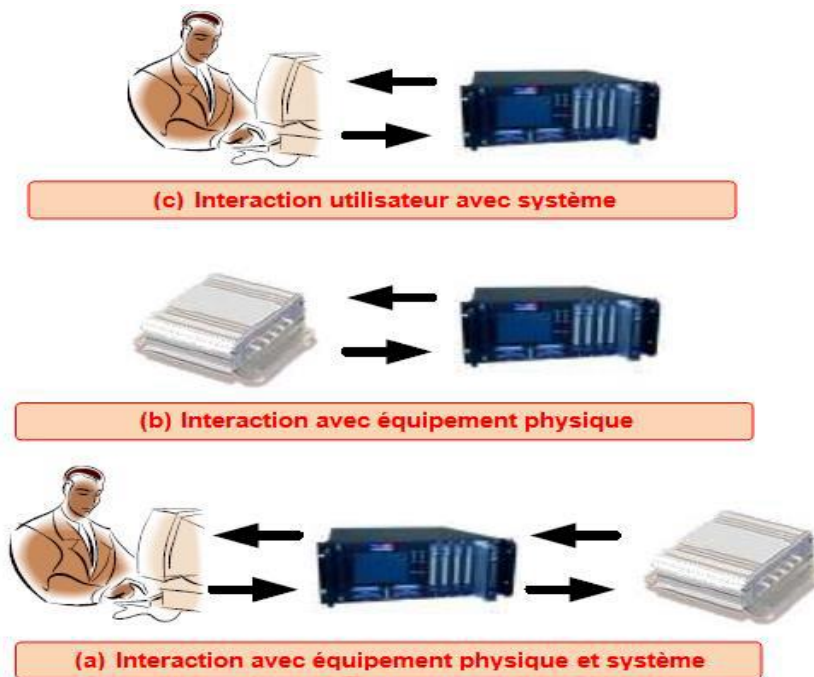


Figure I.14 : Interaction avec le modèle [1].

I.8 Plateforme RT-LAB

Les solutions OPAL-RT couvrent tous les besoins en matière de réseaux électriques traditionnels, d'électronique de puissance en temps réel et aussi rapidement que la simulation en hors temps réel et offrent également un niveau d'évolutivité inégalé pour concevoir, simuler et tester des systèmes d'alimentation de nouvelle génération. En effet, les systèmes en temps réel OPAL-RT aident à réaliser des études de faisabilité, développer de nouveaux concepts, concevoir et tester des contrôleurs pour une grande variété d'applications incluant les petits convertisseurs électriques, les variateurs électriques hybrides, les réseaux électriques et les énergies renouvelables.

Depuis sa première application il y a près de 20 ans sur Canada Arm de l'Agence spatiale canadienne, RT-LAB a révolutionné le monde de l'ingénierie des systèmes, que ce soit dans l'espace,

au sol ou en mer. RT-LAB permet aux ingénieurs et aux scientifiques d'accélérer le développement de nouveaux prototypes et de répondre aux tests les plus rigoureux exigés par les technologies nouvelles et innovantes [1].

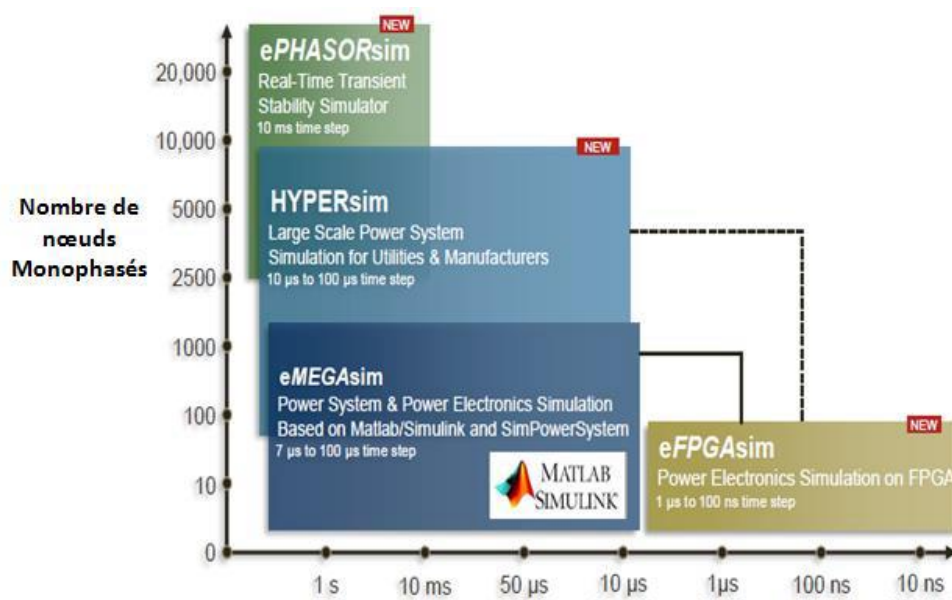


Figure I.15 : Simulateur en temps réel développé par RT-Lab [1].

I.9 Applications

Les applications de RT-LAB de OPAL-RT, peuvent se résumer comme suit :

- ✚ Systèmes de transmission et de distribution.
- ✚ Réseau intelligent « SmartGrids », Micro réseau « microGrids » et énergie renouvelable.
- ✚ SCADA et systèmes d'automatisation.
- ✚ PMU et dispositifs de protection.
- ✚ Développement du contrôleur d'électronique de puissance.
- ✚ Simulation MMC, HVDC et FACTS.
- ✚ Développer, améliorer et évaluer de nouveaux concepts de protection et de contrôle.
- ✚ Optimiser le fonctionnement du système d'alimentation.
- ✚ Diminuer le temps nécessaire à la mise en service des relais de protection et de contrôle.
- ✚ Effectuer de grands tests d'intégration pour analyser les interactions entre plusieurs contrôles et systèmes de protection.
- ✚ Reproduire les événements qui se sont produits dans le système d'alimentation en utilisant le réel.
- ✚ Systèmes de protection et de contrôle.

- ✚ Réduire le nombre de pannes ou de temps d'arrêt.
- ✚ Former les ingénieurs, les techniciens et les opérateurs.

I.10 Les avantages de la Simulation en temps réel

✚ Gagner du temps

1. Permettre aux ingénieurs de test de gagner du temps dans le processus de test.
2. Trouver des problèmes à un stade plus précoce du processus de conception.
3. Passer à la conception d'un périphérique alors que le système actuel n'est pas physiquement disponible.

✚ Réduction des coûts

1. Réduire les coûts énormes pour tester un nouvel appareil dans des conditions réelles.
2. Le système en temps réel pourrait tester de nombreuses configurations possibles sans modification physique.
3. Réduction du coût total sur l'ensemble du cycle de vie du projet et du système.

✚ Augmenter les fonctionnalités de test

1. Tester tous les scénarios possibles qui pourraient se produire dans la vie réelle dans un environnement sécurisé et simulé.
2. Grande flexibilité en étant capable de modifier tous les paramètres et les signaux du système de test en un coup d'œil.
3. Script de test automatique pour exécuter des tests 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 [3].

I.11 Outils de simulation et interface Logiciel du simulateur (OPAL RT-LAB)

OPAL-RT propose une offre complète de simulation temps réel et de prototypage rapide pour une multitude de systèmes électriques, électroniques et mécatroniques: réseaux électriques, convertisseurs de puissance, commandes de moteurs,...etc., représentée par **la Figure I.16**.

Ces produits intègrent une interface logicielle et une plateforme matérielle à la pointe de l'innovation. Elles sont spécialement conçues pour mener des études de faisabilité, mettre au point de nouveaux concepts, concevoir et tester les contrôleurs. Une multitude d'applications est possible, dont les convertisseurs de puissance, les entraînements électriques et hybrides, les très grands réseaux et les micros réseaux intégrant des sources d'énergies renouvelables [4].

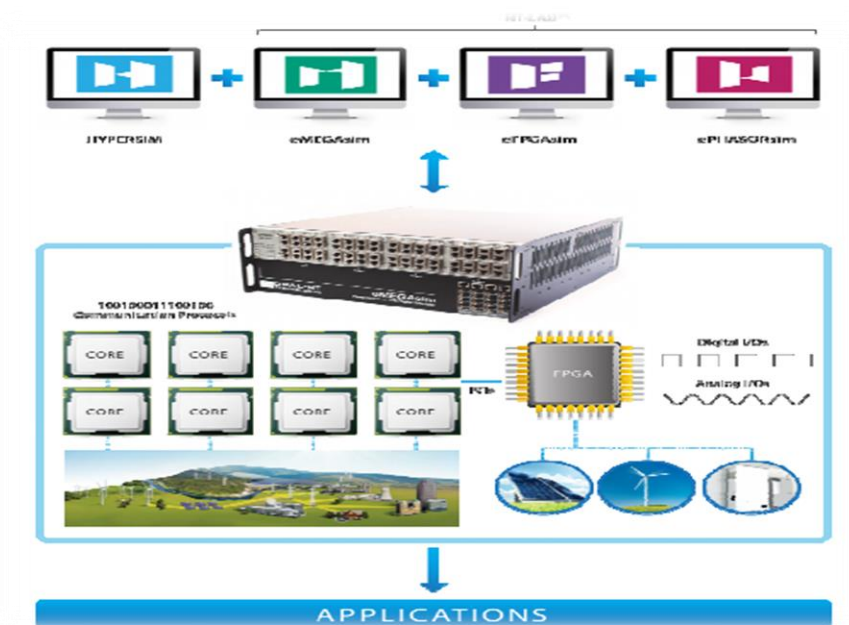


Figure I.16 : Pack logiciel OPAL RT-LAB de simulation temps réel [4].

I.11.1 HYPERSIM

I.11.1.1 Le simulateur des réseaux électriques (de demain)

Le passage d'une production d'électricité centralisée à des réseaux de ressources énergétiques décentralisées (DER) constitue une révolution. Accompagné par l'intégration de technologies intelligentes offrant des capacités élaborées de surveillance, commande et protection en temps réel, ce changement de modèle augmente considérablement la complexité des réseaux denses de transport et de distribution d'électricité et des réseaux électriques localisés. Les nouvelles technologies promettent une fiabilité et une efficacité accrues mais représentent sans conteste de sérieux défis d'intégration. HYPERSIM est l'outil idéal pour relever ces défis techniques. Sa plateforme perfectionnée de simulation temps réel permet des tests avec matériel dans la boucle (HIL).

Que ce soit pour développer, intégrer ou tester des nouveaux composants et systèmes, ou tout simplement pour s'éviter des heures d'attente pour quelques secondes de simulation, HYPERSIM est la solution [4].

I.11.1.2 Les composants principaux de HYPERSIM

ScopeView

Créez des tableaux de bord, réalisez des calculs volumineux et complexes, publiez des rapports PDF détaillés.

Logiciel HYPERSIM

Élaborez des schémas unifilaires lisibles grâce à une bibliothèque complète de composants validés par Hydro-Québec et RTE.

TestView

Automatise les tests et l'analyse pour une production rapide de rapports d'étude au format Excel ou PDF représenté par la **Figure I.17**.

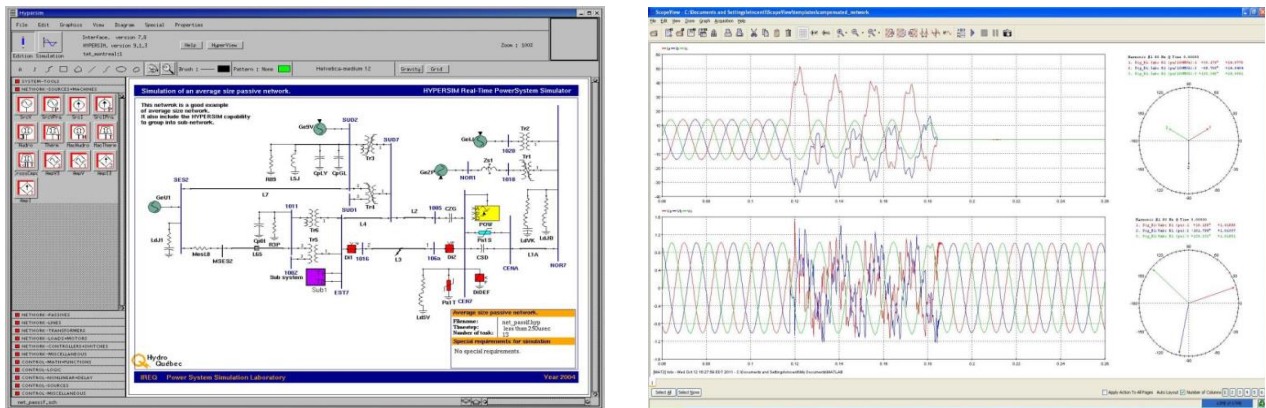


Figure I.17 : Simulation temps réel avec HYPERSIM [4].

HYPERSIM est le fruit de plus de 25 ans de recherche en collaboration entre plusieurs groupes d'experts : Hydro-Québec, Réseau de Transport d'Électricité (RTE) et le China Electric Power Research Institute (CEPRI). OPAL-RT développe en permanence HYPERSIM depuis 2010 et en a fait le simulateur de réseau électrique en temps réel le plus performant. OPAL-RT continue son étroite collaboration avec Hydro-Québec, ce qui permet à HYPERSIM de rester à la pointe de l'innovation. Il est la référence au sein des laboratoires nationaux, des centres de recherche développement industriels et des exploitants de réseau.

I.11.1.3 Le meilleur des technologies temps réel avec HYPERSIM

Puissance

HYPERSIM permet de simuler des réseaux électriques de plus de mille bus triphasés, en temps réel sur un seul simulateur, sans perte de précision.

Efficacité

HYPERSIM offre le meilleur rapport coût / performance du marché des simulateurs temps réel.

Rapidité

HYPERSIM permet de simuler des réseaux électriques sur des processeurs, et, dans le cas de composants d'électronique de puissance à haute vitesse comme des convertisseurs modulaires multi niveaux (MMC) sur des cartes FPGA.

I.11.1.4 Applications typiques

- ✚ permet aux ingénieurs de créer rapidement des modèles de systèmes d'alimentation en utilisant à la fois des modèles de composants vérifiés dans le monde réel de la bibliothèque HYPERSIM, ainsi que leurs propres modèles de réseau, d'appareil et même d'électronique.
- ✚ peut être exécuté sur l'ordinateur de simulation en temps réel, ou sur un ordinateur de bureau (sans HIL) en temps non réel pour le développement et la vérification de modèles
- ✚ s'intègre à eHS - le puissant outil de simulation électronique en temps réel d'OPALRT
- ✚ CPS - la seule solution de simulation cyber-physique en temps réel au monde, développée par Scalable Networks.
- ✚ prend en charge de très grands modèles de réseau jusqu'à 9000 bus 3P
- ✚ est également disponible en tant que service d'abonnement basé sur le Cloud qui permet des simulations en temps réel sans HIL pour des projets de recherche et développement de toute taille et durée [4].

I.11.2 eMEGASIM

Est un système flexible de simulation temps réel de réseaux électriques et d'électronique de puissance, pour les tests avec matériel dans la boucle (HIL ou Hardware-In-the-Loop) et le prototypage rapide de commande (RCP).

C'est une solution extensible, simple à utiliser et abordable, qui s'adapte à une grande variété de domaines et d'applications. Que ce soit pour un usage industriel ou universitaire, les utilisateurs peuvent ainsi élaborer le système de simulation temps réel qui répondra exactement à leurs besoins actuels et futurs. La rentabilité élevée des solutions eMEGASIM garantit un retour sur investissement durable (Figure I.18).

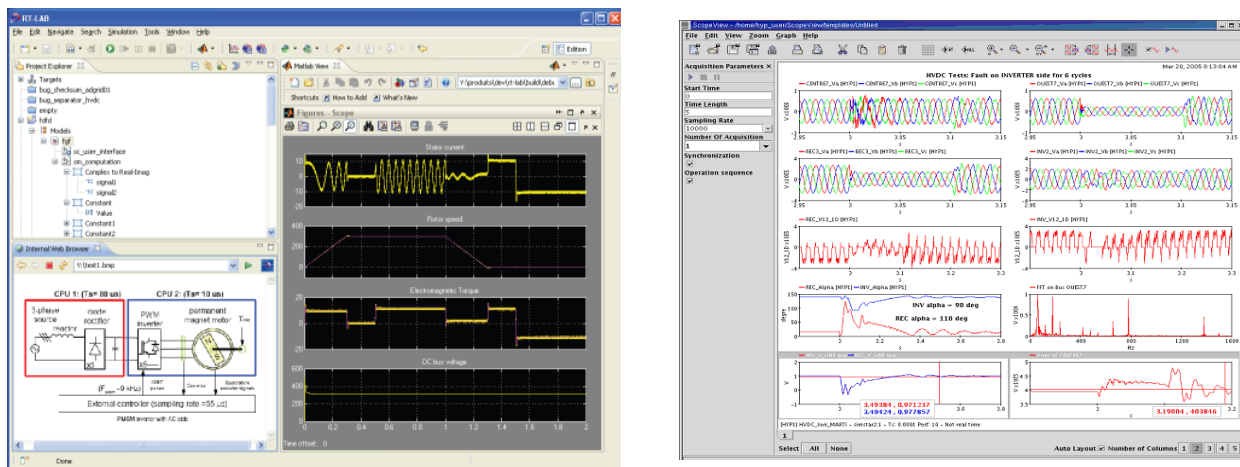


Figure I.18 : Simulation temps réel avec eMEGASIM [4].

I.11.2.1 Les atouts d'eMEGASIM

Polyvalence et adaptabilité :

Des réseaux de transmission et de distribution aux convertisseurs électriques et aux moteurs, eMEGASIM offre un environnement tout-en-un fondé sur l'outil Simulink pour la recherche-développement et les essais. Sa plateforme souple et personnalisable s'adapte à une large gamme de domaines et d'applications. Les équipements, logiciels et protocoles d'OPALRT sont extensibles et évoluent en continu pour vous permettre d'augmenter les performances de votre système et de diversifier vos applications dans le temps.

Prise en main rapide

eMEGASIM fonctionne sur la plateforme de simulation temps réel RT-LAB, entièrement intégrée avec l'interface Simscape Power System, anciennement SimPowerSystems, facile d'utilisation et considérée comme une référence du secteur. Le temps de prise en main après acquisition en est ainsi indéniablement réduit. De plus, cette plateforme est aujourd'hui largement connue des étudiants.

Précision

Extensible de 6 à 64 processeurs et bénéficiant de liaisons de communication à haute vitesse de 10 Gbits/s, eMEGASIM peut simuler des modèles avec des pas de temps de seulement 10 μ s tout en garantissant des résultats rapides et précis. Associé à des coprocesseurs FPGA et à la boîte à outils RT-XSG d'OPAL-RT, il peut réaliser des simulations avec un pas de temps de l'ordre de quelques nanosecondes.

eMEGASIM dispose des solveurs les plus rapides et les plus précis: ARTEMiS et ARTEMiS-SSN. Leurs algorithmes éliminent les délais artificiels tout en appliquant des techniques de pointe de découplage pour assurer une vitesse et une efficacité accrues [4].

I.11.3 RT-LAB

RT-LAB

Est une plateforme perfectionnée de commande de simulation qui comprend une bibliothèque complète de modèles pour toutes les applications et tous les secteurs. Elle permet de créer, compiler, charger, exécuter et analyser des modèles.

RT-EVENTS

RT-EVENTS est une boîte à outils Simulink qui améliore la vitesse et la précision des simulations discrètes de systèmes à événements. Il s'agit de la solution idéale de simulation de signaux de modulation haute fréquence pour les commandes de convertisseurs. RT-EVENTS

applique une correction d'erreur pour prendre en compte les événements qui se produisent entre deux instants d'échantillonnage, et permet de plus la simulation distribuée en temps réel.

Pour une polyvalence maximale, les plateformes eMEGASIM sont directement compatibles avec ePHASORSIM réseaux électriques étendus que celles de systèmes d'électronique de puissance de haute précision.

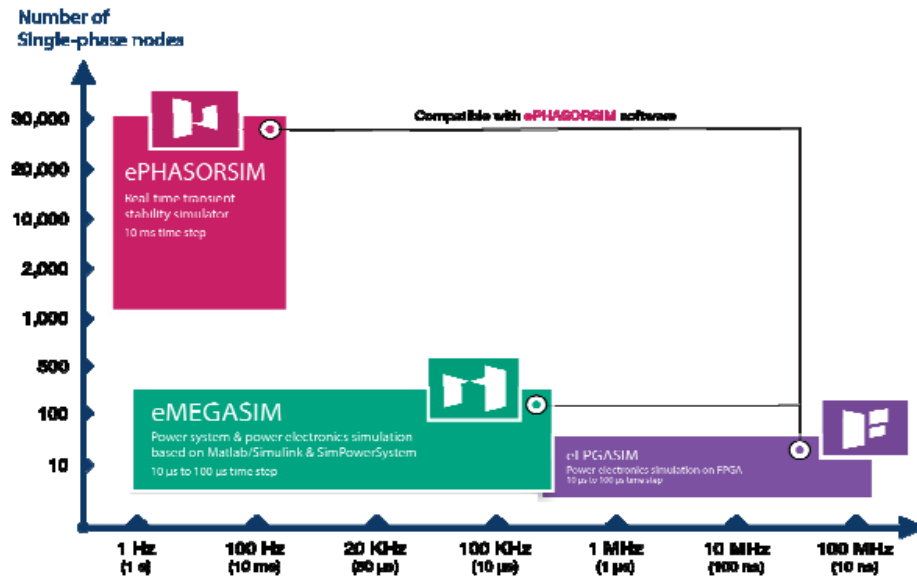


Figure I.19: Fréquences des phénomènes transitoires simulés par eMEGASIM ePHASORSIM et eFPGASIM [4].

I.11.3.1 Applications typiques

- ✚ Formation des opérateurs de réseau de transport à l'aide de modèles de réseau à séquence positive équilibrée.
- ✚ Formation des opérateurs de réseaux de distribution à l'aide de modèles de réseau phase par phase non équilibrés.
- ✚ Test et optimisation des tensions, régulateurs de vitesse, stabilisateurs de système d'alimentation) sur la stabilité du système.
- ✚ Test de systèmes de contrôle mondiaux mis en œuvre sur SCADA à l'aide de mesures PMU pour le contrôle.
- ✚ Test des systèmes de contrôle locaux tels que les changeurs de prises de transformateur, la commutation des condensateurs, la protection contre les surintensités et les fermetures, le délestage, le rétablissement de la cinération avec les systèmes de contrôle mondiaux.

- ✚ Test des interactions entre les systèmes de transmission FACTS et HVDC sur la stabilité du système des systèmes interconnectés à l'aide de la simulation de fréquence fondamentale avant de réaliser des simulations EMT détaillées.
- ✚ Évaluations dynamiques de la sécurité du cyber système des réseaux électriques à grande échelle
- ✚ Éducation et recherche.

I.11.4 eFPGASIM

La simulation temps réel de systèmes d'électronique de puissance reste l'un des plus ambitieux défis de la simulation avec matériel dans la boucle (HIL). Les capacités d'entrées/sorties pour la capture des signaux à largeur d'impulsion (MLI, ou *PWM*), la résolution mathématique de commutateurs couplés et l'injection de fautes à tous les niveaux d'un système complexe d'électronique de puissance, sont autant d'exemples illustrant la complexité de ce secteur en pleine évolution.

Après presque deux décennies de recherche-développement en simulation temps réel et d'expériences pratiques en électronique de puissance, OPAL-RT a lancé eFPGASIM, la solution temps réel sur cartes FPGA la plus puissante et la plus intuitive du marché. eFPGASIM est une plateforme HIL de pointe qui associe la performance d'un simulateur numérique haute fidélité à une latence de communication très faible pour mettre au point et tester des systèmes de commande et de protection en électronique de puissance. Le système eFPGASIM permet aux ingénieurs d'aller plus loin dans leurs tests grâce à son intégration avec d'autres produits, tels que [4]:

- ✚ **eMEGASIM**, qui permet aux utilisateurs de connecter leur appareil électronique de puissance d'un microréseau à un très grand réseau électrique.
- ✚ **ePHASORSIM**, pour interagir avec et aborder l'intégration des énergies renouvelables et le réseau de transport progressivement surchargé, les problèmes de cyber sécurité et la complexité de l'exploitation, de la surveillance, du contrôle et de la protection sur les réseaux électriques.

Protocole (paragraphe)s de communication tels que Modbus, CEI 61850, DNP3, cAN, ARINC- 429, MIL-STD-1553 et bien d'autres.

Une API complète et bien documentée, permettant aux utilisateurs d'interagir avec d'autres applications, telles que Python, TestStand, labVIEW, C ++ et Java, la **Figure I.20** représente la simulation temps réel avec eFPGASIM.

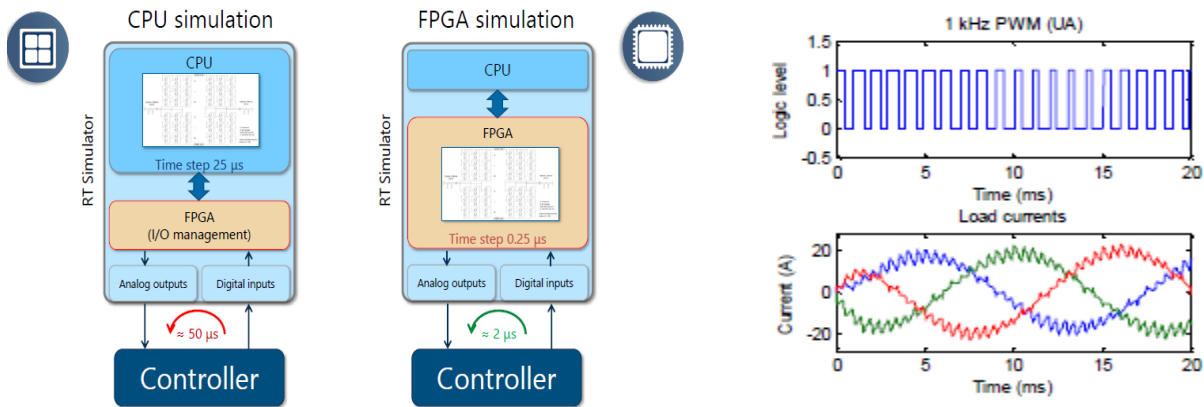


Figure I.20 : Simulation temps réel avec eFPGASIM [4].

I.11.4.1 eFPGASIM pour les transports électriques

Le simulateur numérique eFPGASIM constitue une plateforme HIL de pointe pour les tests de performance de systèmes de commande et de protection, avec une latence de communication très faible. Il permet aux ingénieurs en électronique de puissance de mettre au point des systèmes d'entraînement électrique avec un pas de temps inférieur à la microseconde [4].

I.11.4.2 eFPGASIM: boîte à outils logicielle

Moteurs électriques

Une simulation temps réel pour des tests HIL ou PHIL (simulation avec matériel de puissance dans la boucle) de commande de moteur électrique doit être la plus fidèle possible à la réalité, non seulement pour maximiser la couverture des tests mais aussi pour privilégier la simulation temps réel afin de réduire les coûts engendrés par l'usage d'un dynamomètre.

À cette fin, eFPGASIM offre une vaste bibliothèque de modèles de moteurs électriques: machine synchrone à aimant permanent (PMSM), machine à induction (IM), générateur asynchrone à double alimentation ou DFIG, machine asynchrone à double alimentation ou DFIM, rotor à cage d'écureuil, moteur à réluctance commutée (SRM), moteur sans balais à courant continu (BLDC) et moteur à courant continu. OPAL-RT dispose aussi de l'expertise pour développer des modèles temps réel de moteurs atypiques, à la demande.

✚ EHS (Electrical High Solver)

eHS est un solveur électrique pour FPGA générique et reprogrammable qui s'inscrit au cœur de la solution eFPGASIM (**Figure I.21**). Son interface utilisateur conviviale permet l'exécution en temps réel de modèles créés dans l'un des outils de simulation suivants : SimScape PowerSystems, PSIM, PLECS ou Multisim. Avec la puissance d'eHS, eFPGASIM est le système idéal de simulation temps réel pour tout type d'applications de tests de conversion électrique, comme la conversion des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, stockage de l'électricité et micro réseaux), les systèmes d'entraînement industriels, les véhicules électriques et la recherche en électronique de puissance.

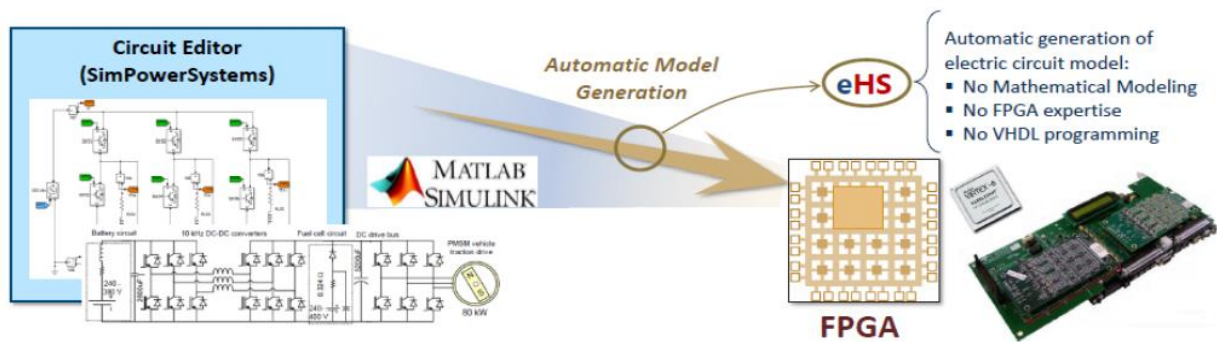


Figure I.21: Solveur électrique pour FPGA générique et reprogrammable [4].

✚ Modèles de convertisseurs modulaires multiniveaux (MMC) sur FPGA

Le bloc MMC FPGA (**Figure I.22**) développé par OPAL-RT simule les procédés de conversion modulaire multi niveaux de diverses topologies de sous-modules avec des circuits électriques très large simulé dans **eMEGASIM** ou **HYPERSIM**. Tout comme d'autres blocs d'eFPGASIM, les utilisateurs accèdent directement au bloc **MMC FPGA** à partir de MATLAB/Simulink. Ils peuvent alors modifier dans les détails leur modèle et produire leur propre microprogramme FPGA grâce à la fonctionnalité RT-XSG qui permet aussi d'intégrer des interfaces particulières d'entrées/sorties et de personnaliser l'algorithme de contrôle dans la boucle.

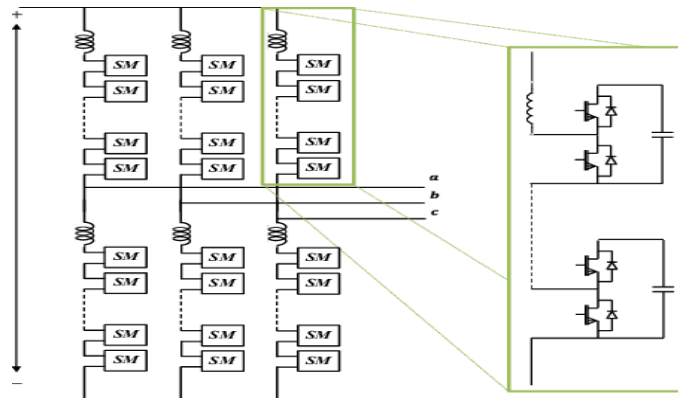


Figure I.22 : Modèles de convertisseurs modulaires multi niveaux,- (MMC) sur FPGA [4].

RT-XSG

Offre des blocs prêts à l'emploi, utilisables dans Simulink, pour la simulation FPGA avec matériel dans la boucle et le prototypage rapide de lois de commande. Il assure la configuration de la carte FPGA, de même que le transfert des données à haut débit entre les modèles de simulation RT-LAB et le système défini par l'utilisateur sur la carte. RTXSG comprend une bibliothèque de plusieurs blocs aux fonctions comparables à celles des blocs MATLAB/Simulink® afin de faciliter la programmation sur cartes FPGA (**Figure I.23**). Il permet également à l'utilisateur de générer un modèle personnalisé et de répartir le calcul sur plusieurs noeuds pour une simulation plus puissante et flexible.

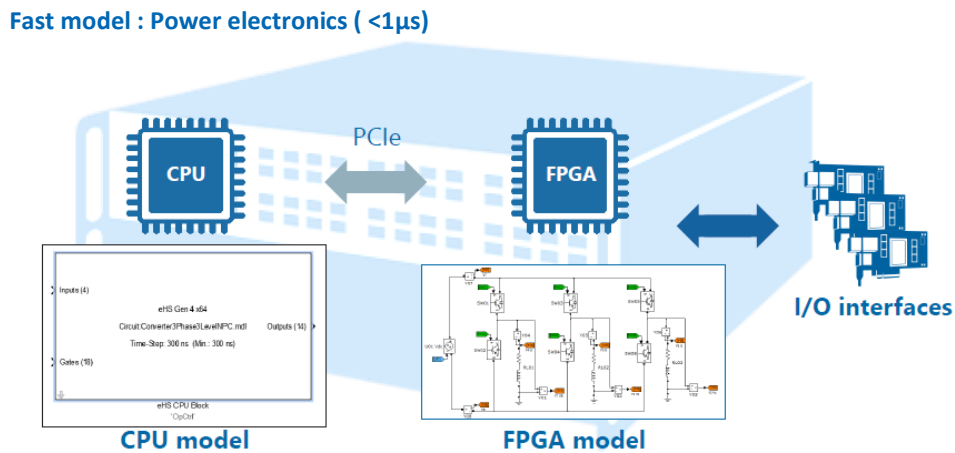


Figure I.23 : Structure interne : Co-simulation CPU/FPGA [4].

I.11.4.3 Applications typiques

- ✚ Systèmes d'alimentation embarqués.
- ✚ Transport hybride et électrique.
- ✚ Commandes de conversion d'énergie.

I.11.5 ePHASORSIM

I.11.5.1 Simulation en temps réel de la stabilité électromécanique des grands réseaux électriques

Le développement massif des sources d'énergie renouvelable, la saturation progressive du réseau de transmission et les questions de cyber sécurité sont autant de facteurs qui augmentent la complexité de l'exploitation, la surveillance, la commande et la protection des réseaux électriques.

La conduite de réseaux étendus, plus complexe, exige davantage de précision dans les évaluations et les études, ainsi que dans la formation à l'exploitation et à la validation des réseaux à

venir. Des systèmes innovants comme ePHASORSIM permettent de mener à bien ces opérations par une analyse approfondie des réseaux électriques, avec un gain de temps substantiel.

ePHASORSIM est un outil pour les projets qui requièrent de simuler un réseau dynamiquement. Il permet de tester l'intégration de systèmes variés, tels que des systèmes de gestion de l'énergie (EMS), de supervision et de contrôle (SCADA), de protection et de commande de grands réseaux. Son solveur en mode phaseur, avec son pas de temps de quelques millisecondes, présente la tension et le courant tels qu'ils sont dans une unité de mesure de vecteurs de phase ou «phasor measurement unit (PMU)» installée dans le réseau. Ce système sans égal permet une simulation rapide et précise de la stabilité électromécanique des grands réseaux en temps réel [4].

I.11.5.2 ePHASORSIM pour les laboratoires et centres de recherche en électricité

-  Simulation temps réel de stabilité transitoire de réseaux de 30 000 nœuds.
-  Algorithmes d'évaluation de commande/protection/état pour réseaux étendus.
-  Outils et algorithmes EMS, comme le contrôle automatique de gain (AGC) ou le délestage.
-  Courants PMU et applications PDC (courant de polarisation/dépolarisation).
-  Études de systèmes qui comportent d'importantes sources d'énergie renouvelable.
-  Conception et tests de contrôleurs locaux, comme des régulateurs de tension.
-  Mesurage perfectionné et réseau d'information.
-  Impact des charges sur les réseaux de distribution.

I.11.5.3 ePHASORSIM: un environnement intégré

Fondée sur RT-LAB, environnement logiciel de référence d'OPAL-RT, la simulation temps réel ePHASORSIM permet la connexion à un modèle Simulink très complet afin que les chercheurs puissent bénéficier d'un écosystème de réseau exhaustif. Ils accèdent ainsi à tous les modules matériels et protocoles d'entrées/sorties et de communication d'OPAL-RT comme DNP3, OPC-UA ou C37.118, pour une interconnexion de la simulation temps réel avec les dispositifs physiques testés. La plateforme propose aussi toutes les fonctionnalités de surveillance, de traitement et d'acquisition des données pour faciliter les tests, les analyses et la création de rapports [4].

I.11.5.4 Fonctionnalité d'import

Un ensemble de modèles de réseaux en composante directe et de réseaux triphasés déséquilibrés est fourni dans la bibliothèque d'ePHASORSIM. On y trouve des modèles de générateurs avec leurs contrôleurs, leurs charges, leurs transformateurs, leurs injecteurs et leurs sources de tension, ainsi qu'une grande variété de types événements associés à chaque composant, pour simuler des scénarios complexes d'exploitation et de commande temps réel.

En complément des blocs fournis en standard, ePHASORSIM peut être étendu par des composants et des fonctionnalités créés par l'utilisateur via l'interface Functional Mockup Interface (FMI) de Modelica et les boîtes à outils Simulink/SimScape Power System.

L'API polyvalente d'ePHASORSIM permet l'exécution automatique de milliers de tests, avec une validation à la volée des différents groupes de paramètres du modèle. Les tests automatiques s'écrivent simplement en PYTHON ou dans des langages apparentés au C.

ePHASORSIM peut simuler des réseaux denses, qui comprennent jusqu'à 20 000 bus, sur un ordinateur à un seul cœur CPU. De plus, il peut exécuter des calculs parallèles pour atteindre les performances exceptionnelles requises pour la simulation en temps réel des plus grands réseaux, et pour la simulation offline. Des scénarios élaborés d'exploitation peuvent ainsi être testés et prototypés pour des réseaux de 50 000 à 100 000 nœuds. Que le réseau soit équilibré ou non, ePHASORSIM peut réaliser une simulation en temps réel de stabilité transitoire avec un pas de temps de quelques millisecondes. Avec la fonctionnalité de simulation parallèle, les possibilités sont encore accrues: exécution de simulations multiples d'un ou plusieurs réseaux électriques, chacune associée à un scénario d'exploitation différent. Cette option peut facilement accélérer d'un facteur 32 une simulation dynamique, sur un simulateur temps réel 32 cœurs [4].

I.12 Types de simulateurs développés par OPAL RT-LAB

OPAL RT-LAB propose une série de simulateurs développés selon des améliorations et performances désirées : OP4510, OP4200, OP5030, OP5600, OP5607, OP5700, OP7020. On s'intéresse dans ce mémoire à OP4510 qui est disponible au niveau du laboratoire de recherche LGE à l'université de Saïda où nous avons effectué nos travaux de mémoire.

I.12.1 Le simulateur OPAL 4510

L'OP4510 est un simulateur d'entrée de gamme compact qui combine toutes les forces d'OPAL-RT dans le prototypage rapide de contrôle hautes performances et la simulation Hardware-In-the-Loop de l'électronique de puissance. Son architecture modulaire signifie qu'il peut être personnalisé via l'ajout d'une large gamme de cartes d'E/S (IOs). Son faible coût signifie qu'il est idéal pour les laboratoires de recherche ainsi que pour les besoins d'enseignement.

Pour les universités, ECAD tools fournit des packages basés sur OP4510 avec un ou deux cœurs déverrouillés, ce qui en fait la solution idéale pour la modélisation de 25 à 50 nœuds de système d'alimentation [4].

I.12.2 Caractéristiques spécifiques

- ✚ Cible temps réel avec 2U puissantes avec processeur 4 INTEL CPU Cores à 3,3 GHz
- ✚ Système d'exploitation en temps réel: Linux REDHAT
- ✚ FPGA Xilinx KINTEX-7 avec I/O boards
- ✚ Total de 4 cartes I/Os :
16 A.in, 16 A.out, 32 D.out et 32 D.in
- ✚ Connecteurs DB37 arrière
- ✚ 4 interfaces optiques SFP 5 Gbps en option.
- ✚ Connecteurs de synchronisation
- ✚ Emplacement de PC pour la connexion avec les unités d'extension.

I.12.3 Architecture et périphériques

L'architecture (flexible) combinée commerciale FPGA et CPU standard de l'OP4510 utilise les dernières technologies permettant aux utilisateurs d'atteindre des pas de temps de simulation en temps réel inférieurs à **10 μ s et 20 ns**, respectivement [4].

La simulation entre FPGA et CPU est également possible, grâce à une liaison PCI express rapide échangeant des données et des signaux entre des périphériques. Cette fonctionnalité permet de coupler des modèles FPGA haute vitesse, tels que des convertisseurs de puissance et des entraînements électriques, à des systèmes électriques et mécaniques plus lents sur la CPU, offrant ainsi des simulations encore plus détaillées.

La résolution temporelle de **10 nanosecondes** du FPGA permet aux utilisateurs de réaliser des **RCP** avancés de contrôleurs à haute vitesse basés sur *PWM* pouvant être testés sur du matériel réel grâce à un OP4510 complet avec un système de test de contrôleur électronique de puissance autonome et des modèles électroniques de puissance prédéfinis pour que les projets soient opérationnels en moins de temps que jamais auparavant.

La **Figure I.24** illustre l'architecture du simulateur pour chaque option à l'aide de vues d'assemblage des composants matériels de simulation dans le châssis OP4510 contenant un support FPGA pouvant accepter quatre cartes mezzanine OPAL-RT standard, en plus aux signaux RS422.

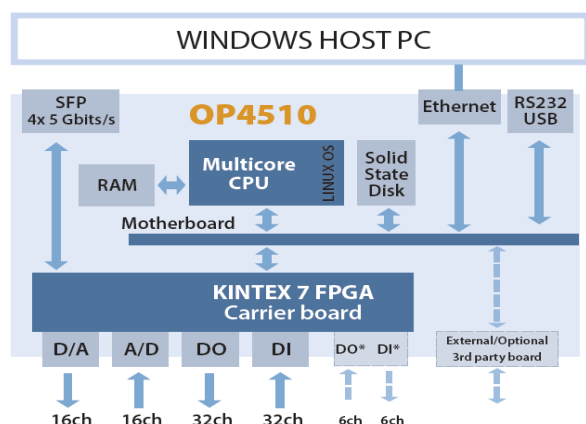


Figure I.24 : Vue frontale du simulateur + Architecture de l'OP4510 [4].

La **Figure I.25** montre la vue arrière de l'OP4510 où sont connectés tous les périphériques externes :

- A.** Connecteurs DB37 pour entrées et sorties numériques ou analogiques.
- B.** Dans la configuration standard OP4510 standard, cette section contient une plaque vierge, cependant, plusieurs options sont disponibles. «Options d'extension d'E / S OP4510 V2».
- C.** Connecteurs d'ordinateur standard (de gauche à droite): souris et clavier, ports USB, moniteur, ports réseau (Ethernet).
- D.** Module connecteur DB9 pour signaux RS422, généralement utilisé pour transmettre les entrées de codeur différentiel et les sorties [4].

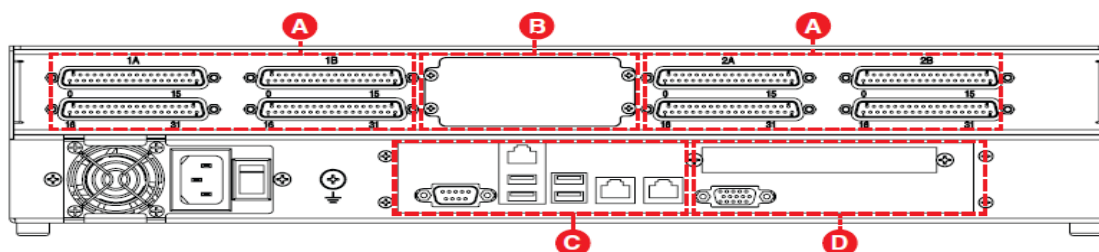


Figure I.25 : Vue d'arrière de l'OP4510 [4].

Kintex-7: (Figure I.26) Interface d'I/O à 4 groupes configurables (32 lignes d'I/O numériques ou 16 lignes d'I/O analogiques). Solution très flexible: possibilité d'avoir différentes combinaisons d'entrées-sorties avec la même carte FPGA convient pour la gestion des I/O et l'exécution du modèle jusqu'à 132 lignes d'E / S (96 utilisées par l'OP4510) Temps d'échantillonnage: 200 MHz.

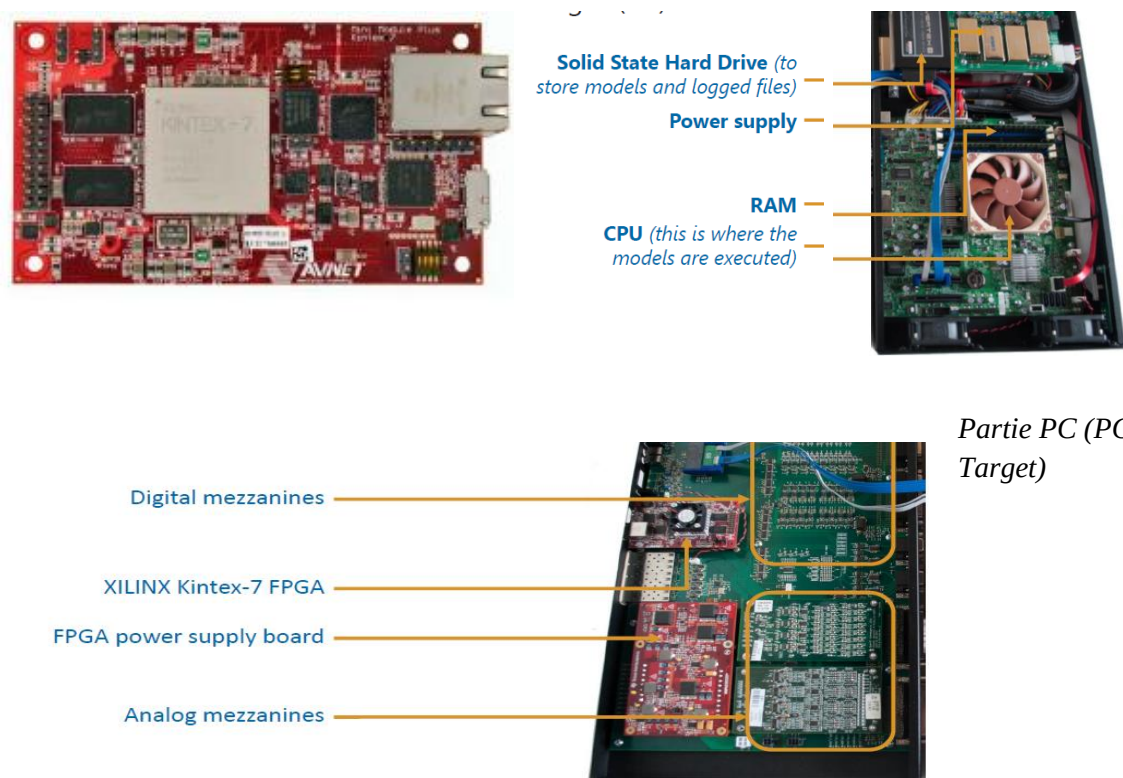


Figure I.26 : Périphériques internes du simulateur OP4510 [4].

Le **tableau I.2** montre les configurations des groupes E/S (I/Os) de l'OP 4510 :

Sorties numériques	Entrées numériques	Sorties Analogiques	Entrées Analogiques
▪ 32 canaux ▪ isolation optique ▪ Tension de sortie définie par l'utilisateur (5 à 30 V) ▪ Courant maxi +/- 50 mA par canal	▪ 32 canaux ▪ isolation optique ▪ Tension d'entrée flexible (4 à 50 V) ▪ Courant d'entrée 3,6 mA	▪ 16 canaux asymétriques. ▪ Résolution 16 bits ▪ Plage de tension +/-16 V ▪ Temps de conversion : 1µs	▪ 16 canaux différentiels ▪ Résolution 16 bits ▪ Plage de tension +/-20 V ▪ Temps de conversion: 0.5 ou 2.5 µs

Tableau I.2 : Configurations des groupes E/S (I/Os) de l'OP 4510[4].

I.13 Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre que le simulateur temps-réel RT-LAB 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. La connaissance des différentes méthodes et types de simulation est nécessaire avant d'entamer un projet de simulation en temps réel. En suite on a donné une présentation de l'architecture interne et externe du simulateur OP4510. Le chapitre suivant est dédié à la modélisation sous RT-LAB.

Chapitre II

Modélisation sous RT-LAB

II.1 Introduction

RT-LAB est une plate-forme distribuée en temps réel développée par OPAL-RT, qui facilite le processus de conception des systèmes d'ingénierie en faisant passer les ingénieurs des modèles dynamiques Simulink aux simulations en temps réel avec hardware-in-the-loop, en très peu de temps, à faible coût. Son évolutivité permet au développeur d'ajouter de la puissance de calcul là et quand c'est nécessaire. Il est suffisamment flexible pour être appliqué aux problèmes de simulation et de contrôle les plus complexes, que ce soit pour des applications hardware-in-the-loop en temps réel ou pour accélérer l'exécution, le contrôle et les tests de modèles. La Figure II.1 présente l'intégration du système RT-LAB à travers des applications, le programme qui est exécuté dans le simulateur provient directement d'un modèle Simulink qui a été compilé avec RT-LAB [5].

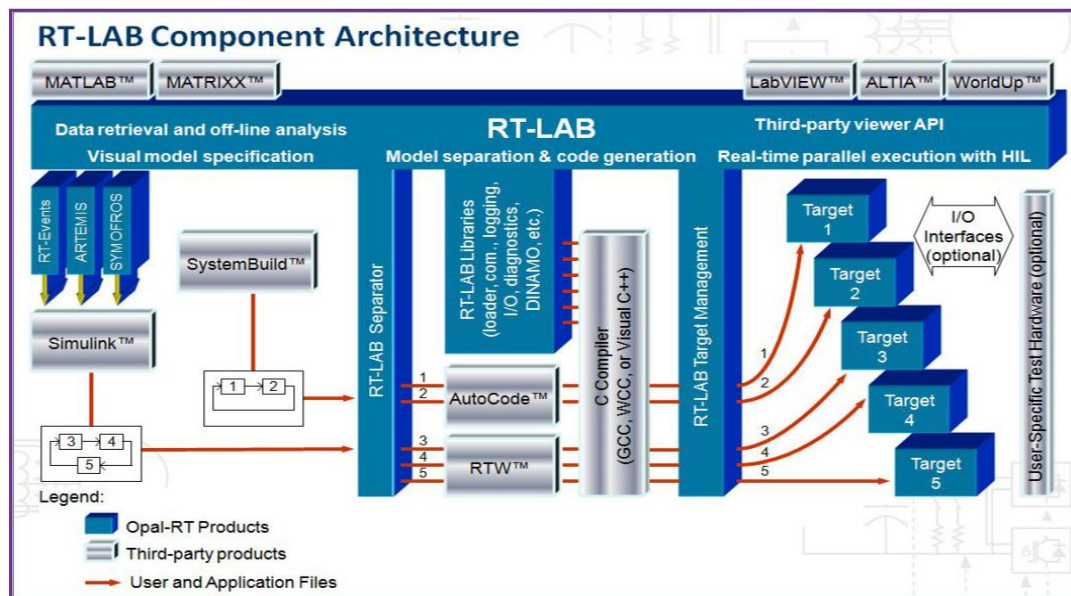


Figure II.1 : Intégration de RT-LAB au travers certaines applications [5].

Voici les principales étapes de création d'un exécutable pour le simulateur, toutes gérées avec RT-LAB (Figure II.2) :

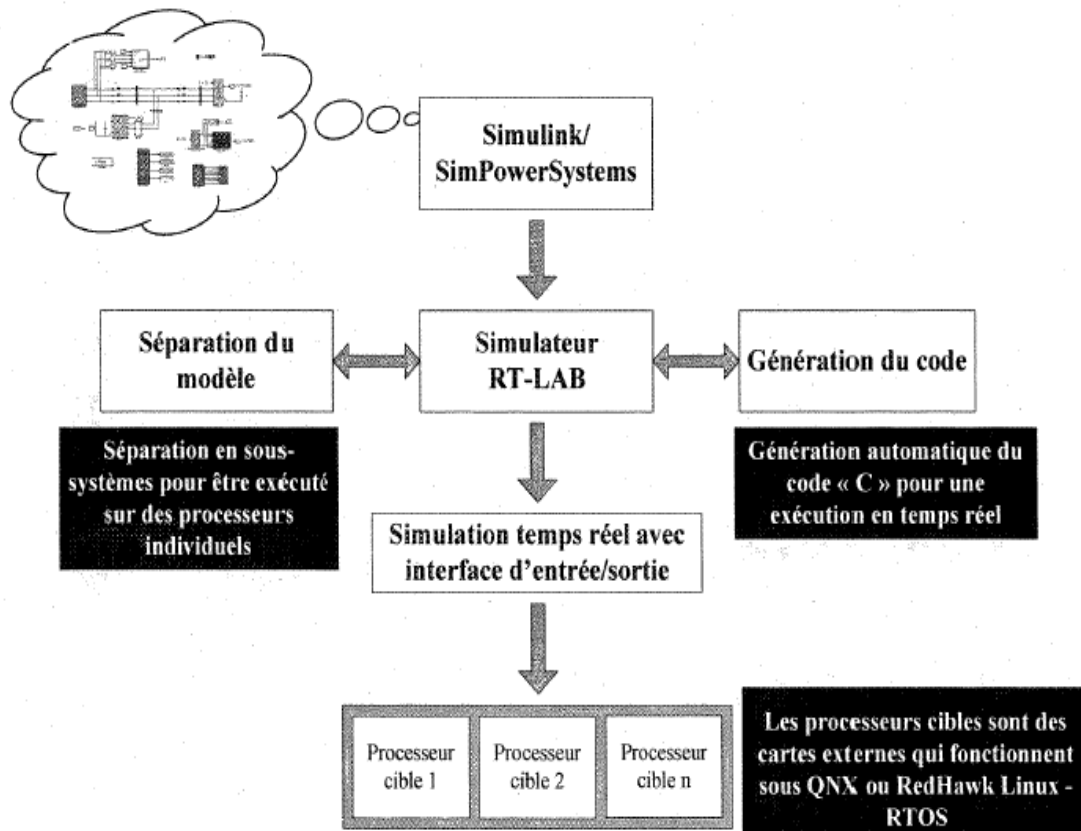


Figure II.2: Évolution du modèle Simulink jusqu'à la simulation en temps réel [5].

- ✚ Implantation du modèle sous MATLAB /Simulink.
- ✚ Séparation du diagramme Simulink en sous-systèmes pour l'assignation des processeurs de calcul.
- ✚ Génération de code C à partir du diagramme Simulink et du code MATLAB.
- ✚ Envoi du code C au simulateur.
- ✚ Compilation du code C et création de l'exécutable par le simulateur.
- ✚ Exécution du programme.

L'implantation Simulink (d'un tel modèle) peut être envoyée presque tel quel vers le simulateur pour une exécution temps réel. Seules quelques modifications au diagramme Simulink original sont à effectuer à l'aide d'une librairie Simulink qu'OPAL-RT met à la disposition des usagers.

II.2 Regroupement en sous-systèmes

Le modèle original doit être séparé en sous-systèmes dépendamment de l'emplacement physique où chacun d'eux sera exécuté (assignation des cœurs de calcul). Trois types de sous-système peuvent être déclarés selon les deux premières lettres du nom du sous système (SM, SS ou SC), (voir la Figure II.3) [5].

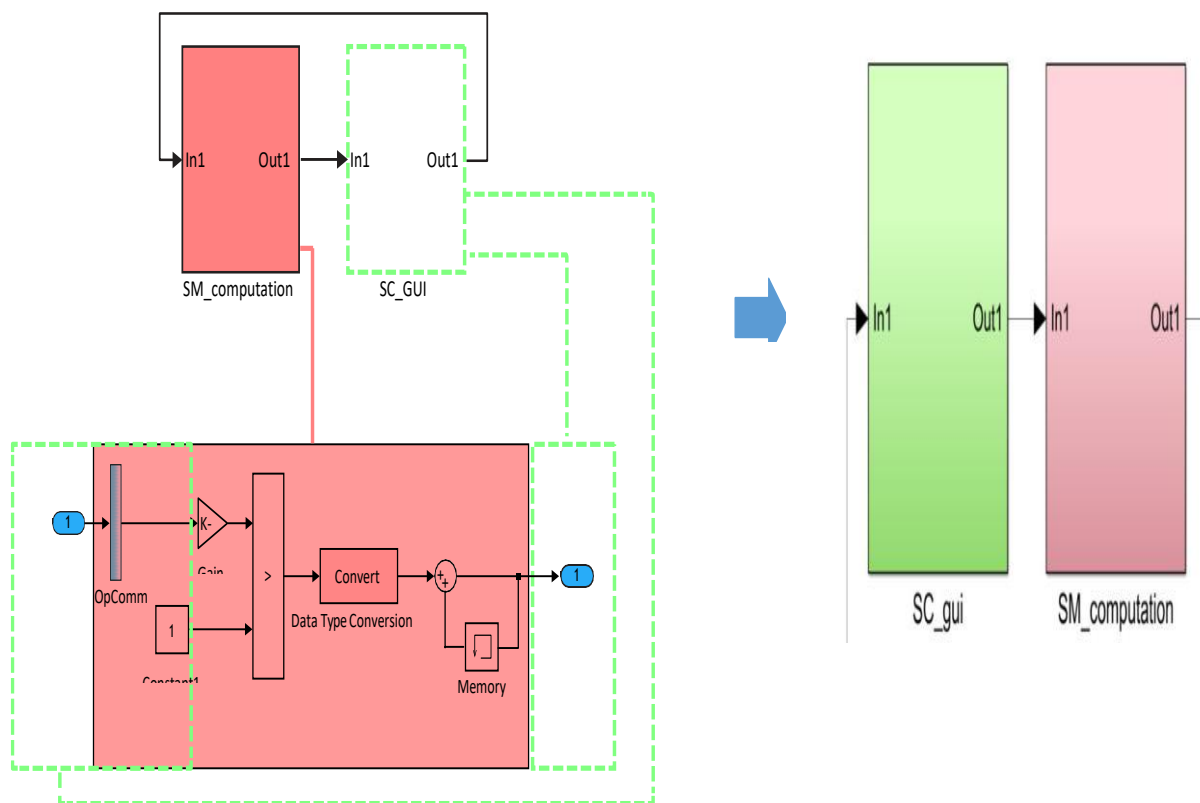


Figure II.3 Modélisation sous RT-LAB - Création des sous-systèmes [5].

Le modèle doit contenir que des blocs regroupés en sous systèmes «Ensemble de blocs qui sont placés dans un seul bloc appelé «sous-système» » (**Figure II.4**) ce qui permet de [5]:

- Simplifier le modèle en regroupant des blocs
- Etablir un diagramme hiérarchique
- Gardez les blocs fonctionnellement liés ensemble

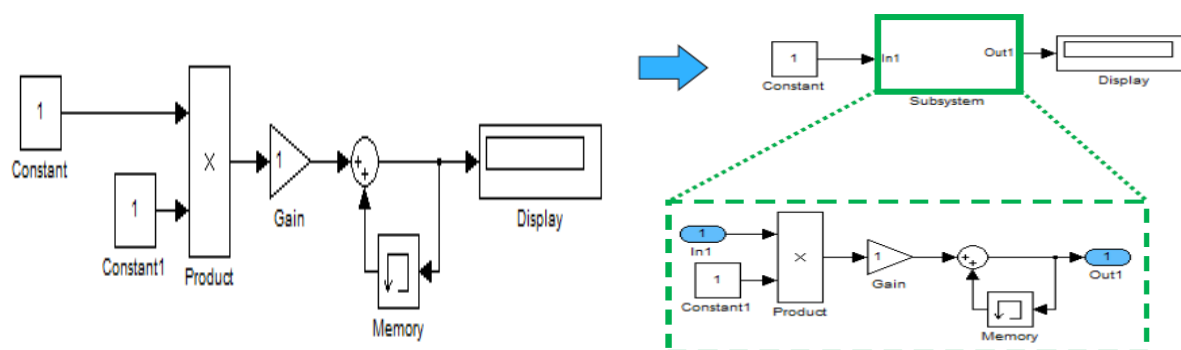


Figure II.4: Regroupement en sous systèmes [5].

Dans les plates-formes RT-LAB, les sous-systèmes ont deux objectifs (**Figure II.5**) [5]:

- Distinguer les sous-systèmes de **calcul** et le sous-système d'interface **graphique**.
- Attribuer des sous-systèmes de calcul aux différents cœurs du processeur (CPU).

Quoi qu'il en soit, le niveau supérieur d'un modèle Simulink® utilisé avec RT-LAB doit afficher uniquement les sous-systèmes (**Figure II.6**).

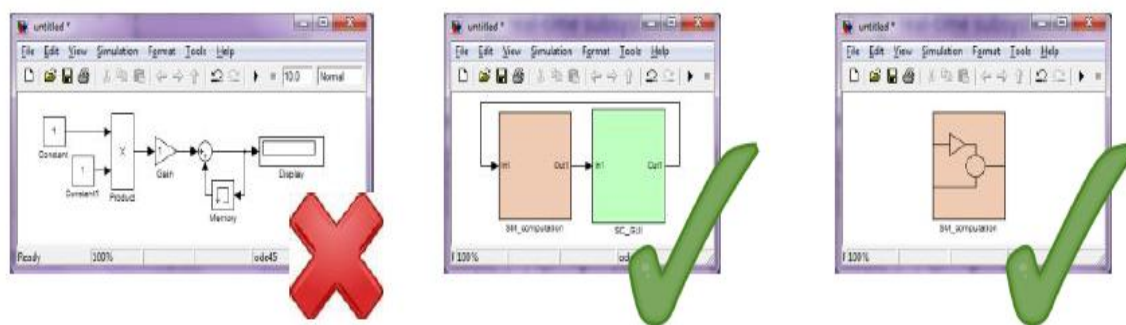


Figure II.5: Création et distinction des 2 sous systèmes [5].

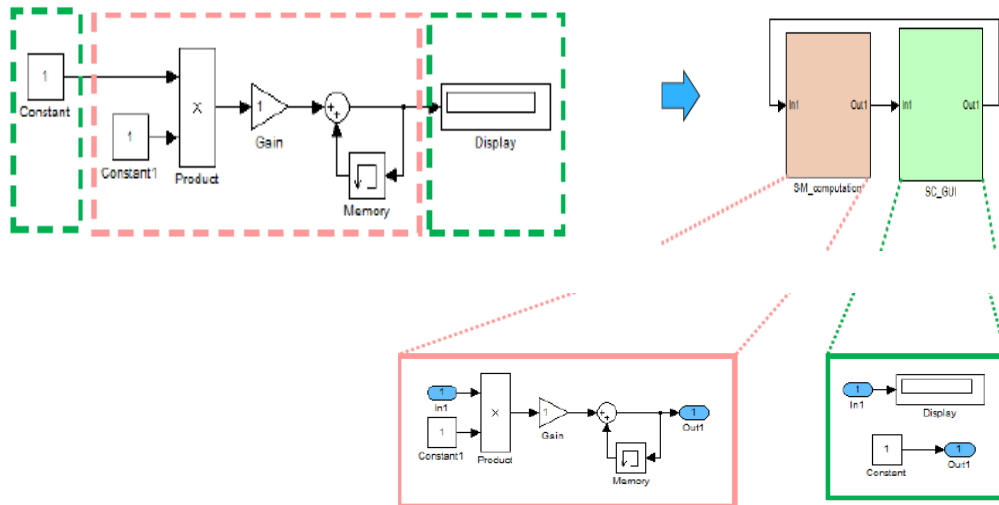


Figure II.6: Contenu de chaque sous système [5].

II .2.1 Distinction des sous-systèmes temps réel et des sous-systèmes graphiques (CPU),

Tel que [5]:

- Le sous-système de calcul sera exécuté en temps réel (ou mode de simulation accélérée) sur un cœur de processeur de la cible en temps réel (one CPU core of the real-time target)
- Le sous-système graphique sera affiché sur le PC.
- Les données entre le sous-système de calcul et l'interface graphique
- Les données entre le sous-système de calcul et le sous-système interface graphique est échangé de manière asynchrone via le lien TCP / IP (**Figure II.7**).

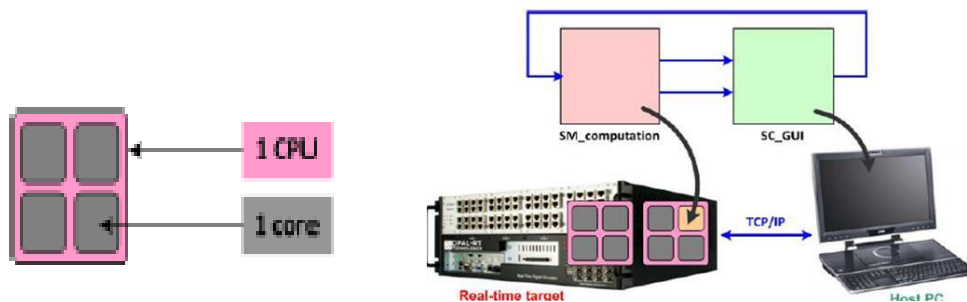


Figure II.7: Échange entre modèle (PC) et simulateur RT-LAB [5].

II.2.2 Attribution des sous-systèmes temps réel à différents cœurs de processeur

- Les blocs de calcul peuvent être divisés en différents sous-systèmes de calcul
- Chacun des sous-systèmes de calcul sera exécuté sur un cœur de la cible en temps réel
- Les données entre 2 sous-systèmes de calcul sont échangées de manière synchrone à travers une mémoire partagée (**Figure II.8**) [5].

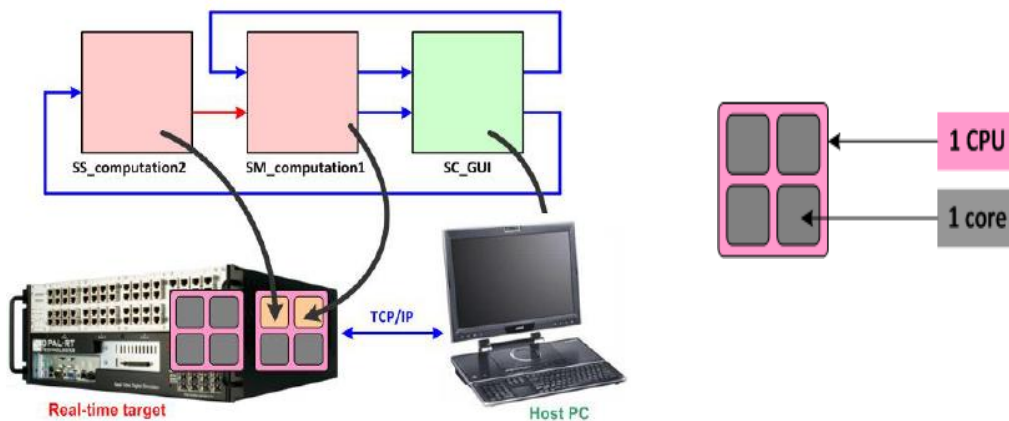


Figure II.8: Traitement des sous systèmes du modèle par le simulateur RT-LAB [5].

II.2.3 Nommer les sous-systèmes

II.2.3.1 Sous-système graphique : SC_n'importe quel nom : « SC_anyname »

Ce sous système :

- Contient des blocs d'interface utilisateur (captures, scopes, affichages, commutateurs manuels, constantes)
- Fonctionne sur l'ordinateur serveur de manière asynchrone à partir des sous-systèmes de calcul.
- non lié à un cœur de processeur cible (CPU core)
- Pas de génération de signal / Pas d'opération mathématique / Pas de modèle physique!

II.2.3.2 Sous-systèmes de calcul

Contient tous les éléments de calcul du modèle, opérations mathématiques, blocs d'E / S, générateurs de signaux, modèles physiques, etc.

- Si un seul (sous-système de calcul principal): **SM_anyName** : Utilise un cœur de processeur

- ✚ Chaque sous-système de calcul supplémentaire: **SS_anyName**: «Chaque sous-système supplémentaire ‘SS’ utilise un cœur de processeur supplémentaire.»

II.3 L’ajout de blocs OpComm

La seconde étape de la réalisation de modèles pouvant être simulés sous RT-LAB consiste à ajouter le bloc de communication « OpComm », (**Figure II.9**), Ce bloc permet d'activer et de sauvegarder l'information de la communication entre la station de commande et les nœuds de calcul ainsi qu'entre les différents nœuds de calcul d'une simulation distribuée.

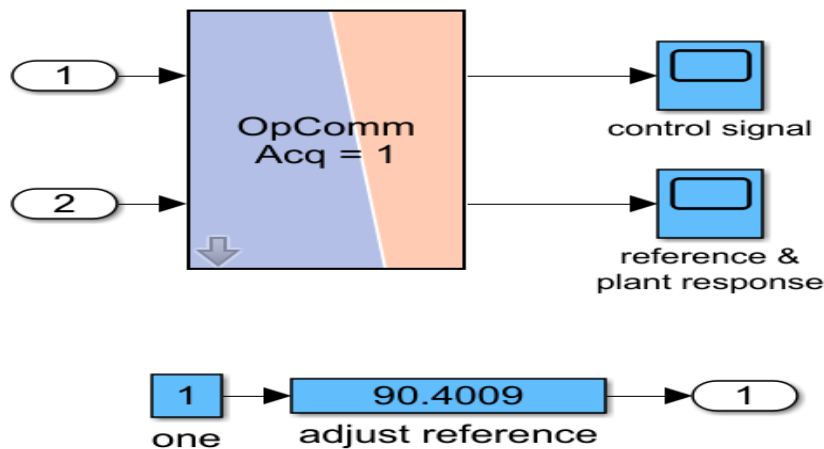


Figure II.9: Bloc de communication « OpComm » [5].

Toutes les entrées de chaque sous-système défini doivent passer par ces blocs. Ils permettent la communication entre les cœurs de calcul. Pour chaque sous-système, un bloc «opcomm» doit être placé pour faire transiter les signaux de type synchrone et un autre pour les signaux asynchrones. La **Figure II.10**: illustre le principe.

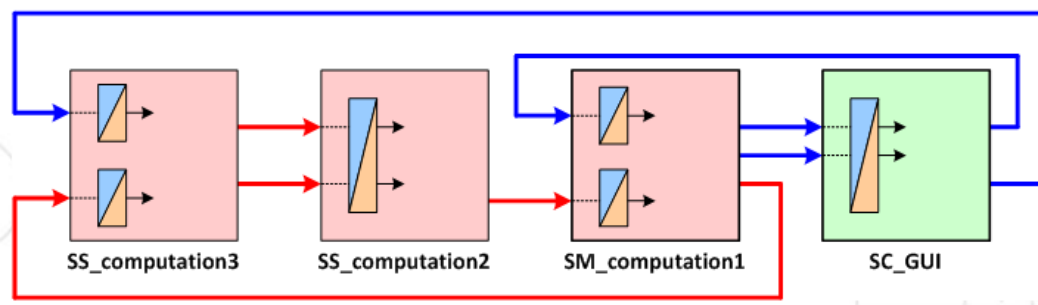


Figure II.10: Séparation du diagramme Simulink en sous-systèmes et placement des blocs opcomm (rouge=synchrone, bleu=asynchrone) [5].

Afin que le modèle sera chargé et traité sur la plateforme RT-LAB il est indispensable d'insérer ou ajouter un bloc responsable de la communication à partir de la bibliothèque RT-LAB qui sera disponible dans le navigateur de la bibliothèque Simulink®, une fois RT-LAB installé.

Le bloc «opcomm» est placé entre 2 sous-systèmes de calcul, ou bien entre sous-systèmes de calcul et sous-système d'interface graphique, (**Figure II.11**).

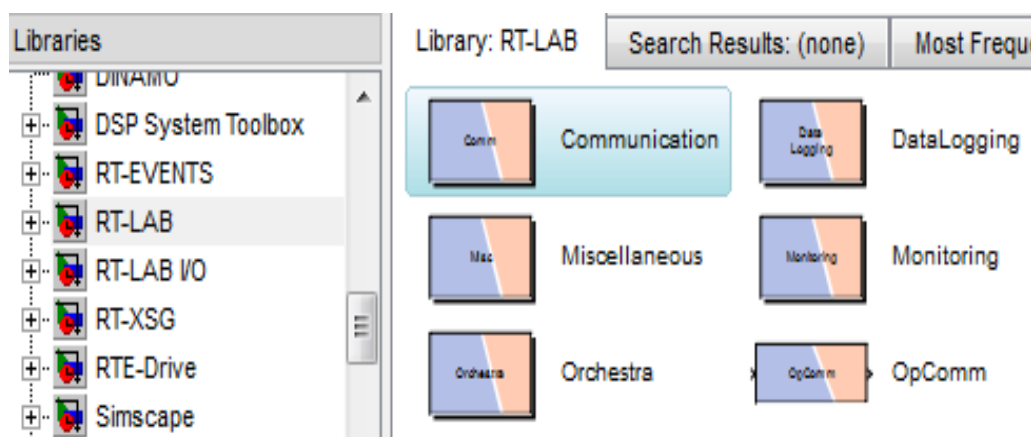


Figure II.11: Fenêtre de la bibliothèque RT-LAB sous Matlab/Simulink [5].

Toutes les entrées de sous-systèmes (SM, SS, SC) doivent d'abord passer par un bloc OpComm avant toute opération sur les signaux auxquels elles sont associées (**Figure II.12**).

Le bloc OpComm doit être inséré après la création et le changement de nom des sous-systèmes (SM, SS, SC).

Un bloc OpComm peut accepter plusieurs entrées dans un sous-système. Double-clique sur le bloc pour sélectionner le nombre d'entrées requises.

Chaque signal d'entrée peut être un scalaire ou un vecteur.

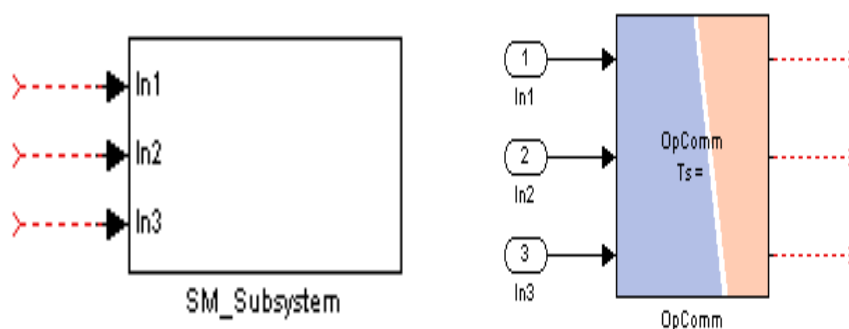


Figure II.12: Présentation d'un Bloc OpComm [5].

II.3.1 Dans les sous-systèmes de calcul (SM ou SS)

- Un OpComm reçoit des signaux synchronisés en temps réel d'autres sous-systèmes temps réel.
- Un OpComm reçoit des signaux asynchrones du sous-système graphique

II.3.2 Dans le sous-système de console (SC)

- Un OpComm suffit dans la plupart des cas
- Plus de blocs OpComm (jusqu'à 25) peuvent être insérés pour recevoir les signaux du système temps réel (sous-système). Plusieurs blocs OpComm définissent des «groupes d'acquisition» uniques avec leurs propres données paramètres d'acquisition (décimation, taille...), (**Figure II.13**).

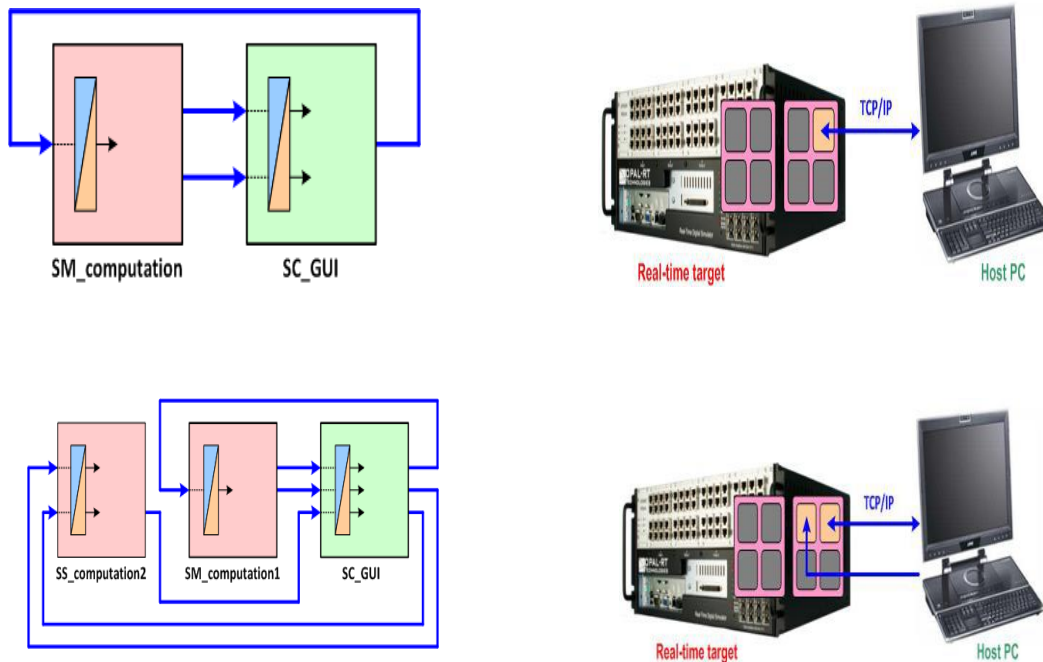


Figure II.13: Traitement des blocs OpComm par le simulateur RT-LAB [5].

II.4 Présentation de l'interface graphique du logiciel RT-LAB

En première phase, après lancement du logiciel RT-LAB, (**Figure II.14**) on doit créer un nouveau projet :

- ✚ De l'icône,
- ✚ Dans le menu: Fichier> Nouveau> Projet RT-LAB,
- ✚ Depuis la vue Explorateur de projet.

On donne un nom de projet, puis on Clique sur “Suivant” pour ajouter un exemple de modèle à RT-LAB projet. On Clique sur "Terminer" pour créer un projet vide et ajouter manuellement un modèle (**Figure II.15**) [5].

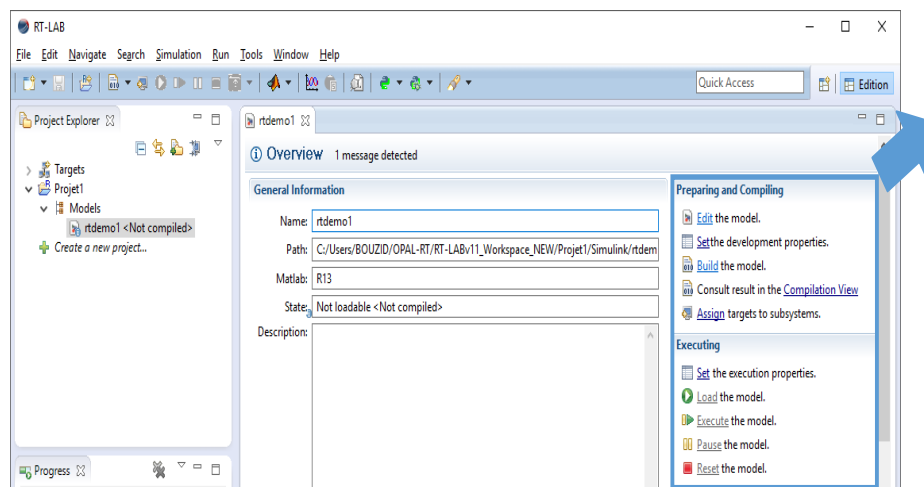


Figure II.14: Fenêtre principale après lancement du logiciel RT-LAB [5].

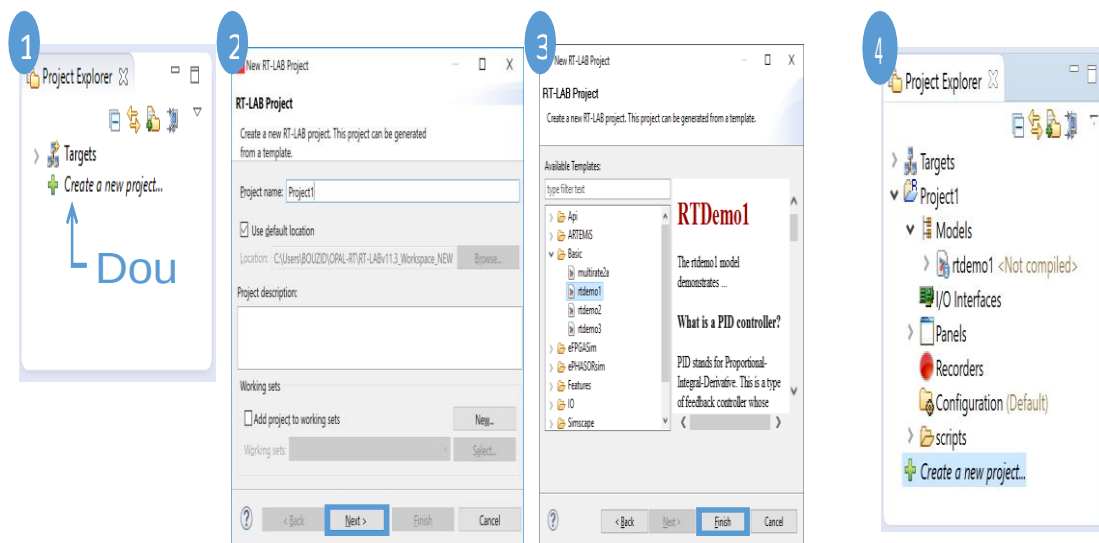


Figure II.15: Fenêtres de création d'un projet sous RT-LAB [5].

Le menu nous permet aussi d'ajouter un exemple de modèle existant dans le projet
Comme exemple C:\OPAL-RT\RT-LABx.x.x\Exemples (**Figure II.16**) [5].

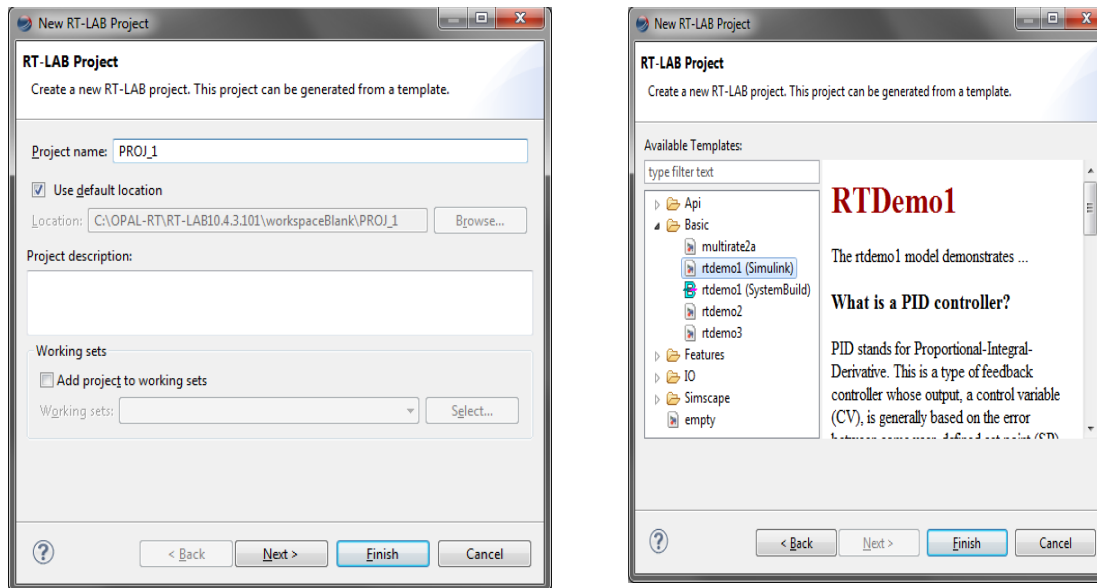


Figure II.16: Fenêtres de l'ajout d'un modèle au projet sous RT-LAB. [5]

On peut aussi ajouter au projet un nouveau modèle vierge ou sous-système par :
Fichier> Nouveau> Modèle RT-LAB (**Figure II.17**) [5].

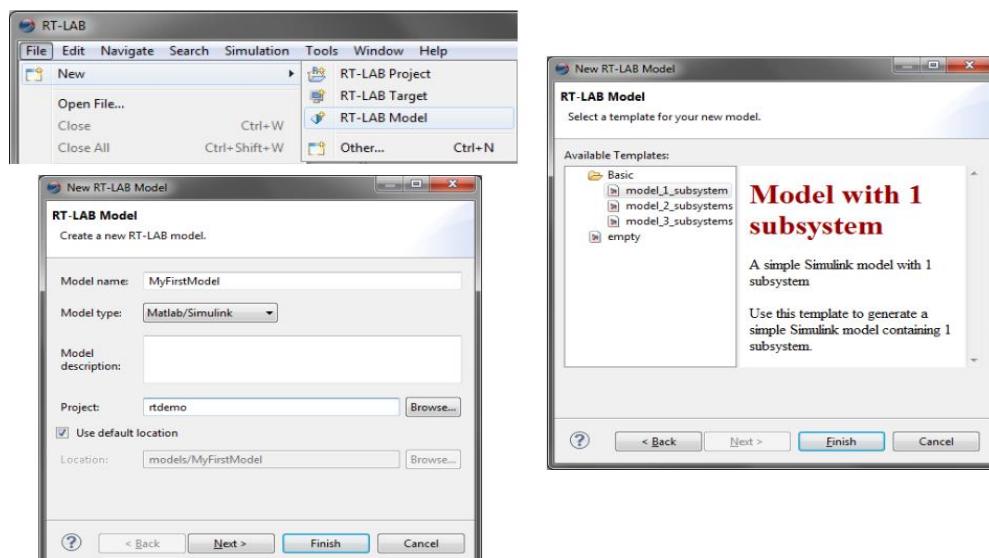


Figure II.17: Fenêtres de création d'un modèle vierge au projet sous RT-LAB [5].

Comme il est possible d'ajouter un modèle d'utilisateur existant au projet:

Ajouter : « Add » pour modifier le modèle d'origine

On peut aussi utiliser Importer : « Import » : pour copier le modèle dans l'espace de travail (**Figure II.18**) [5].

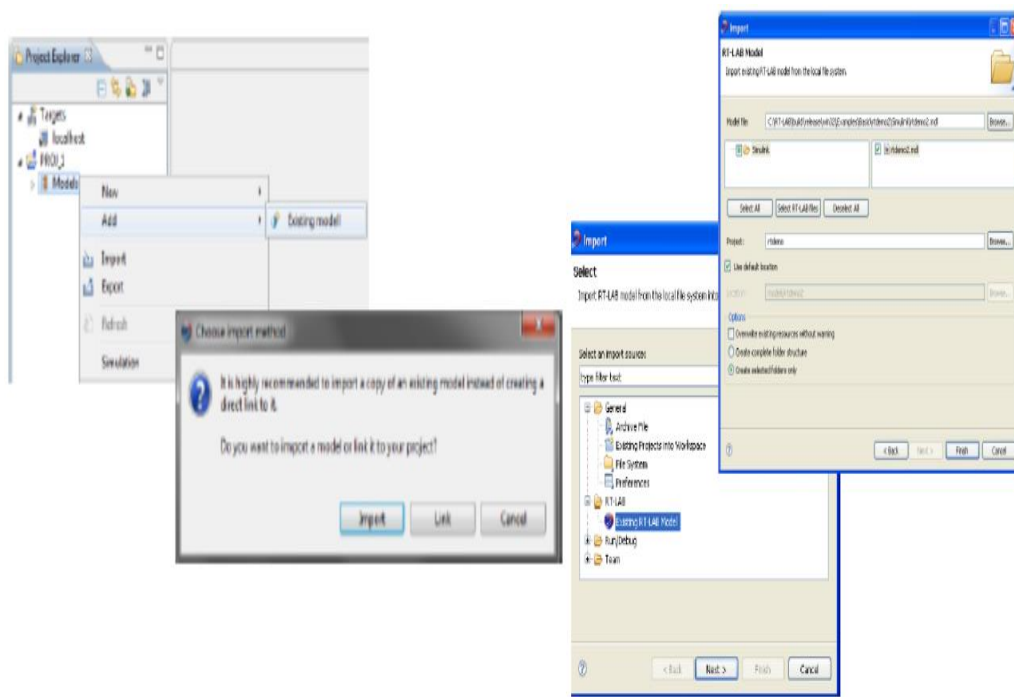


Figure II.18: Fenêtres pour « Add » ou « Import » des modèles existants [5].

Une fois le projet créé, le modèle additionné ou bien ajouté, on ouvre par défaut le modèle avec la version spécifiée de MATLAB / Simulink. Utilisant : « Edit », (**Figure II.19**).

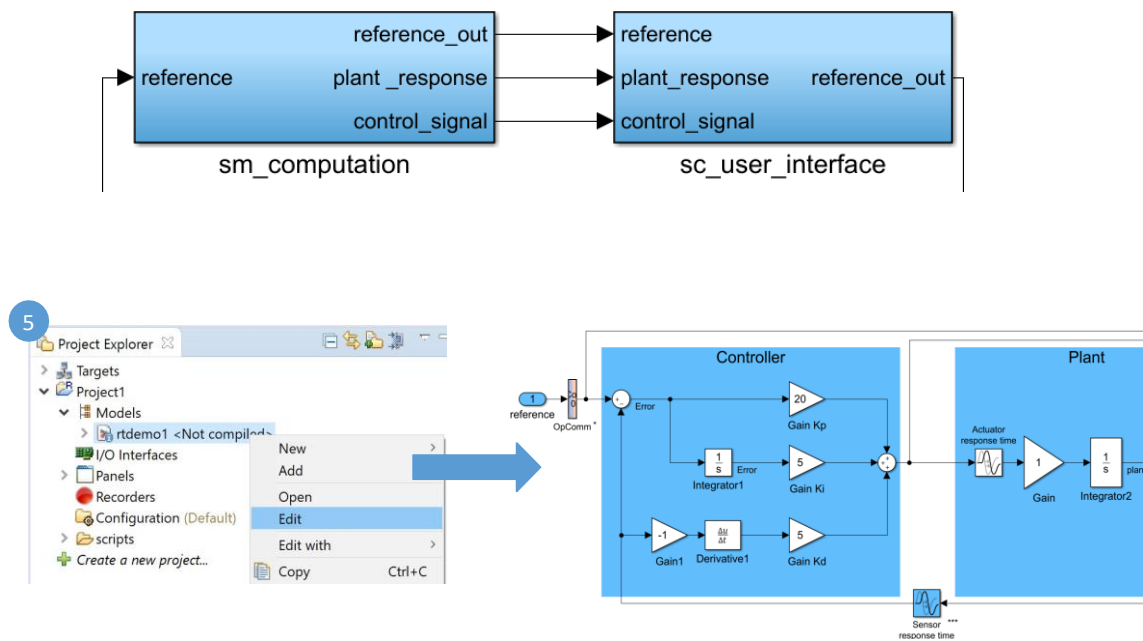


Figure II.19: Fenêtres de sélection de la version Matlab/simulink pour «Editer »le modèle [5].

Jusqu'ici le simulateur (Hard) n'est pas opérationnel, on doit établir la liaison entre le PC et le simulateur par le menu ajout de cible « Add a target » soit :

- ✚ Manuellement, en utilisant l'adresse IP
- ✚ Utilisation des cibles de découverte (recherche automatique des cibles accessibles).

« Discover target» (**Figure II.20**).

Sachant qu'on a déjà configuré les données réseau des adresses IP du simulateur.

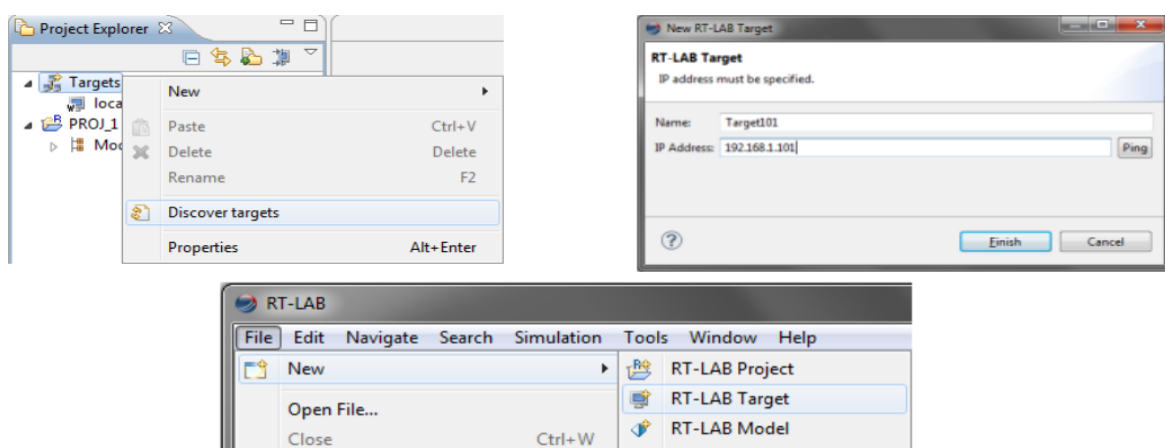


Figure II.20: Fenêtres d'addition de la cible « target » PC-Simulateur [5].

II.5 Construction du modèle et lancement de simulation sous RT-LAB

II.5.1 Construction du modèle sous RT-LAB : « Build »

- Sélection du menu « Build » (**Figure II.21**) on :
 - ✚ Sélectionne la plateforme de développement: Versions de logiciels et Plateformes
 - ✚ Sépare le Modèle : Un fichier .mdl par sous-système de niveau supérieur (SM, SC et SS)
 - ✚ Génère du code C
 - ✚ Transférer le code C généré
 - ✚ Construire le code C généré: Le compilateur cible construit et lie les fichiers à générer un exécutable en temps réel.
 - ✚ Transférer le modèle construit: Les exécutables sont retransférés sur l'ordinateur.

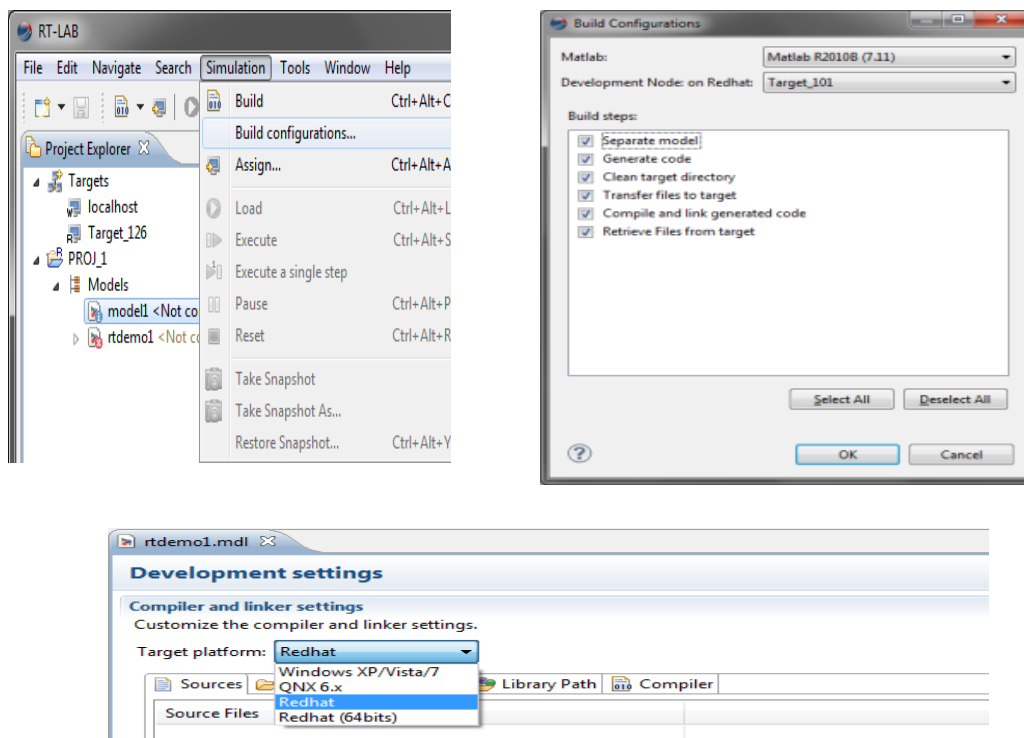


Figure II.21: Fenêtres de construction de modèle sous RT-LAB « BUILD» [5].

II.5.2 Exécuter le modèle

- À cette phase on doit sélectionner le mode de simulation soit :
 - ✚ Simulation.
 - ✚ Logiciel synchronisé (Software synchronized).
 - ✚ Matériel synchronisé (Hardware synchronized).

Ensuite on Lance le menu « Load » pour charger le modèle, puis « Execute or Run » pour exécuter le modèle (**Figure II.22**) [5].

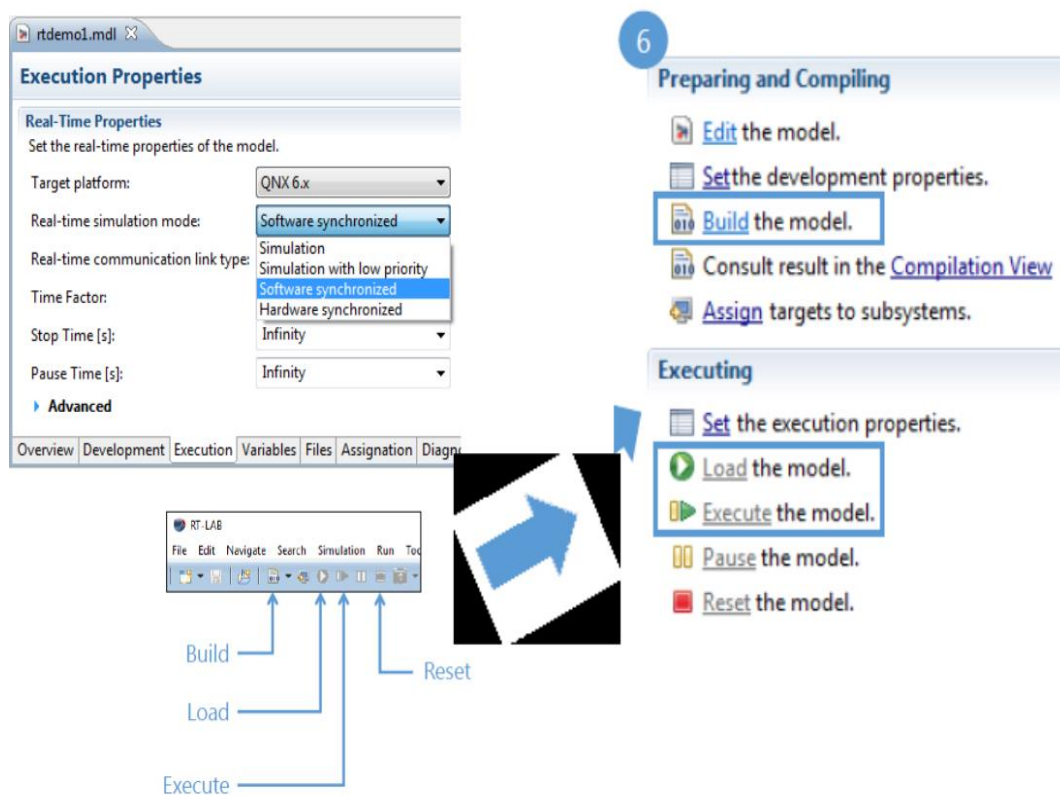


Figure II.22 : Exécution du modèle et console générée par RT-LAB sous Matlab/Simulink [5].

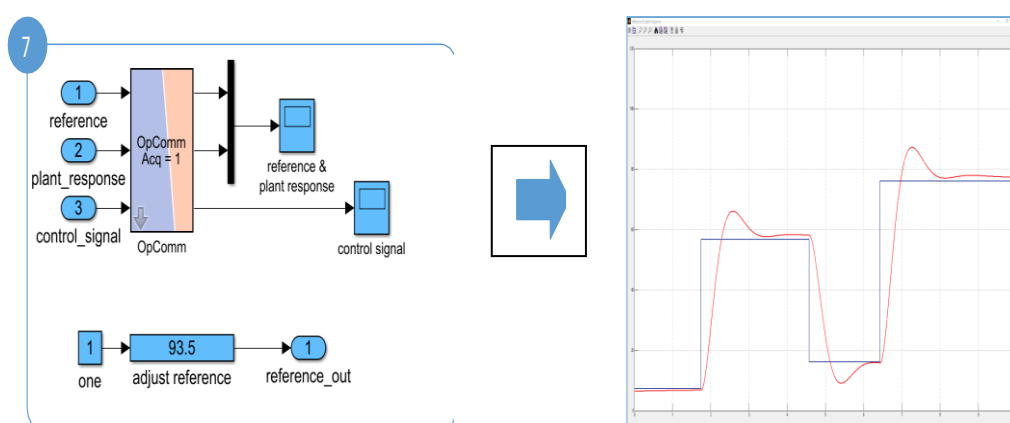


Figure II.23: La fenêtre de console des résultats générée sous Matlab/Simulink [5].

Pour finir la simulation en temps réel afin d'enregistrer des résultats (**figure II.23**) ou Réinitialiser le modèle ou libérer le simulateur, on doit lancer « Reset » (**Figure II.24**) [5].

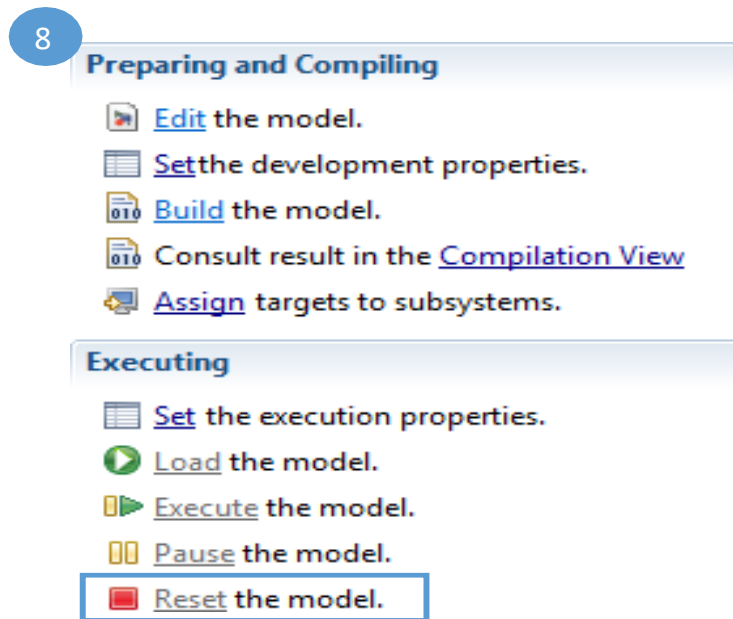


Figure II.24: La fenêtre de arrêter la simulation [5].

II.5.3 Enregistrement de données

RT-LAB permet l'acquisition directe au fichier au lieu de parcourir le réseau vers la console.

Cependant le mécanisme sous-jacent est le même. Il y a deux façons de le faire [5] :

- ✚ Rediriger les groupes d'acquisition de console vers un fichier:

un fichier (myfile.mat) sera créé sur chaque nœud de calcul. Ce fichier enregistrera tous les signaux envoyés au groupe d'acquisition sélectionné à partir du sous-système attribué à ce nœud.

- ✚ Définissez des groupes d'acquisition dédiés qui ne s'écrivent que dans un fichier « write to file ».

Afin d'enregistrer les résultats de simulation il y'a deux astuces offerte par RT-LAB soit par le bloc «OpWriteFile» qui nous permet d'enregistrer les résultats graphiques sous matlab en exécutant un fichier (.mat) créer par « OpWriteFile » dans la même cible du modèle. Soit par l'application « ScopeView » installé qui présente une interface graphique associée à RT-L AB.

II.5.3.1 Enregistrement avec «OpWriteFile »

Le bloc OpWriteFile de la bibliothèque de blocs RT-LAB de Simulink permet d'enregistrer des signaux dans un fichier. Il contient les mêmes paramètres d'acquisition discutés précédemment. Vous pouvez enregistrer plusieurs signaux dans un fichier .mat en utilisant un bloc «Mux» pour créer un vecteur (**Figure II.25**).

On peut avoir jusqu'à cinq blocs « OpWriteFile » dans un modèle. Chaque bloc a un unique nom de fichier entièrement défini par l'utilisateur.

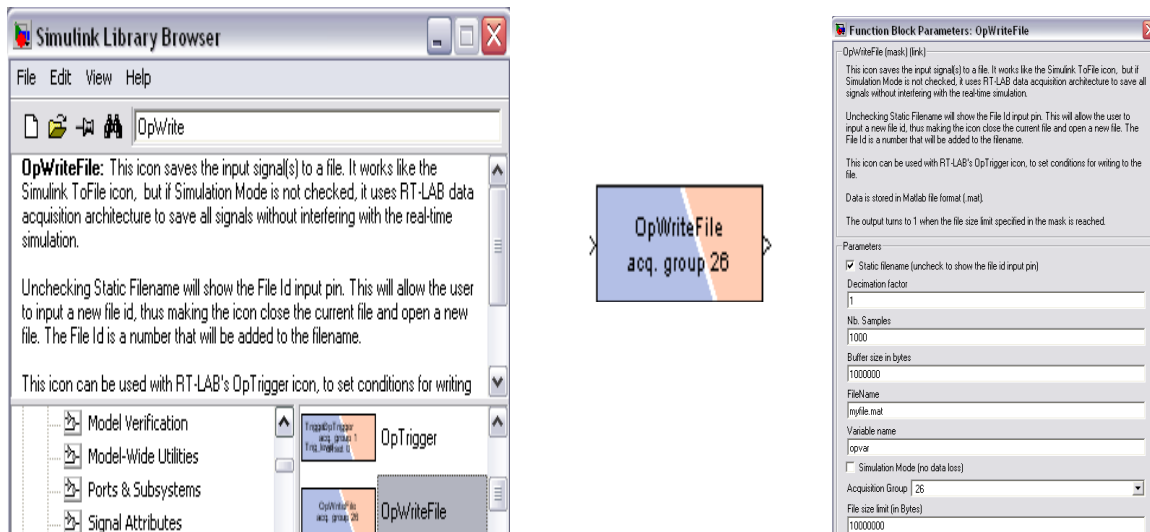


Figure II.25: Insertion et paramétrage du bloc « OpWriteFile » [5].

La structure de données est exactement la même: la première rangée pour le temps, autres lignes pour les signaux, même ordre d'entrée des signaux dans le bloc (**Figure II.26**).

Ce bloc est également capable d'enregistrer des données hors ligne en cochant l'option "Ecrire dans Mode Simulink : Write to Simulink mode" :

- ✚ Peut enregistrer n'importe quel signal dans le modèle.
- ✚ Peut être exécuté même si `sc_console` est fermé.
- ✚ Ne bloque pas l'acquisition des paquets TCP / IP.
- ✚ Besoin de compilation.
- ✚ Limité à cinq groupes d'acquisition (pas de limitation du fichier .mat cependant).

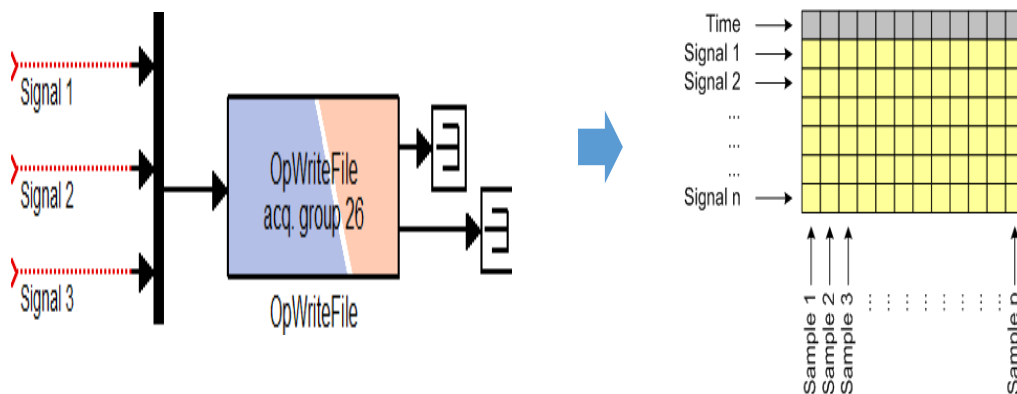


Figure II.26 : Principe d'enregistrement de données avec « OpWriteFile » [5].

II.5.3.2 Enregistrement avec « Scope+View »

Le logiciel ScopeView est utilisé pour afficher les signaux et les formes d'onde acquis à partir de divers systèmes d'acquisition de données et pour effectuer des calculs mathématiques et le traitement du signal. Scope View est étroitement intégré à RT-LAB et permet la visualisation des signaux acquis à partir de la simulation en temps réel et sert également d'oscilloscope analogique et numérique. Scope View peut acquérir et importer des signaux et des données à partir de nombreuses sources. Il prend en charge la source de données RT-LAB et d'autres types de sources de données tels que HYPERSIM, EMTP-RV, MATLAB et COMTRADE. Il permet également de gérer plusieurs sources de données en même temps. Une fois les données acquises et / ou importées, Scope View permet d'exécuter de nombreux types de traitements graphiques, tels que zoom, superposition, curseur de suivi, déplacement de graphe. Il offre également un riche ensemble de fonctions mathématiques pour calculer de nouvelles formes d'onde et générer des analyses complexes. Le rapport peut ensuite être produit et exporté vers divers formats de fichiers tels que PDF, MATLAB ou Post-Script [5].

➤ Ouverture de Scope View

Pour ouvrir Scope View, cliquez sur l'icône Scope View dans la barre d'outils principale de RT-LAB. Cette icône est représentée par un plan cartésien avec des signaux rouges et bleus.

Scope View apparaîtra après l'affichage de l'écran de démarrage. Au démarrage, Scope View ouvre la fenêtre principale de Scope View et le formulaire Signaux. Le formulaire Signaux permet de choisir une source de signal (**Figure 27**) [5].

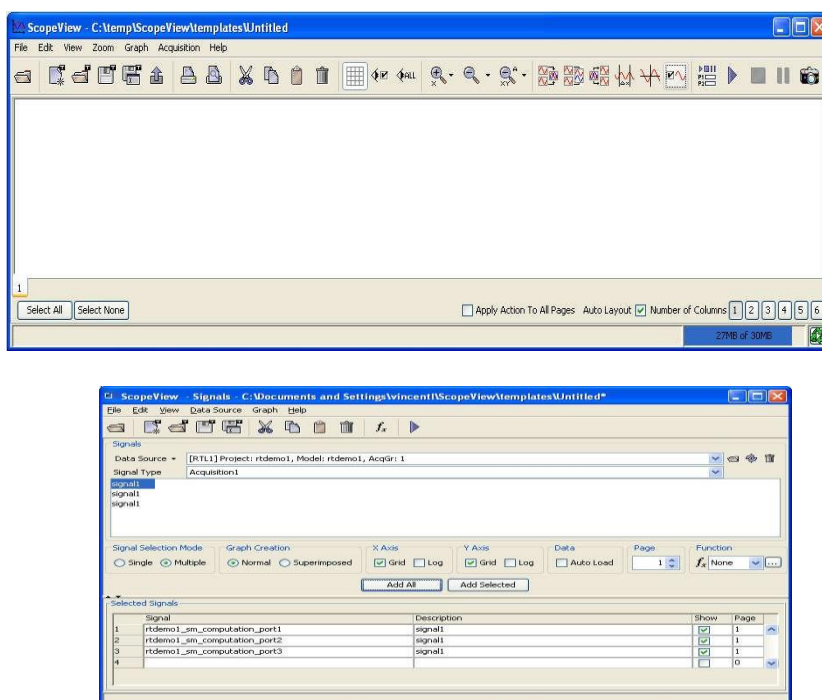


Figure II.27: Fenêtre ScopeView et formulaire Signal [5].

II.6 Bloc OpTrigger

Le bloc OpTrigger (**Figure II.28**), permet à un utilisateur de déclencher un groupe d'acquisition sur un signal spécifique. Il permet aussi de contrôler la condition de démarrage du système d'acquisition pendant la simulation. Les données ne seront acquises que lorsqu'un signal spécifique est déclenché.

L'option de démarrer l'acquisition de données uniquement une fois qu'un seuil spécifié est atteint permet aux utilisateurs d'obtenir des informations sur une tranche de temps spécifiée de la simulation. Une fois lancée, l'acquisition / enregistrement des données se poursuit jusqu'à ce qu'elle atteigne la taille définie dans le nombre d'échantillons par champ de signal sur le ou sur le masque de bloc OpWriteFile. Après cela, l'acquisition peut être relancée si la condition est toujours vraie.

Lorsqu'il est utilisé avec un OpWriteFile (même numéro de groupe d'acquisition défini), si le bloc est déclenché après que le fichier est plein (la taille limite du fichier est atteinte), le fichier .mat n'est pas écrasé, les données collectées lors du ou des déclencheurs initiaux est gardé.

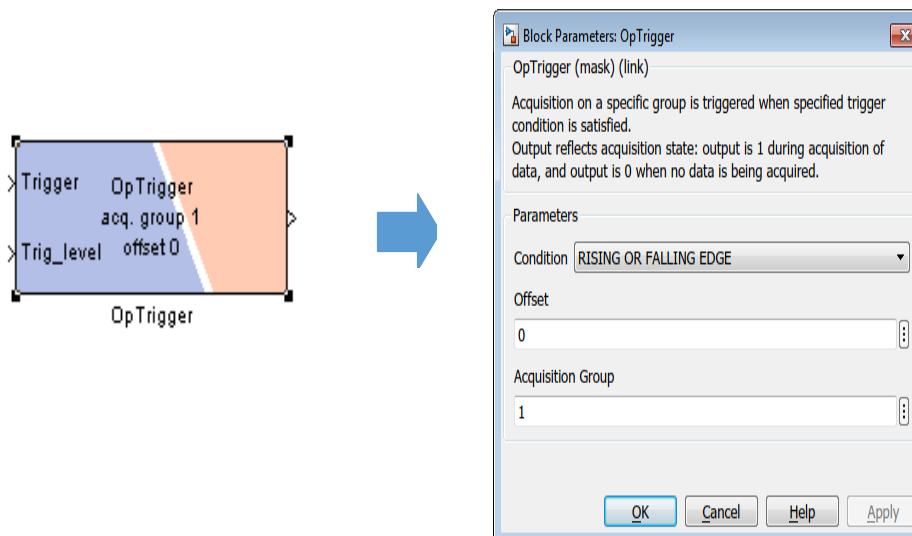


Figure II.28: OpTrigger block [5].

II.7 ARTEMIS

ARTEMIS «Advanced Real Time Electro Mechanical Simulator» est un outil qui s'intègre au blocks et Sim Power Systems de Simulink. Il fournit des algorithmes améliorés permettant la simulation en temps réel des systèmes utilisant les blocs de Sim Power Systems. À l'inverse de Sim Power Systems, ARTEMIS est conçu pour prendre en charge l'implémentation temps réel de

simulations de systèmes électriques généraux contenant des redresseurs et des onduleurs, ce qui améliore considérablement la vitesse de simulation tout en préservant la précision.

Il s'agit de l'unique façon d'obtenir des performances temps réel strictes de haute précision avec les modèles de Sim Power Systems. L'utilisation d'ARTEMIS est simple, il s'agit simplement d'ajouter le «ARTEMIS block» dans tout modèle Simulink contenant des blocs de Sim Power Systems et lors de son exécution, le modèle s'exécutera, par défaut, avec les algorithmes améliorés d'ARTEMIS [6].

L'implémentation des solveurs uniques et des techniques d'interpolation pour améliorer la précision, Optimise le temps de calcul sur les modèles SPS, et fournit des outils spéciaux pour découpler les circuits complexes, et fait adapter quelques blocs SPS pour la simulation RT-LAB.

ARTEMiS utilise l'approche modèle d'état pour résoudre également les systèmes électriques (**Figure II.29**).

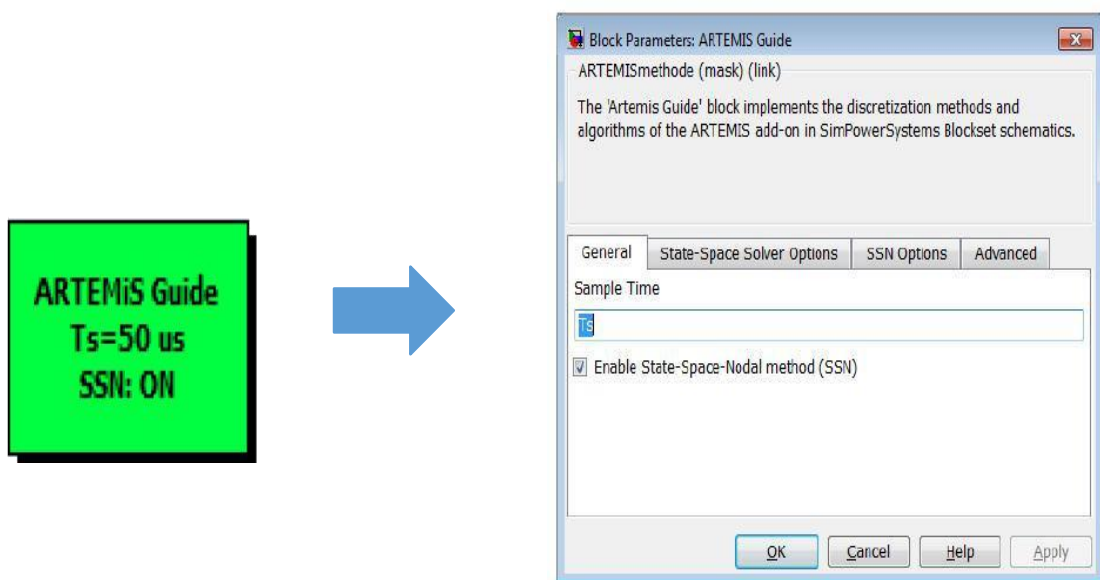


Figure II.29: Bloc de contrôle ARTEMIS Guide [6].

II.7.1 Les avantages d'ARTEMIS [7]

✚ Conçu pour la simulation rapide et avec matériel dans la boucle (HIL)

Algorithmes à pas fixes conçus pour les applications temps réel.

Compatibilité avec le générateur de code Real-Time Workshop (RTW).

Compatibilité avec RT-LAB pour la simulation temps réel distribuée sur un grappe de PC.

Une plus grande précision pour les circuits linéaires ayant des composantes haute fréquence

Améliore la précision des simulations.

Élimine les erreurs de déphasages.

Une meilleure précision avec les éléments non linéaires

Améliore la précision des simulations de systèmes ayant des éléments non linéaires

Aucune oscillation numérique

Utilise des méthodes d'intégration stables et qui sont exemptes d'oscillations numériques

Offre la précision des simulations à pas variables et la performance des simulations à pas fixes

Une des contraintes principales de la simulation temps réel est que les modèles doivent utiliser un algorithme de résolution à pas fixes. Pour les systèmes rigides comme les circuits électriques, l'approche traditionnelle est d'utiliser des solveurs à pas variables pour les composantes à haute fréquence du système. Comme le temps de calcul de chaque pas est non déterministe, il est nécessaire de remplacer ces algorithmes par des méthodes à pas fixes, ce qui introduit des erreurs dans la solution.

ARTEMIS propose des algorithmes à pas fixes novateurs et des méthodes de calcul efficaces qui améliorent grandement la performance de calcul de Sim Power Systems, ce qui permet de développer des simulations temps réel avec des modèles de systèmes électriques.

Grâce aux algorithmes à pas fixes déterministes, il est possible de créer des simulations temps réel précises et robustes de systèmes électriques avec de meilleures performances qu'avec Sim Power Systems utilisé seul. En fait, il a été démontré que les simulations peuvent être jusqu'à 15 fois plus rapides que celles utilisant les méthodes à pas fixes et ce, sans les erreurs qui leur sont associées.

Des méthodes optimisées pour la simulation temps réel de circuits électriques

ARTEMIS inclut aussi des algorithmes spécialisés pour les circuits électriques, qui règlent les problèmes rencontrés lors de la conversion de modèles Sim Power Systems au temps réel. Par exemple, pour les circuits comportant des commutateurs, ARTEMIS calcule les matrices de topologie du circuit avant la simulation, et utilise des méthodes de découplage de circuits pour réduire la taille de ces matrices et permettre à la simulation de s'exécuter en temps réel, sans encombre, même lorsqu'un commutateur change d'état. De plus, certaines stratégies ont été pensées pour éviter les boucles algébriques et le calcul d'itérations non-déterministes. Ces méthodes permettent le calcul à pas fixes et des simulations temps réel sans interruption.

Utiliser ARTEMIS

Stabilité ARTEMIS: solveur ARTEMIS ont une immunité intrinsèque aux oscillations numériques produites par l'ouverture du circuit inductif par exemple.

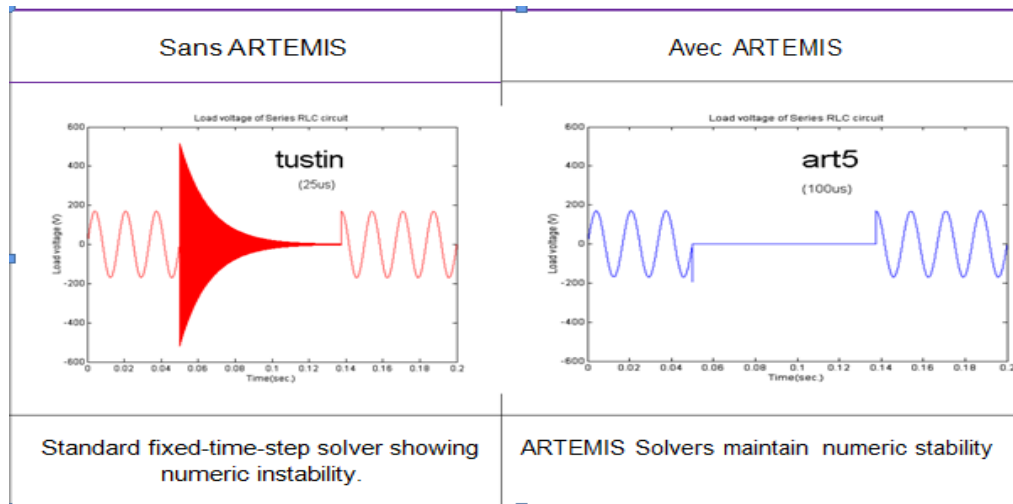


Figure II.30: Effet de l'utilisation de ARTEMIS [7].

II.8 Ajout des blocs d'entrées-sorties

Un ordinateur avec Windows est nécessaire pour utiliser RT-LAB, qui sert de station de base pour le simulateur. Une communication réseau entre l'ordinateur et le simulateur doit être établie. Depuis la station de base, il est possible d'interagir avec le modèle s'exécutant en temps réel. Voici quelques exemples :

- ✚ Modifier l'état d'exécution du programme (arrêt, pause, marche, etc.);
- ✚ Visualiser les différents signaux du modèle;
- ✚ Modifier des paramètres du modèle.

Toujours à partir du modèle Simulink, RT-LAB offre des blocs Simulink qui permettent d'interagir avec des signaux physiques réels. Ces blocs agissent comme une interface avec les cartes d'entrées-sorties du simulateur temps réel.

Les entrées-sorties du simulateur sont gérées par l'intermédiaire d'un FPGA, celui-ci doit être programmé par un fichier bitstream qui fait la liaison entre les ports d'entrées-sorties physiques et le bus PC vers le processeur principal. Le fichier bitstream à utiliser dépend du modèle du simulateur utilisé. C'est un fichier (.bin), inclus avec l'installation de RT-LAB. De

plus, un autre fichier du même nom (mais de type.conf) renseigne sur la configuration des canaux d'entrées-sorties réalisée par le bitstream. On peut l'ouvrir avec un éditeur de texte conventionnel.

Ce fichier est important car il est analysé systématiquement par les blocs Simulink d'entrées-sorties.

II.9 Implantation logicielle

L'exemple de la **Figure II.31** montre la façon générale dont le jumeau numérique est implanté avec RT-LAB/Simulink pour une exécution temps réel. Le diagramme est séparé en 3 sous-systèmes: 2 sous-systèmes de calcul et un sous-système pour l'échange de signaux avec la station de base [8].

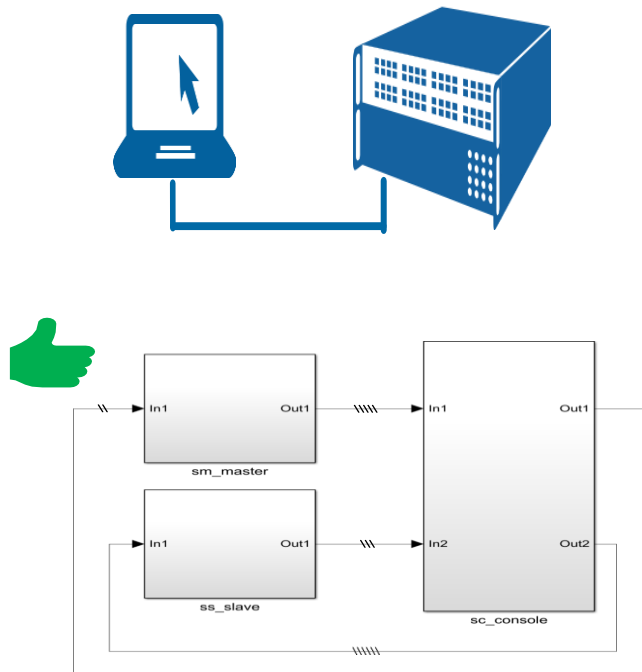


Figure II.31 : Vue d'ensemble de l'implantation sur RT-LAB/Simulink [8].

Le sous-système de calcul principal (SM_ SimulManager) a plusieurs fonctions :

- ✚ Acquisition des mesures provenant des capteurs ;
- ✚ Traitement des mesures en vue d'être envoyées vers le modèle CF_CC;
- ✚ Écriture des signaux sélectionnés vers un fichier de sortie;
- ✚ Affichage des signaux sélectionnés sur les sorties analogiques.

II.10 Aperçu de la surveillance (Monitoring)

Le Monitoring (**Figure II.32**) est un profileur qui est étroitement intégré à RT-LAB et s'exécute dans votre simulation sur les ordinateurs cibles. Il permet de profiler les simulations pour les performances, l'utilisation du processeur, les dépassements et les problèmes de synchronisation. La surveillance fournit un ensemble complet de fonctionnalités et fournit une interface utilisateur intuitive pour analyser le comportement de la simulation [5].

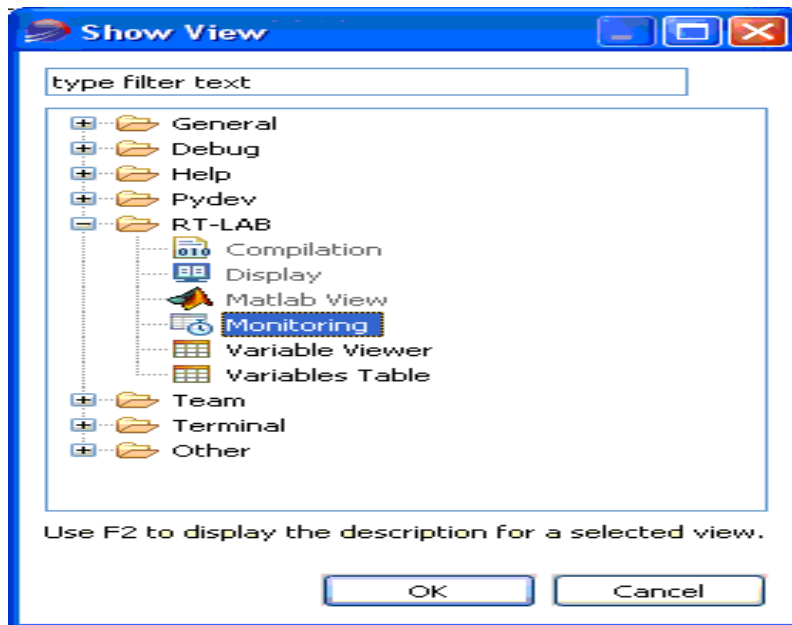


Figure II.32: Utilisation de la vue de surveillance [5].

II.10.1 Mesure du temps de calcul du sous-système modèle

La surveillance RT-LAB fournit des informations sur la surcharge RT-LAB et le temps de calcul de l'ensemble du modèle. Parfois, seule une partie du modèle Simulink doit être surveillée.

Dans ce cas, des sondes utilisateur peuvent être ajoutées au diagramme du modèle à l'aide des blocs OpMonitoringStart et OpMonitoringStop. Ces blocs vous permettent de mesurer le temps passé par un sous-système sur le modèle qui est connecté à ces blocs.

II.10.2 Mesure du temps de calcul de la source du code utilisateur

Le code utilisateur C peut être ajouté au modèle Simulink à l'aide des fonctions S ou UCB. Ce code utilisateur fait partie de l'événement de temps de calcul majeur et mineur. Parfois, certaines parties du code utilisateur doivent être surveillées. Ceci peut être réalisé en utilisant les fonctions API de surveillance fournies par RT-LAB [5].

- OpalMonitoring_Register: enregistre un nouveau nom et type d'événement.
- OpalMonitoring_LogStart: démarre la journalisation de la synchronisation de l'événement spécifié.

II.10.3 Utilisation du bloc OpMonitor

Le bloc OpMonitor (**Figure II.33**) fournit des informations de surveillance sur le sous-système dans lequel il est inséré. Il fournit des informations sur le sous-système dans lequel il est inséré. Ce bloc est destiné à être utilisé uniquement dans un modèle RT-LAB et renverra les valeurs par défaut lorsqu'il est utilisé sans RT-LAB. Les sorties de signal apparaissent dans le même ordre que les paramètres correspondants sélectionnés dans le masque de bloc. Les informations ne concernent que le sous-système dans lequel ce bloc est inséré. Les valeurs de temps sont données en microsecondes. Ce bloc remplace le bloc obsolète OpSimulationInfo. Ce bloc est obsolète. Remplacez-le par le bloc OpMonitor.

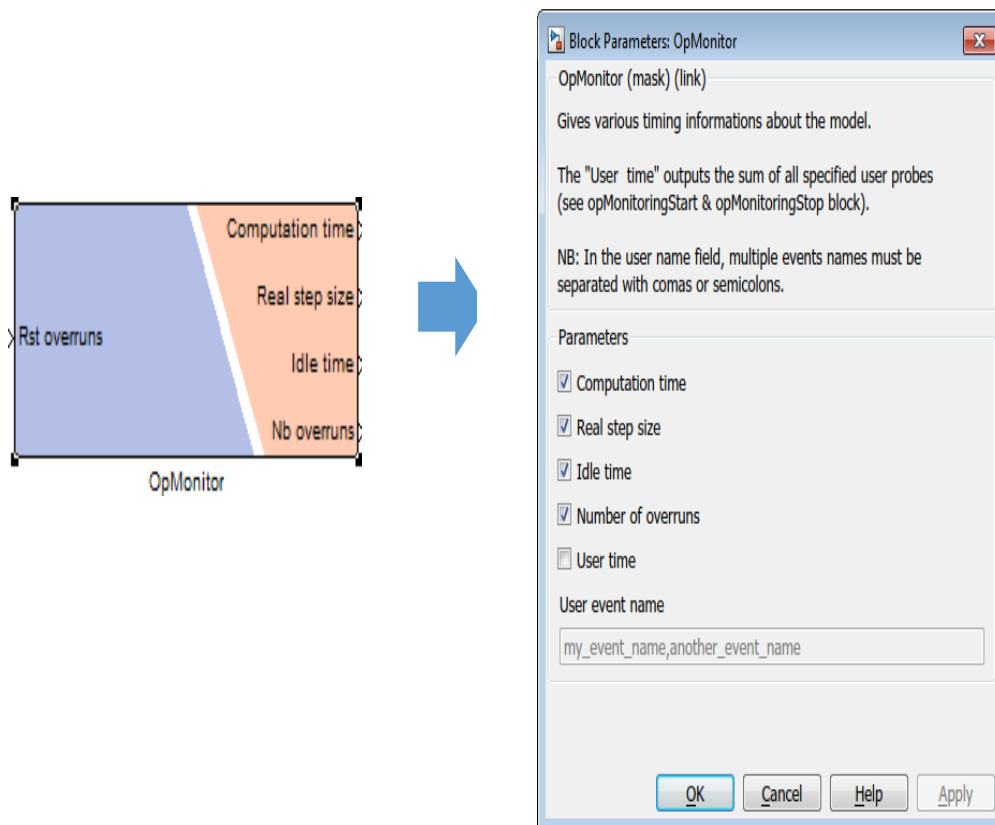


Figure II.33: Bloc OpMonitor [5].

II.11 Processus asynchrones RT-LAB

Conformément au principe de conception d'ouverture, les fonctionnalités de RT-LAB peuvent être étendues grâce à l'utilisation d'applications utilisateur asynchrones également appelées processus asynchrones. Cela donne aux utilisateurs de RT-LAB l'accès à toute la puissance du système d'exploitation et leur permet d'implémenter leurs propres interfaces avec divers périphériques externes. Bien qu'elles soient généralement destinées à être utilisées avec des appareils de communication tels que des récepteurs GPS et des moniteurs d'alimentation, les applications utilisateur asynchrones peuvent être développées pour interfacer les cartes d'acquisition ou mettre en œuvre un logiciel spécifique au système tel que la gestion de fichiers, etc [5].

Le jeu de blocs de blocs Simulink dédiés se trouve dans le navigateur de la bibliothèque Simulink dans la section: RT-LAB-> Communication-> Asynchrone comme présenté dans la **Figure II.34** ci-dessous.

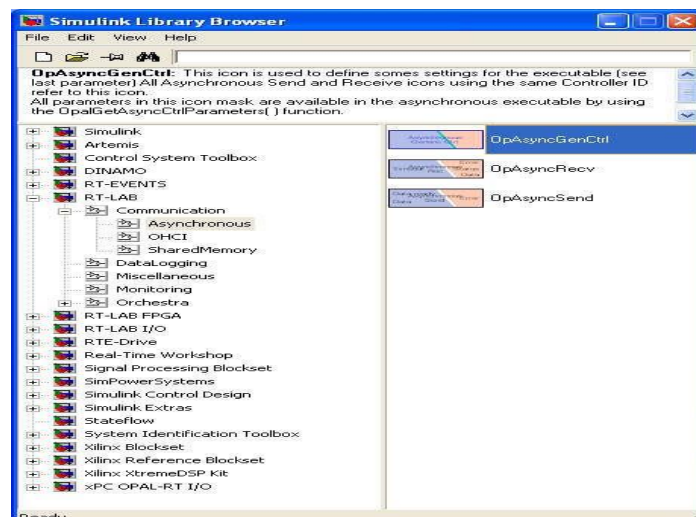


Figure II.34 : Bibliothèque de programmes asynchrones RT-LAB dans l'navigateur Simulink [5].

Cette bibliothèque se compose de trois blocs: OpAsyncGenCtrl, OpAsyncRecv et OpAsyncSend. Nous décrirons ici leurs principales fonctionnalités.

OpAsyncGenCtrl

Le bloc OpAsyncGenCtrl permet à un utilisateur de configurer le paramètre de l'exécutable asynchrone. Il est utilisé pour définir le paramètre de l'exécutable asynchrone créé par l'utilisateur. Tous les blocs d'envoi et de réception asynchrones utilisant le même ID de contrôleur font référence à ce bloc. Ce contrôleur permet à un champ générique de transmettre des paramètres à l'exécutable lancé par le contrôleur, (**Figure II.35**).

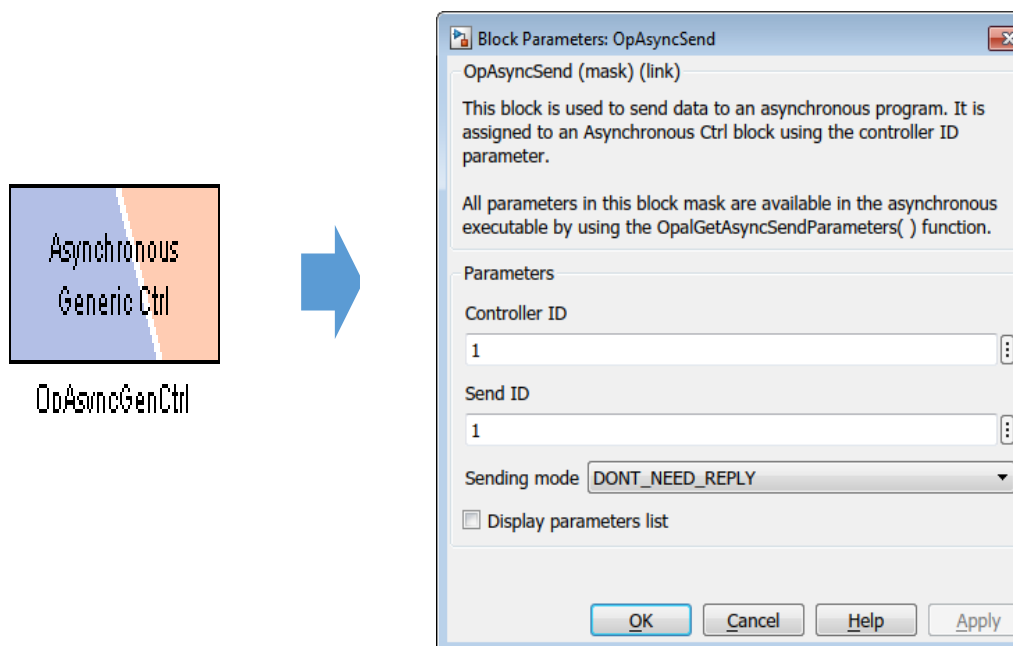


Figure II.35: Bloc OpAsyncGenCtrl [5].

OpAsyncRecv

Le bloc OpAsync Recv permet à un utilisateur de recevoir des données du processus asynchrone démarré par le contrôleur associé.

Le bloc OpAsync Recv est utilisé pour recevoir les données de l'application démarrée par le contrôleur associé. Ce bloc lit simplement les données de la mémoire partagée. Après cela, les données sont disponibles dans le modèle. Si une nouvelle valeur n'est pas disponible, OpAsync_Recv donne la dernière valeur placée dans la mémoire partagée (**Figure II.36**).

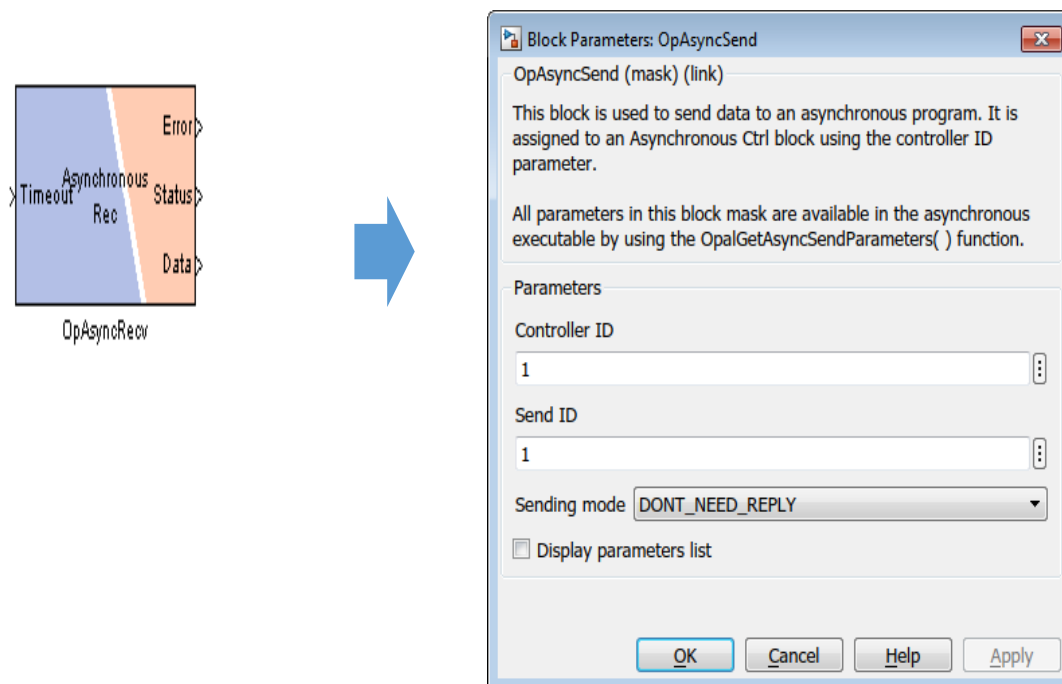


Figure II.36: Bloc OpAsyncRecv [5].

➤ OpAsyncSend

Le bloc OpAsyncSend est utilisé pour transmettre des données du modèle à l'application démarrée par le contrôleur associé. Ce bloc écrit simplement des données dans la mémoire partagée.

Après cela, le programme de l'utilisateur asynchrone peut accéder à ces données à l'aide d'appels AsyncAPI (Figure II.37).

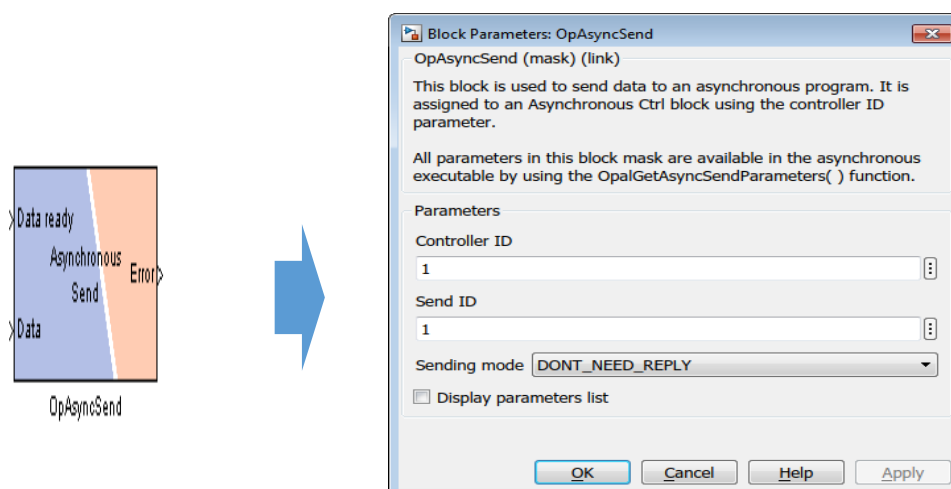


Figure II.37: Bloc OpAsyncSend [5].

La **Figure II.38** est un exemple d'utilisation de ces trois blocs dans l'exemple de modèle de communication TCP / IP.

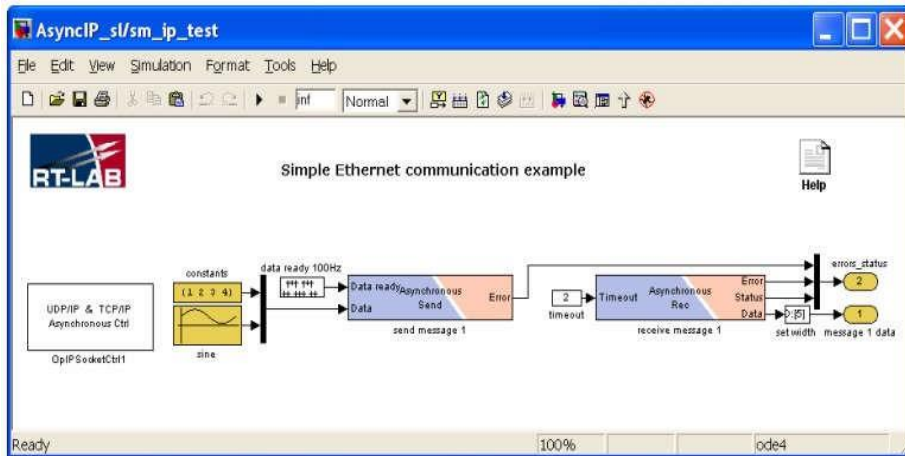


Figure II.38: Exemple de sous-système de modèle avec blocs asynchrones RT_LAB [5].

II.12 Lab VIEW

Panneaux LabVIEW® dynamiques

Grâce à l'interface RT-LAB, les utilisateurs peuvent ouvrir des panneaux LabVIEW® contenant des commandes et des indicateurs LabVIEW. Les signaux du modèle peuvent être attribués dynamiquement à ces éléments par glisser-déposer, même lorsque la simulation est en cours d'exécution. Les utilisateurs peuvent créer des panneaux de contrôle composés de jauges, cadrans, oscilloscopes et instruments virtuels.

RT-LAB gère automatiquement une console utilisateur intégrée à Simulink®. Il s'ouvre au début de la simulation pour afficher les signaux souhaités et les paramètres de contrôle. RT-LAB dispose également d'une table de variables afin de visualiser et de modifier n'importe quel point de données à tout moment. Ces points de données peuvent être visualisés et manipulés depuis une interface utilisateur LabVIEW plutôt que depuis la console utilisateur Simulink.

Pour vous inspirer et montrer les possibilités de l'outil, voici un exemple d'interface utilisateur pour une simulation de micro-grille en temps réel à petite échelle entièrement construite dans LabVIEW (**Figure II.39**) [9].

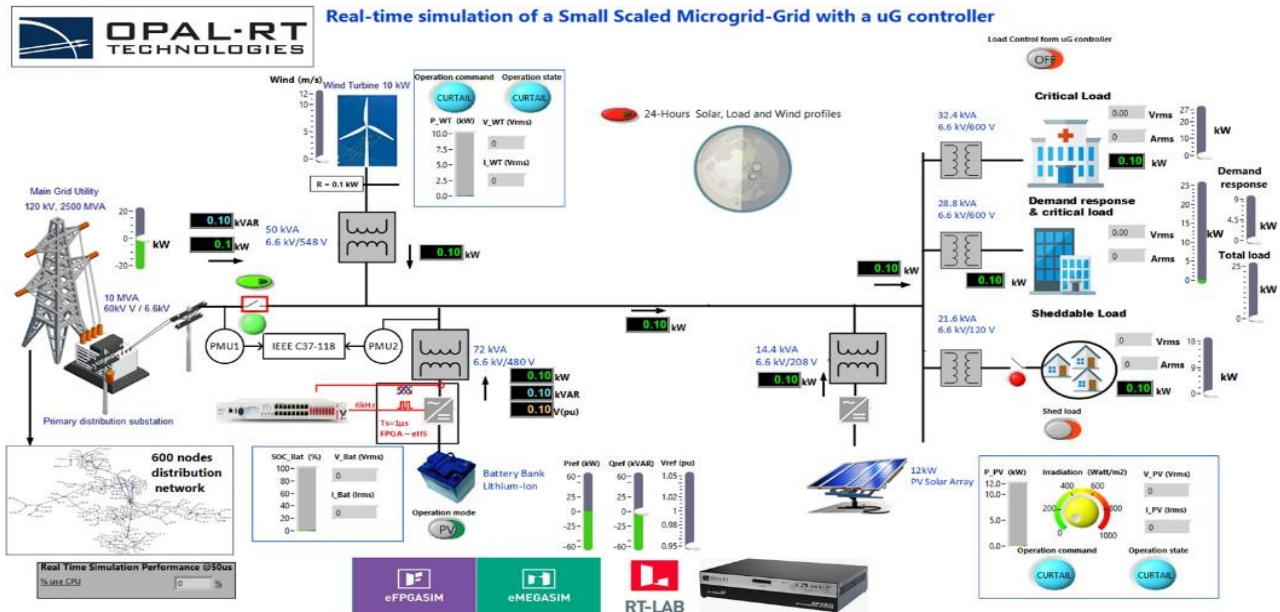


Figure II.39: Exemple d'interface utilisateur pour une simulation de micro-grille en temps réel avec lab view [9].

Les utilisateurs peuvent configurer des panneaux LabVIEW pour créer des interfaces visuelles dans RT-LAB. Les applications incluent, mais sans s'y limiter, les bancs de test et les interfaces machine-homme.

II.13 Conclusion

RT-LAB a des techniques spécifiques qui nous permettent de préparer le modèle à simuler avant de lancer la simulation.

Suite à l'installation de RT-LAB, une boîte d'outils s'intègre à la bibliothèque Simulink (RT-LAB, RT-EVENTS, RT-LAB dynamo, RT-LAB I/O, RT-LAB Drive, Artemis, eFPGAsim, eHS, MMC etc.). Ce qui permet l'accès au modèle en matlab/Simulink via l'interface RT-LAB.

Avant de passer à l'exécution nous regroupons en divers système qui seront exécutés sur différents nœuds de calcul. En effet, chaque sous-système de simulink doit posséder un nom commençant par un préfixe bien déterminé.

Après on passe à l'exécution sous RT-LAB: 1) Open, 2) Edit, 3) Compile, 4) Assigne, 5) Choisir le type de synchronisation « Hardware ou software », 6) Load et 7) Excute.

RT-LAB est livré avec de nombreux blocs fournissant des fonctionnalités génériques telles que l'enregistrement des données, la surveillance, la communication avec des composants externes.

Ces blocs doivent être insérés dans les sous-systèmes RT-LAB (SM, SS ou SC). Certains blocs fonctionnent hors ligne, d'autres ne fonctionnent qu'en simulation en temps réel.

Au chapitre suivant c'est le concept FACTS qui sera présenté avant de passer à la simulation en temps réel d'un dispositif FACTS (TCSC) et analysé son impact sur une ligne de transport HT.

Chapitre III

Présentation du concept FACTS

III.1 Introduction

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine **EPRI** (*Electric Power Research Institute*) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes **FACTS** afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques. Le concept **FACTS** regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (*interrupteur statique*) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux [10].

III.2 Classification des dispositifs FACTS

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés [11].

1. La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher des composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive. Ils servent également au remplacement du changeur de prises en charge mécanique dans les transformateurs de réglage.
2. La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'évènement des semi conducteurs de puissance command ables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor **GTO**. Ces éléments sont assemblés pour former des convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
3. Une troisième génération de **FACTS** utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

Une autre classification basée sur le mode de couplage peut être réalisée. Selon ce critère, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence:

-  les dispositifs **shunt** connectés en parallèle dans les postes du réseau;
-  les dispositifs **série** insérés en série avec les lignes de transport;
-  les dispositifs **combinés série-parallèle** qui recourent simultanément aux deux couplages.

III.3 Les différents types des systèmes FACTS :

La technologie **FACTS** n'est pas limitée par un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques

afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble de paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie. La **Figure III.1** représente la classification des dispositifs de compensation **FACTS**.

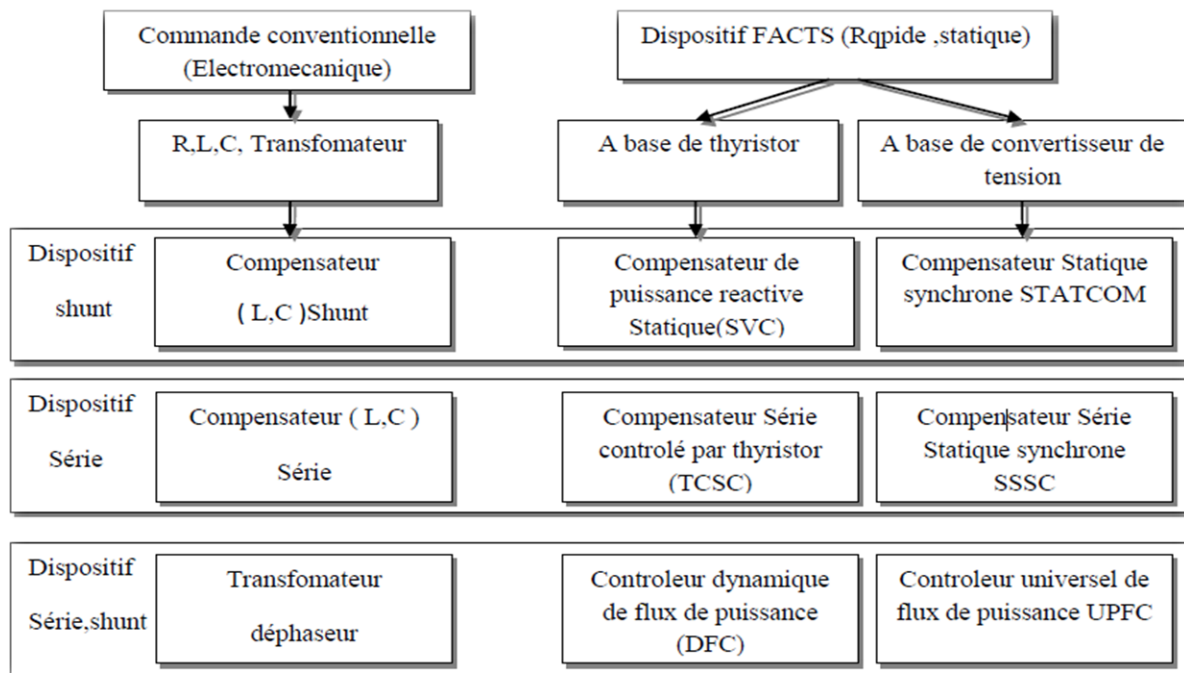


Figure III.1: Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques [11].

III.4 Brève description et définitions des dispositifs FACTS

Le but de cette section est de donner une description brève et de définir différent shunt, série et combinés série-shunt dispositifs **FACTS**, la **Figure III.2** présente les différents dispositifs qui peuvent contrôler certains variables du système électrique, nous allons utiliser les termes et les définitions d'**IEEE** [11].

III.4.1 Dispositifs FACTS Shunt

🌈 Compensateur statique de puissance réactive (*Static Var Compensator- SVC*)

Un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive, shunt, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des nœuds. Les sous-ensembles du SVC sont:

- Inductance Contrôlée par Thyristors (*Thyristor Controlled Reactor- TCR*)

Une inductance placé en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. La valeur de

l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors.

- **Condensateur Commuté par Thyristors (Thyristor-Switched Capacitor- TSC)**

Un condensateur placé en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. Les thyristors fonctionnent en pleine conduction.

- **Inductance Commutée par Thyristors (Thyristor-Switched Reactor- TSR)**

Une inductance commutée par thyristors, dans le TSR les thyristors fonctionnent en pleine conduction.

- ✚ **Compensateur Statique Synchron (Static Synchronous Compensator- STATCOM)**

Un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive dont le courant capacitif ou inductif généré peut être contrôlé séparément de la tension du système à courant alternatif.

- ✚ **Générateur Statique Synchron (Static Synchronous Generator- SSG)**

Un convertisseur de puissance statique à interrupteurs auto commutés, alimenté par une source d'énergie électrique appropriée, et exploité pour produire un ensemble ajustables de tensions de sortie multi phases, qui peut être couplé à un système de puissance alternatif dans le but d'échanger indépendamment la puissance contrôlable active et réactive.

Toutefois, deux dispositifs particuliers peuvent être mis en évidence.

- **Système de Stockage par Batterie (Battery Energy Storage System- BESS)**

Un système de stockage d'énergie d'une source de nature chimique, la conversion de la tension de source est capable d'ajuster rapidement l'énergie amont qui est fournit ou absorber d'un système alternatif.

- **Système de Stockage d'Énergie par Aimant Supraconducteur (Superconducting Magnetic Energy Storage- SMES)**

Un dispositif contenant des convertisseurs électroniques que rapidement injectent et/ ou absorbent la puissance active et /ou réactive. Le SMES sert principalement au contrôle dynamique du flux de puissance dans les systèmes électriques.

- ✚ **Générateur ou Absorbeur Statique de Puissance Réactive (Static Var Generator or Absorber- SVG)**

Un dispositif électrique statique, un équipement, ou un système qui est capable de tracer un courant contrôlé capacitif et/ ou inductif à partir d'un système de puissance électrique et, ainsi générer ou absorber la puissance réactive. Généralement considéré pour consister en connexion shunt. Inductance contrôlée par thyristors et/ou condensateur commuté par thyristors.

 Système Statique de Puissance Réactive (*Static Var System- SVS*)

Une combinaison de différent compensateurs de puissance réactive statiques et mécaniquement commutés dont les sorties sont coordonnés.

 Résistance de Freinage Contrôlée par Thyristors (*Thyristor Controlled Braking Resistor- TCBR*)

Une résistance commutée par thyristors et connectée en parallèle, qui est contrôlée pour aider le système de puissance à se stabiliser ou de minimiser l'accélération des puissances d'une unité génératrice lors d'une perturbation.

III.4.2 Dispositifs FACTS séries

 Contrôleur de transit de puissance entre lignes (*Interline Power Flow Controller- IPFC*)

Une combinaison de deux ou plusieurs compensateurs statiques série synchrone qui sont relié entre eux via une liaison commune à courant continu pour faciliter l'écoulement bidirectionnel de la puissance active entre les bornes alternatives des SSSC, et sont contrôlés pour fournir une compensation réactive indépendante pour l'écoulement de puissance ajusté dans chaque ligne et maintenir la distribution de l'écoulement de puissance réactive désiré entre les lignes.

 Condensateur Série Contrôlé par Thyristors (*Thyristor Controlled Series Capacitor- TCSC*)

Un compensateur à réactance capacitif qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive.

 Condensateur Série Commuté par Thyristors (*Thyristor Switched Series Capacitor- TSSC*)

Compensateur à réactance capacitive qui est constitué d'un banc de capacité série shunté par une inductance commutée par thyristor pour fournir un contrôle pas à pas de la réactance capacitive série.

 Inductance Série Commandée par Thyristors (*Thyristor Controlled Series Reactor- TCSR*)

Compensateur à réactance inductive qui est constitué de l'inductance série shunté par une inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série légèrement variable.

 Inductance Série Commutée par Thyristors (*Thyristor Switched Series Reactor- TSSR*)

Compensateur à réactance inductive qui est constitué d'une inductance série shuntée par une

inductance commutée par thyristor afin de fournir un contrôle pas à pas de la réactance inductive série.

III.4.3 Dispositifs FACTS combinés série –parallèle

Contrôleur de Transit de Puissance Unifié (*Unified Power Flow Controller- UPFC*)

Une combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplés via une liaison à courant continu, pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM.

Transformateur Déphaseur Commandé par Thyristor (*Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer- TCPST*)

Transformateur déphaseur ajusté par un thyristor afin de fournir un angle de phase rapidement variable. Ce dispositif est également appelé régulateur d'angle de phase commandé par thyristor (TCPAR -Thyristor Controlled Phase Angle Regulator).

Régulateur de puissance interphases (*Interphase Power Controller- IPC*)

Un contrôleur de la puissance active et réactive connecté en série et comprenant, dans chaque phase, des branches inductives et capacitives soumises à des tensions déphasées séparément. Les puissances active et réactive peuvent être réglé indépendamment en ajustant les décalages de phase et / ou les impédances de branche, à l'aide des commutateurs mécaniques ou électroniques. Dans le cas particulier où l'impédance inductive et capacitive forme une paire conjuguée, chaque terminal de l'IPC est une source passive de courant dépendant de la tension à l'autre borne.

III.4.4 Autres dispositifs FACTS

Limiteur de Tension Commandé par Thyristor (*Thyristor Controlled voltage Limiter- TCVL*)

Une varistance à oxyde métallique commutée par thyristor utilisée pour limiter la tension à ses bornes durant les conditions transitoires.

Régulateur de Tension Commandé par Thyristor (*Thyristor Controlled Voltage Regulator- TCVR*)

Un Transformateur commandé par thyristor qui peut fournir une tension variable dans une phase avec un control continu.

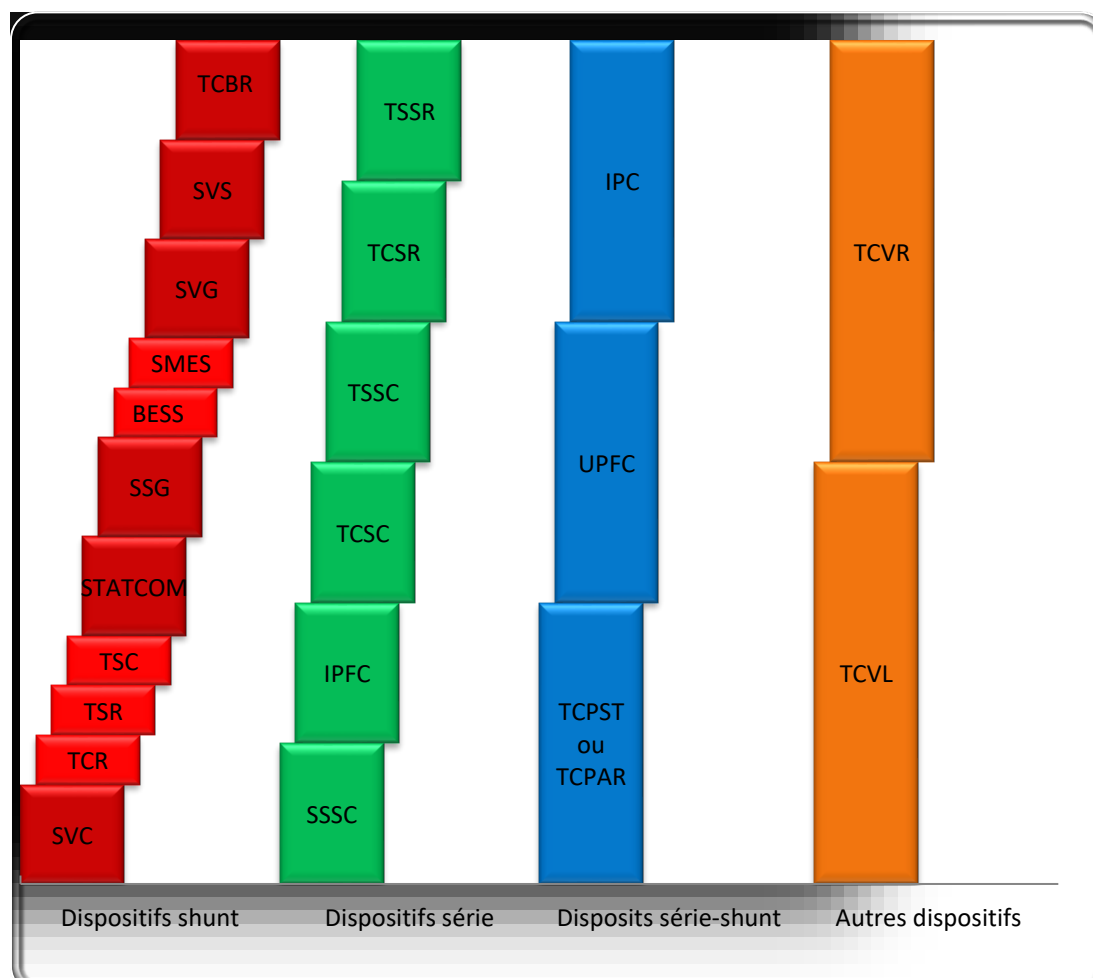


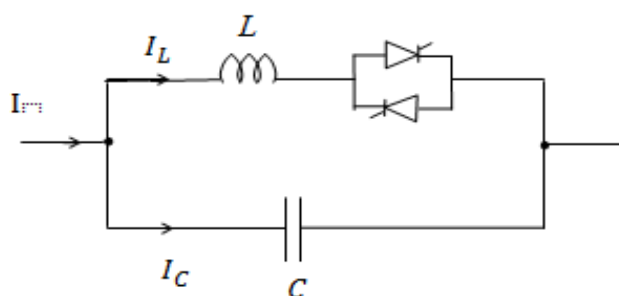
Figure III.2: Différents dispositifs FACTS [11].

Dans la section qui suit nous allons développer la présentation du **TCSC**. Il s'agit du dispositif **FACTS** qui nous intéresse particulièrement dans cette étude, et que nous devons traiter pour une meilleure compréhension. Plus de détails sur les autres dispositifs **FACTS** sont exposés dans les références [11].

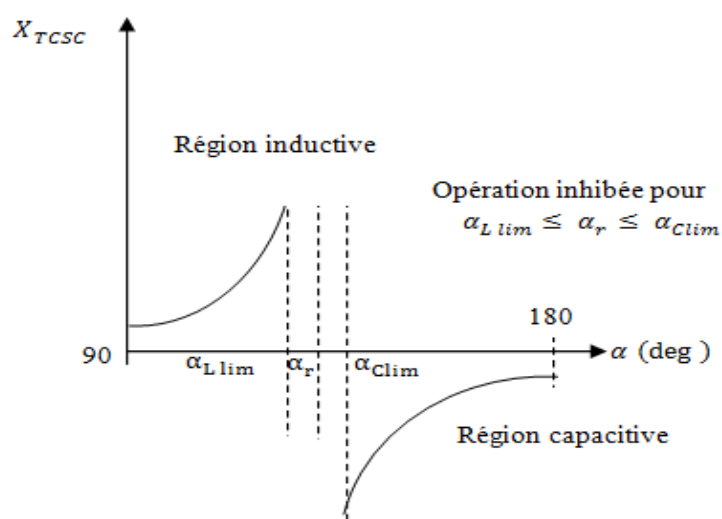
III.5 Compensateur Série Contrôlé par Thyristors (Thyristor Controlled -Series Compensator- TCSC)

Il s'agit d'une réactance série commandée par thyristors en parallèle avec un condensateur fixe, le tout en série sur la ligne de transmission. La **Figure III.3.a** illustre le schéma du **TCSC** [11].

a)



b)



c)

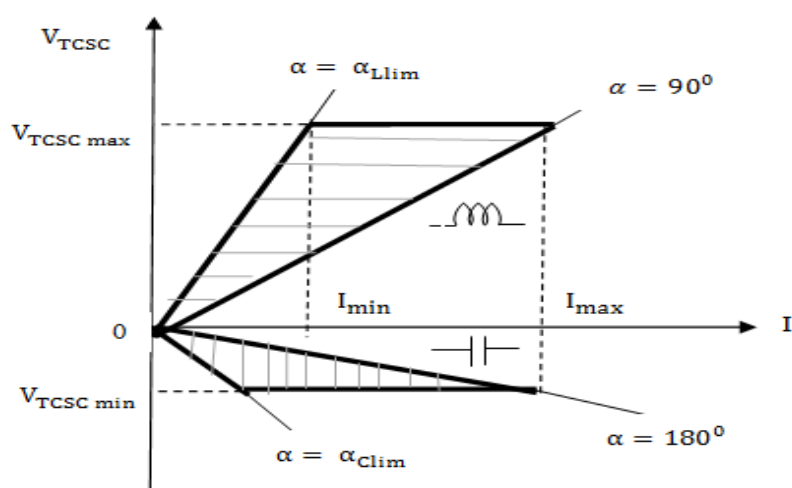


Figure III.3: Compensateur Série Contrôlé par Thyristors : **a)** schéma de base, **b)** réactance apparente, **c)** caractéristique statique du TCSC [11].

avec:

I : Courant de ligne.

$\alpha_{L\lim}$: Angle d'amorçage limite dans la zone inductive.

α_r : Angle d'amorçage dans la zone de résonance.

α_{Clim} : Angle d'amorçage limite dans la zone capacitive.

V_{TCSC} : Tension du TCSC.

$V_{TCSC\max}$, $V_{TCSC\min}$: Tensions limites de fonctionnement en régulation.

$I_{\max}$: Courant de ligne maximum.

$I_{\min}$: Courant de ligne minimum.

La valeur de l'impédance du **TCSC** est modifiée en contrôlant le courant circulant dans l'inductance au moyen de la valve à thyristors. Trois régimes de fonctionnement peuvent être distingués selon la **Figure III.4**.

- a) Les thyristors sont bloqués ; le courant de la ligne passe uniquement par le condensateur. Le TCSC a alors une impédance fixe correspondant à celle du condensateur.
- b) Les thyristors sont en pleine conduction ; l'impédance du TCSC est fixe et correspond à l'impédance équivalente résultant de la mise en parallèle de la capacité et de l'inductance.
- c) Les thyristors sont commandés en conduction partielle. Un courant de boucle circule dans le TCSC et la réactance apparente de ce dernier est supérieur à celle de la capacité (ou de l'inductance) seule.

La réactance apparente du TCSC est donnée par

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (\text{III. 1})$$

avec

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin \alpha} \quad (\text{III.2})$$

Dans les réseaux électriques, les TCSC sont généralement utilisés pour les applications suivantes:

- ✚ Commande rapide de la puissance active à travers les lignes de transport ;
- ✚ Contrôle des flux de puissance ;
- ✚ Atténuation des résonances hypo synchrones ;
- ✚ Amortissement des oscillations de puissance ;
- ✚ Réduction des courants de défaut.

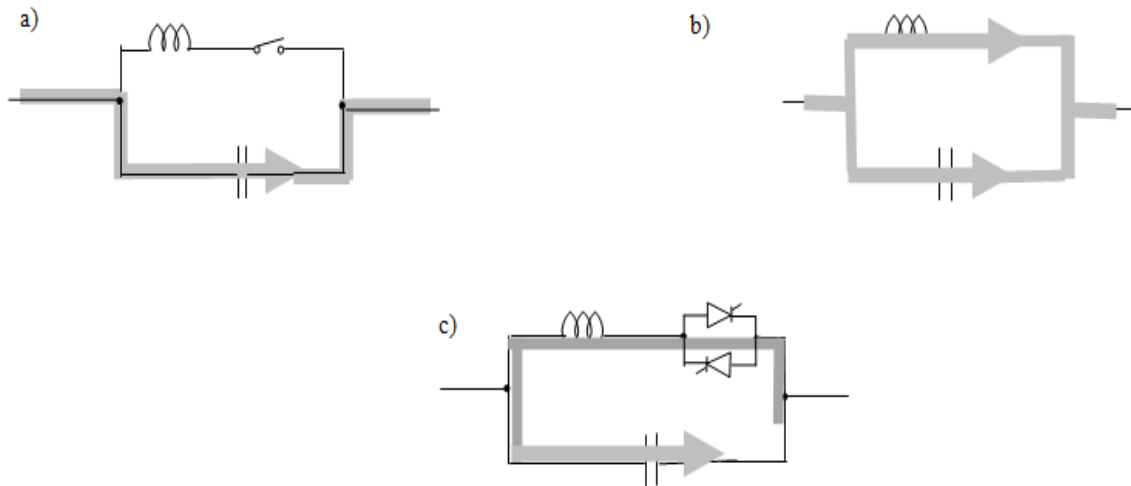


Figure III.4: Régime de fonctionnement du TCSC [11].

III.6 Mode de fonctionnement du TCSC

1. Mode de blocage:

Lorsque la valve à thyristor n'est pas enclenchée et que les thyristors restent à l'état non passant, le TCSC travaille en mode de blocage, le courant I de la ligne passe alors uniquement à travers le banc de condensateurs, ainsi:

$$\bar{V}_C = j \cdot X_C \cdot I \quad (\text{III.3})$$

Avec $\bar{V}_C$: tension du condensateur

Dans ce mode, le TCSC fonctionne comme condensateur série fixe avec un facteur de survoltage égal à 1 [12].

2. Mode by-pass :

Si la valve à thyristor est commandée en permanence, elle reste constamment à l'état passant et le TCSC se comporte comme la connexion parallèle d'un banc de condensateurs série et de réactance de la branche de la valve à thyristors.

Dans ce mode, la tension du condensateur pour un courant de ligne donné est beaucoup plus faible qu'en mode de blocage, la **Figure III.5** représente le module et la phase de l'impédance du TCSC.

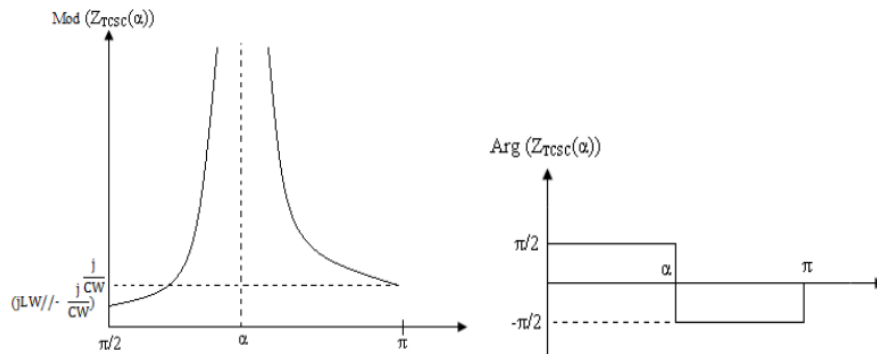


Figure III.5: Module et phase de l'impédance du TCSC [12].

III.7 Les avantages des dispositifs FACTS

- ✚ Contrôle de l'écoulement de puissance : c'est la fonction principale des FACTS. L'utilisation du contrôle de l'écoulement de puissance peut satisfaire les demandes de charge, atteindre un fonctionnement optimal, et surmonter les conditions d'urgence [10].
- ✚ Amélioration de la stabilité dynamique. Cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension.
- ✚ Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière.
- ✚ Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettra ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.

III.8 Les inconvénients des dispositifs FACTS :

- ✚ Le choix du modèle du FACTS.
- ✚ Choix de la localisation des FACTS.
- ✚ Protection pour les FACTS et pour le réseau.
- ✚ Interactions entre les dispositifs FACTS et les autres éléments.
- ✚ Génération des harmoniques.

III.9 Rôle des dispositifs FACTS

Le développement des dispositifs **FACTS** est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels le thyristor et le thyristor **GTO**.

Dans les dispositifs **FACTS**, les interrupteurs électroniques disposent de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les **FACTS** possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite. Dans un réseau électrique, les **FACTS** permettent de remplir des fonctions tant, en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les **FACTS** sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants:

- ✚ Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée.
- ✚ Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire voire supprimer les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages [12].

De par leur vitesse de commande élevée, les **FACTS** possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique. Ils permettent en particulier:

- ✚ D'accroître la réserve de stabilité transitoire.
- ✚ D'amortir les oscillations de puissance

III.10 Coût des dispositifs FACTS

Mis à part les avantages techniques apportés par les **FACTS**, d'autres critères liés au coût, [Annexe A], doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un **FACTS** est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation [11].

Le coût d'une installation **FACTS** dépend principalement des facteurs tels que les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système ou encore la technologie du semi-conducteur utilisé.

III.11 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu, le concept FACTS, ainsi, nous avons donné une brève description et des définitions des divers types de dispositifs FACTS. Cette description est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique. Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux.

Au chapitre suivant nous allons simuler en temps –réel une ligne de transport HT avec le TCSC sous différents modes de fonctionnement.

Chapitre IV

Simulation d'un exemple de RT-Lab

IV.1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'implémenter un exemple d'un dispositif FACTS le TCSC inséré dans une longue ligne de transport HT en simulation temps réel sous RT-LAB. Les différents modes de fonctionnement du TCSC vont être analysés.

IV.2 Description du circuit

Un TCSC est placé sur une longue ligne de transport de 500 kV, pour améliorer le transfert de puissance, les données de la ligne HT et du TCSC sont données en **annexe B**. Quand le TCSC est déconnecté « bypassed » en utilisant un disjoncteur, le transfert de puissance est d'environ 110 MW [13]. Le TCSC se compose d'un condensateur fixe et d'une réactance contrôlée par thyristor (TCR) parallèle dans chaque phase. Le taux de compensation du TCSC est de 75 % c-à-d en utilisant seulement les condensateurs (l'angle d'amorçage est de 90deg).

La fréquence oscillatoire du TCSC est de 163 Hz, soit 2,7 fois la fréquence fondamentale. Le système de test est décrit par la **Figure IV.1** [13].

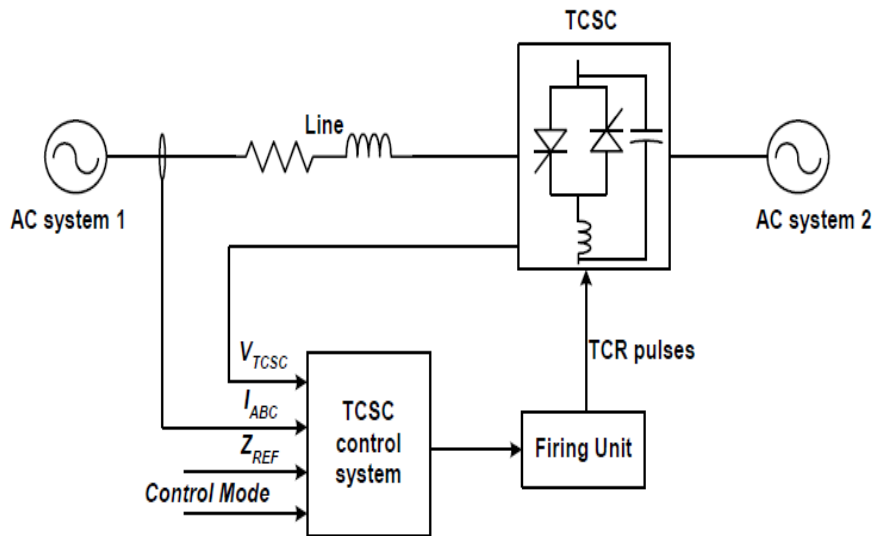


Figure IV.1 : La ligne de transport HT avec le TCSC [13].

Le TCSC peut fonctionner en mode capacitif ou inductif, bien que ce dernier mode soit rarement utilisé en pratique. Étant donné que la résonance pour ce TCSC est pour un angle d'amorçage d'environ 58 degrés, l'opération est interdite dans la plage d'angle d'amorçage de 49 degré à 69 degrés. Notez que la résonance de l'ensemble du système (lorsque l'impédance de ligne est inclut) est d'environ 67 degrés. Le mode capacitif est obtenu avec des angles d'amorçage de 69 à 90

degrés. L'impédance est à 90 degrés et, par conséquent, le transfert de puissance augmente à mesure que l'angle d'amorçage est réduit. En mode capacitif, la plage des valeurs d'impédance est d'environ 120-136 Ohm. Cette plage correspond à une plage de transfert de puissance d'environ 490-830 MW (compensation 100 % -110 %). Comparé au transfert de puissance de 110 MW avec une ligne non compensée, le TCSC permet une amélioration significative du niveau de transfert de puissance [13].

Le mode inductif correspond à un angle d'amorçage allant de 0 à 49 degrés, l'impédance la plus faible est à 0 degré. Dans l'opération en mode inductif et le mode alpha, la variation de l'impédance est de 19-60 ohms ce qui correspond à une variation de la puissance transférée de 100-85 MW [13].

La Figure IV.2 illustre la ligne de transport de 500kV avec le TCSC en MATLAB/ Simulink et l'outil ARTEMiS. ARTEMiS est un solveur du système puissant en temps réel qui fournit un degré élevé de stabilité pour l'espace d'état en temps discret des modèles.

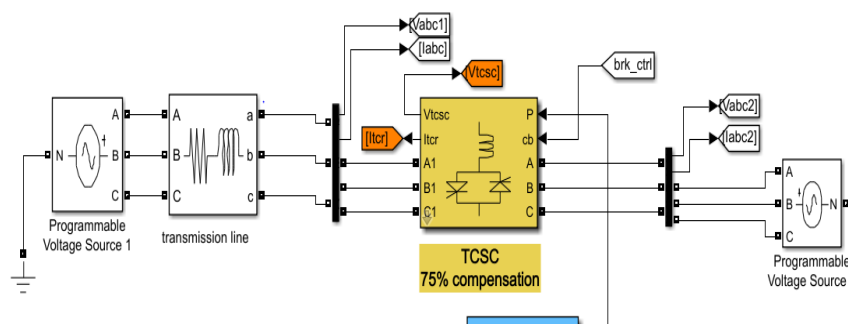


Figure IV.2: la ligne du transport d'énergie.

IV.3 Contrôle TCSC

Lorsque le TCSC fonctionne en mode d'impédance constante, il utilise un feedback de tension et de courant pour calculer l'impédance du TCSC. L'impédance de référence détermine indirectement le niveau de puissance, bien qu'un mode de contrôle de puissance automatique puisse également être introduit.

Un contrôleur PI séparé est utilisé dans chaque mode de fonctionnement. Le mode capacitif utilise également un compensateur de phase. Chaque contrôleur comprend en outre une boucle de commande adaptative pour améliorer les performances sur une large plage de fonctionnement.

IV.4 Modélisation de la ligne étudiée en temps réel

Dans ce cas le modèle SIMULINK doit subir quelques modifications avant d'être intégré dans le simulateur RT-LAB. Le modèle doit être divisé en sous-systèmes tel qu'illustré dans la Figure IV.3 ci-dessous.

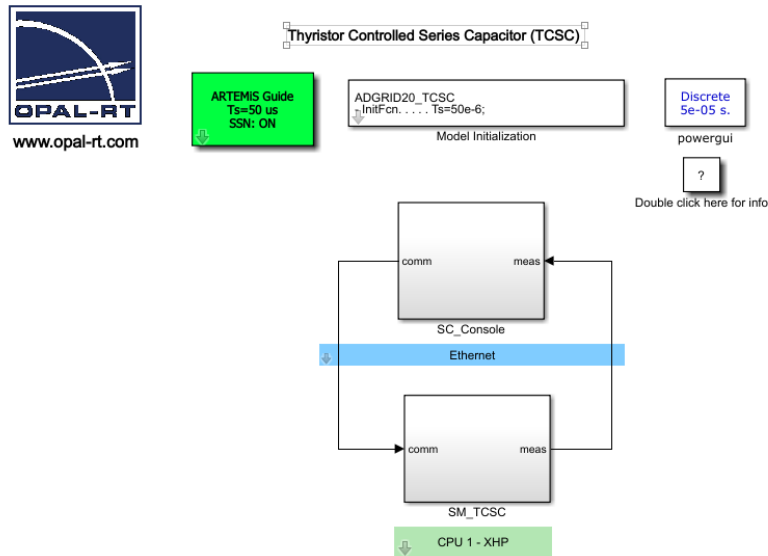


Figure IV.3 : Les deux sous-systèmes du dispositif TCSC sous RT-LAB.

Le premier sous-système agit comme maître: (SM_ Simuling Manager) (**Figure IV.4**), il est responsable du calcul en temps réel et contrôle l'ensemble du système à simuler. Il effectue également l'acquisition de données. La représentation détaillée de sous-système SM est donnée par la figure ci-dessous.

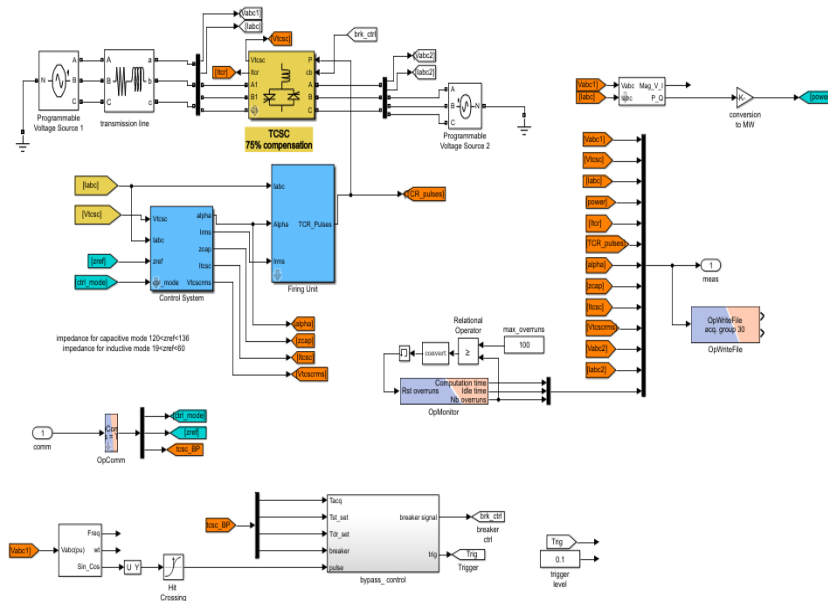


Figure IV.4: Les détails du sous-système SM_TCSC.

Le sous-système SC_Console (**Figure IV.5**) est la console (monitoring) utilisée pour entrer les signaux de commande ainsi que les signaux de référence. Il permet également la visualisation des résultats de la simulation. La représentation détaillée de sous-système SC est donnée dans la figure ci-dessous.

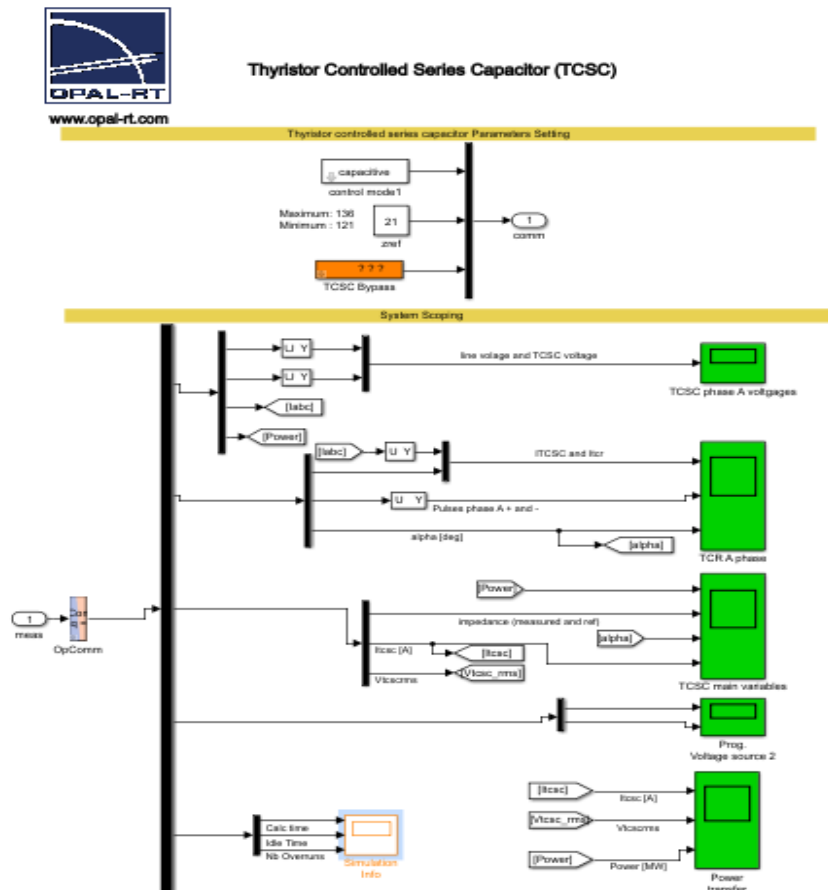


Figure IV.5 : Les détails du sous-système SC_Console.

Pour changer les modes d'opérations (Capacitif, inductif ou manuel) du TCSC on bascule un interrupteur dans le bloc de control. La représentation détaillée du **bypass_control** est donnée par la **Figure IV.6**.

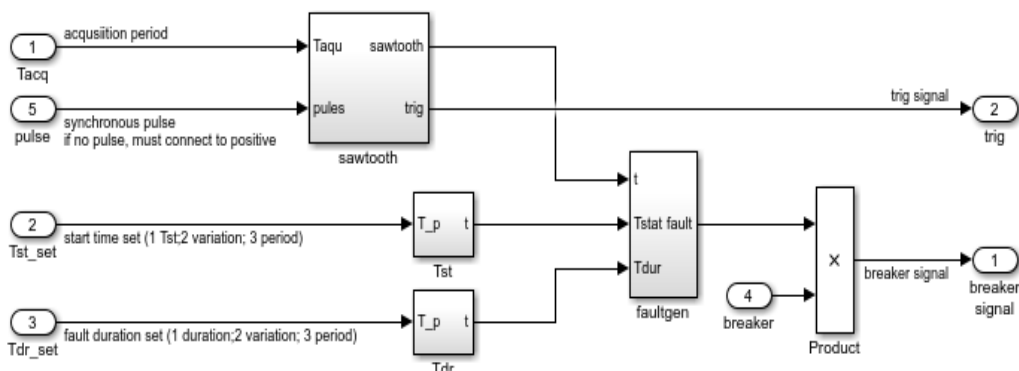


Figure IV.6 : Les détails du bypass_control.

IV.5 Résultats de Simulation

Dans cette partie nous allons simuler la ligne de transport HT avec le TCSC en temps réel (environnements RT-LAB version v11.3.5.119), entièrement compatible avec MATLAB/SUMILINK version 2017a.

La simulation sous RT-LAB de notre ligne de transport HT passe par les différentes étapes du paragraphe II.4 et II.5 du chapitre II. Lors de la simulation de notre travail nous n'avons pas montré toutes les interfaces graphiques de RT-LAB en capture d'écran. Nous réglons les différents paramètres de simulation et nous choisissons le mode de simulation logiciel synchronisé (Software Synchronized) à partir d'Exécution, et analyser les différents modes de fonctionnement du TCSC ainsi une réponse dynamique dans le cas sans la compensation du TCSC en mode capacitif.

IV.5.1 Allocation du processeur et performances en temps réel

Le **tableau IV.1** résume l'allocation du processeur et les performances en temps réel de l'OP4510.

	Contenu des composants	Temps de calcul du modèle	Pas de temps minimum	Facteur d'accélération
CPU 1 : Description (50µs)	TCSC(thyristor controlled series reactor)	2.6µs	15 µs	32 (50 µs)

Tableau IV.1 : Allocation du processeur et performances en temps réel.

IV.6 Scénario 1: Simulation en temps réel de la ligne de transport avec le TCSC en mode capacitif

En mode capacitif, la variation de l'impédance est de 120 à 136 Ohm. Cette plage correspond à une plage de transfert de puissance d'environ 490 à 830 MW (compensation de 100% à 110 %).

IV.6.1 Réglage du TCSC

Nous avons régler en mode capacitif l'impédance de référence à $Z_{cap}=120$ Ohm, et nous avons obtenus les résultats dans les figures suivantes:

IV.6.2 Les graphes des tensions triphasées du premier et du deuxième système d'alimentations.

La **Figure IV.7** et la **Figure IV.8** illustrent respectivement les tensions des deux systèmes d'alimentation.

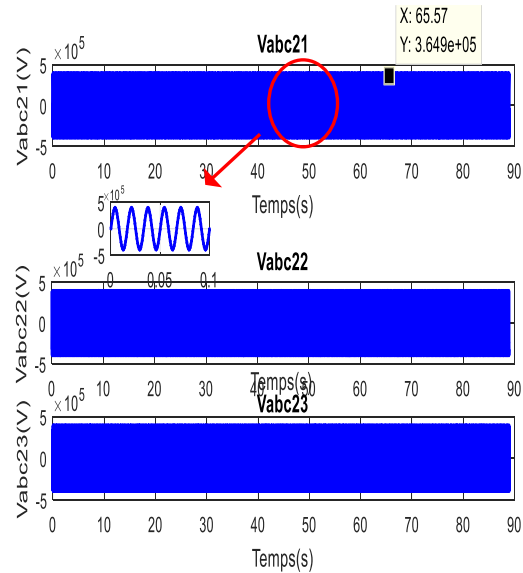
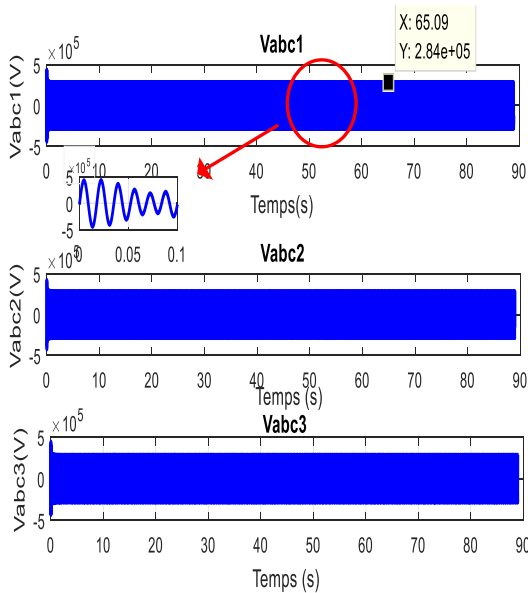


Figure IV.7 : la tension V_{abc1} de la source (1)

Figure IV.8 : la tension V_{abc2} de la source (2)

Nous avons remarqué que dans les **Figures IV.7** et **IV.8** la tension triphasée V_{abc1} est de $2.84e+05$ V et la tension de V_{abc2} est de $3.649e+05$ V, donc la tension a augmenté au niveau du système2.

IV.6.3 Les graphes des courants triphasés des deux systèmes d'alimentation.

La **Figure IV.9** et la **Figure IV.10** représentent respectivement les courants des deux systèmes d'alimentation.

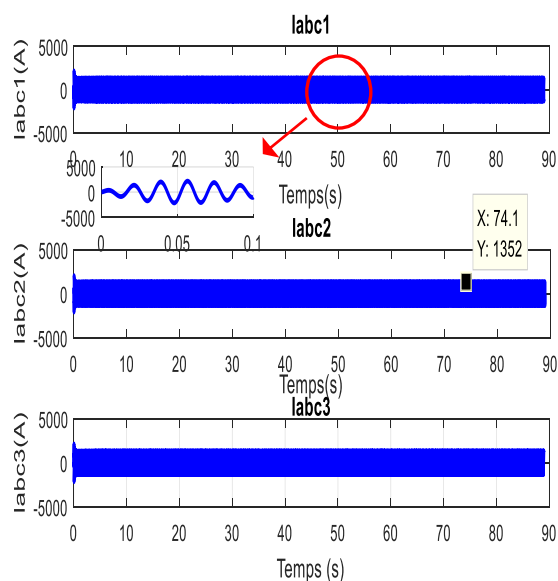


Figure IV.9 : Courant triphasée I_{abc1} de la source (1)

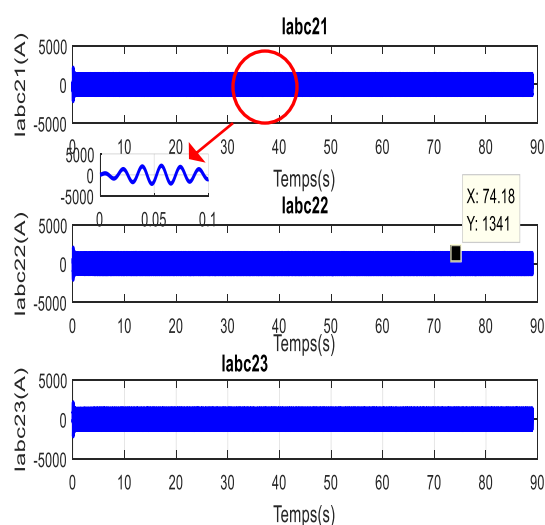


Figure IV.10 : Courant triphasée I_{abc2} de la source (2)

Nous remarquons dans la **Figure IV.9** le courant triphasée I_{abc1} est de 1352 A et le courant de I_{abc2} est de 1341 A de la **Figure IV.10**. Le courant dans la deuxième source reste presque le même par rapport à la première source.

IV.6.4 Les graphes des grandeurs du système de contrôle (TCSC)

L'impédance, le courant, la tension et l'angle d'amorçage du TCSC sont représentés par les figures suivantes et nous remarquons que les grandeurs du TCSC suivent la référence.

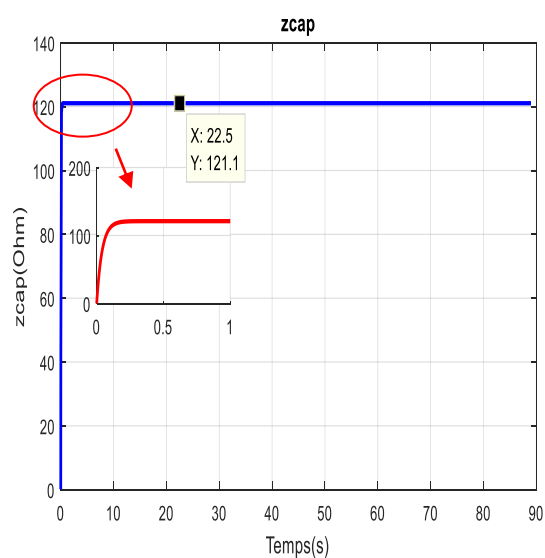
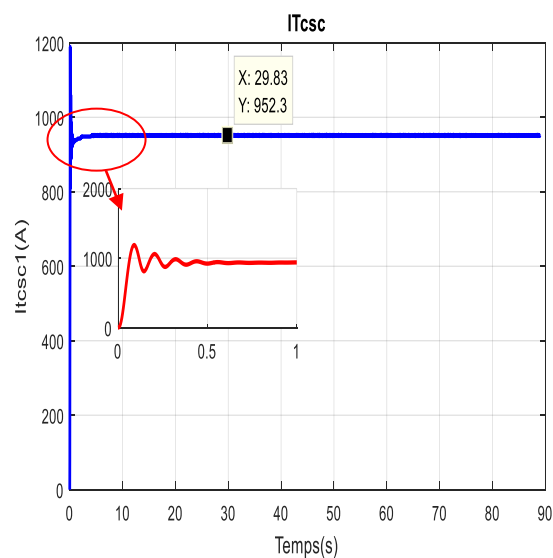
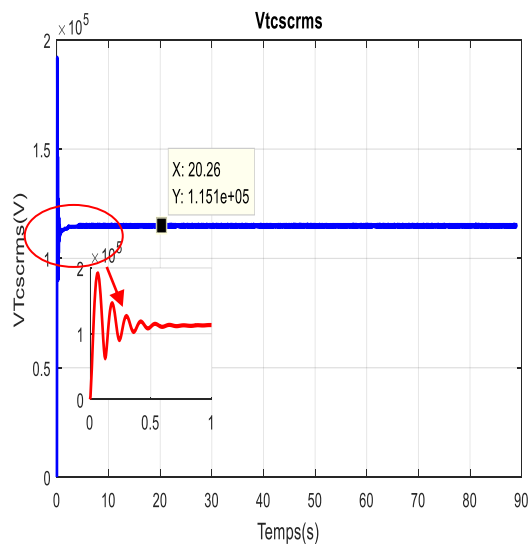
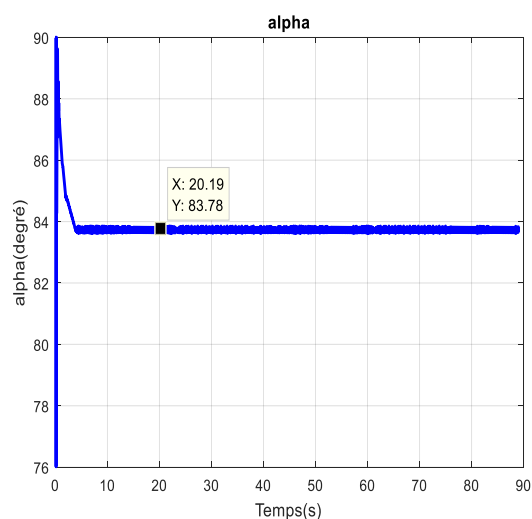
Figure IV.11 : l'impédance capacitive Z_{cap} Figure IV.12 : le courant I_{tcsc} du TCSC.Figure IV.13 : la tension V_{tcsc} du TCSC.

Figure IV.14 : Alpha du TCSC.

IV.6.5 Les graphes de la puissance active et réactive injectée par le TCSC

La puissance active et réactive de la ligne avec le TCSC sont données respectivement par les Figures IV.15 et IV.16.

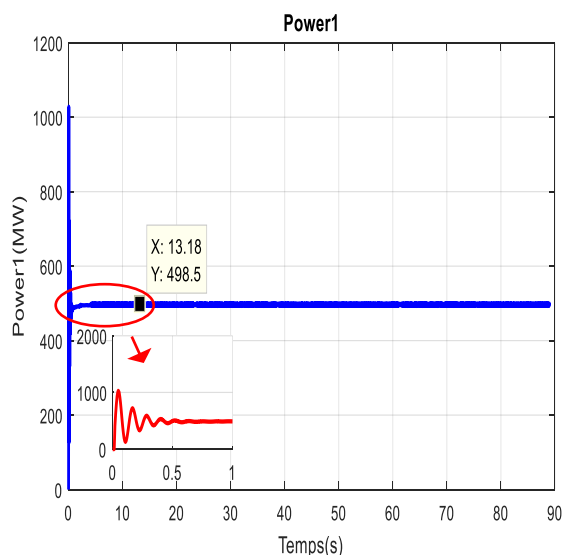


Figure IV.15: Puissance active injectée par le TCSC.

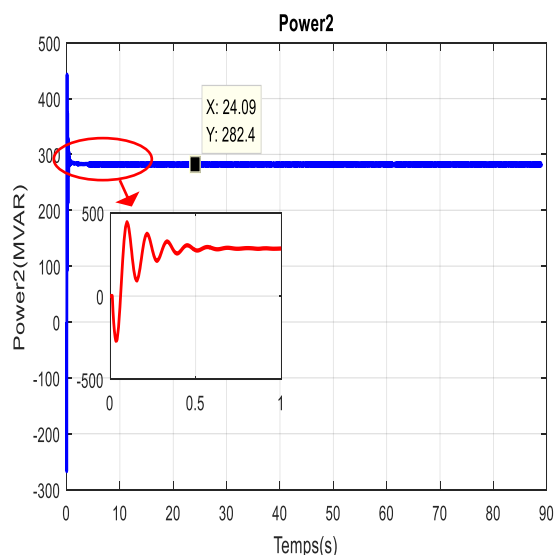


Figure IV.16: puissance réactive injectée par le TCSC.

Nous remarquons dans la **Figure IV.15** que le TCSC améliore le transit de puissance à 498.5 MW, la puissance réactive est de l'ordre de 282.4 MVAR selon la **Figure IV.16**.

L'effet de la compensation avec le TCSC se répercute directement sur le transit de puissance active.

IV.7 Scenario 2: Simulation en temps réel de la ligne de transport avec le TCSC en mode inductif

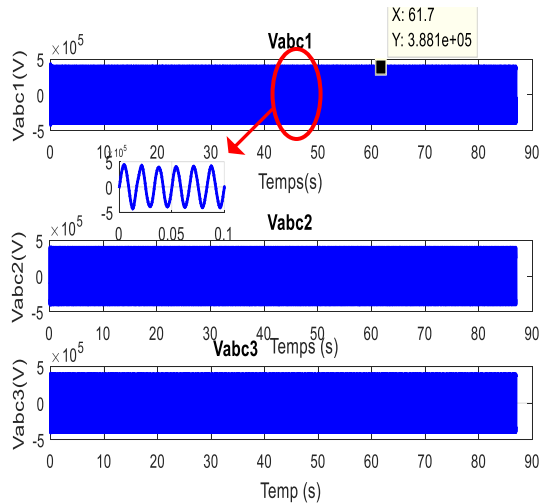
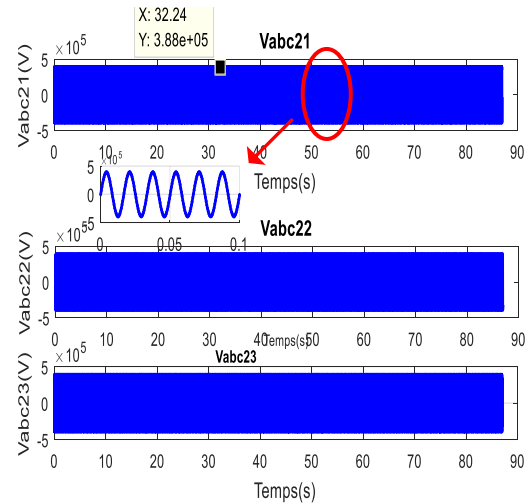
Dans le mode inductif, la plage d'impédance peut varier de 19 à 60 Ohm pour que le transfert de puissance varie de 100 à 85 MW.

IV.7.1 Réglage du TCSC

Nous avons réglé l'impédance de référence à $Z_{ind}=19$ Ohm, et nous avons obtenus les résultats dans les figures suivantes.

IV.7.2 Les graphes des tensions triphasées du premier et du deuxième système d'alimentation pour le mode inductif.

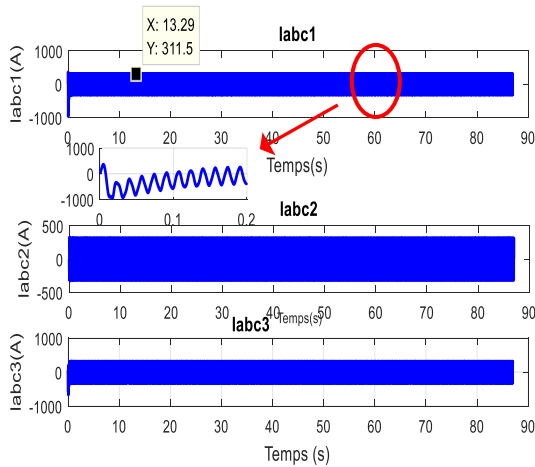
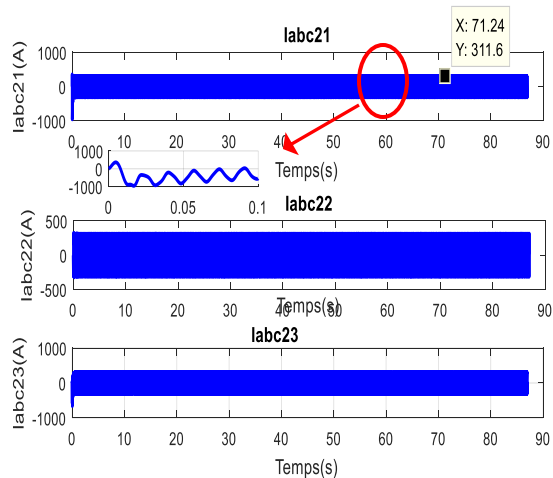
Les tensions des deux systèmes d'alimentation sont illustrées respectivement par les **Figures IV.17** et **IV.18**.

Figure IV.17 : la tension triphasée V_{abc1} Figure IV.18 : la tension triphasée V_{abc2}

Les résultats de simulation montrent que la tension est la même lors du transfert de la puissance.

IV.7.3 Les graphes des courants triphasés des deux systèmes d'alimentation

Les Figures IV.19 et IV.20 représentent les courants des deux systèmes d'alimentation.

Figure IV.19 : courant triphasée I_{abc1} du premier système (1)Figure IV.20 : courant triphasée I_{abc2} du deuxième système (2)

La remarque faite de ces résultats de simulation est que le courant est le même lors du transfert de la puissance.

IV.7.4 Les graphes des grandeurs du système de contrôle (TCSC) en mode inductif

L'impédance, le courant, la tension et l'angle d'amorçage du TCSC sont représentés par les figures suivantes et nous remarquons que les grandeurs du TCSC suivent la référence.

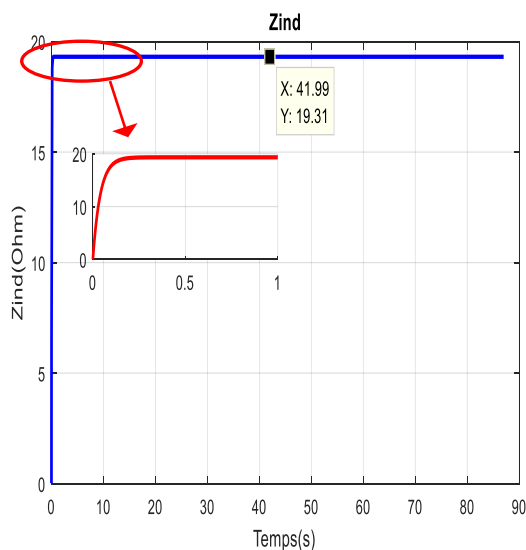
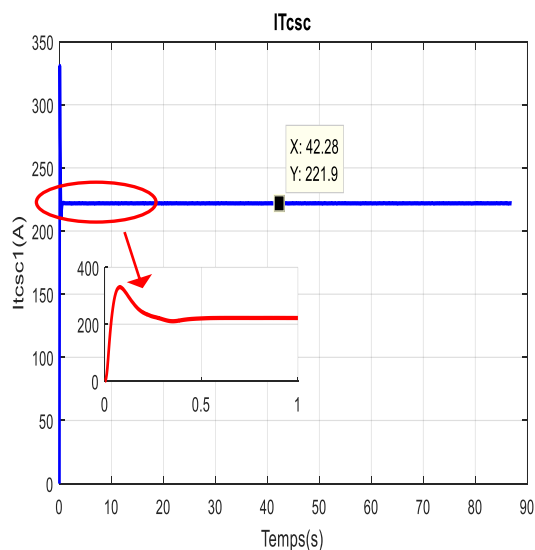
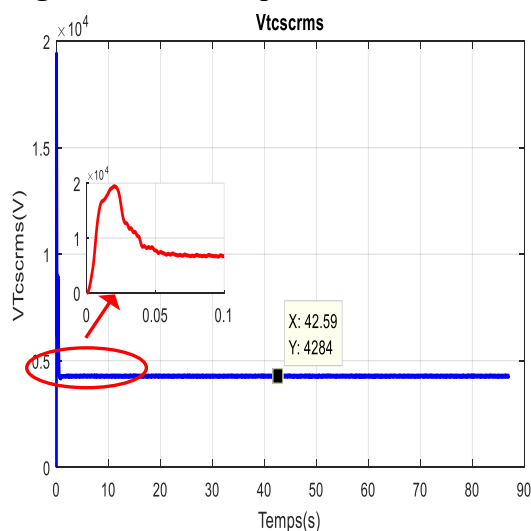
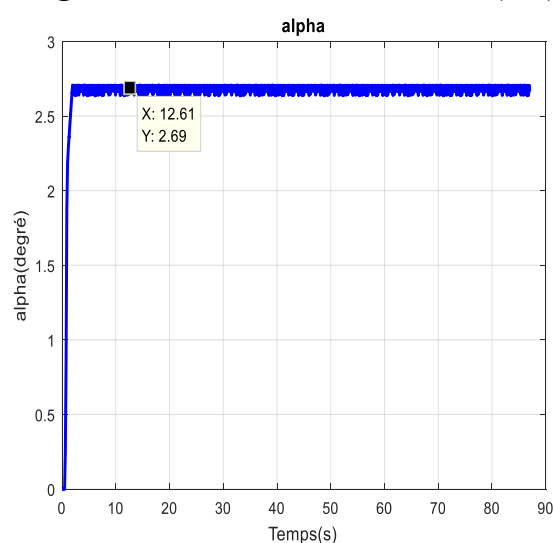
Figure IV.21 : l'impédance inductive Z_{ind} .Figure IV.22 : le courant du TCSC (I_{tcsc})Figure IV.23 : la tension du TCSC V_{tcsc} 

Figure IV.24 : Alpha inductif

IV.7.5 Les graphes de la puissance active et réactive injectée régulée par le TCSC

En mode inductif la puissance active et réactive de la ligne avec le TCSC sont données respectivement par les **Figures IV.25** et **IV.26**.

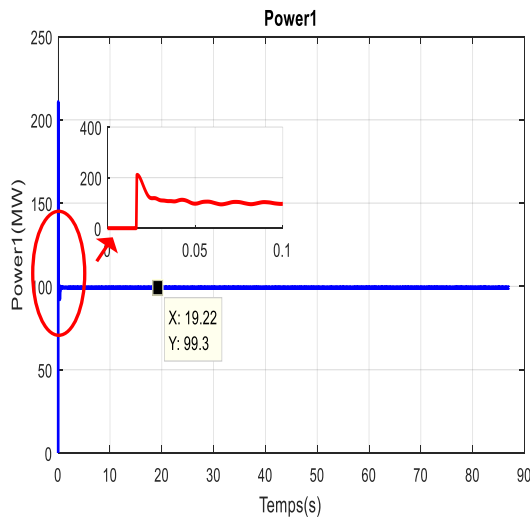


Figure IV.25 : la puissance active injectée par le TCSC.

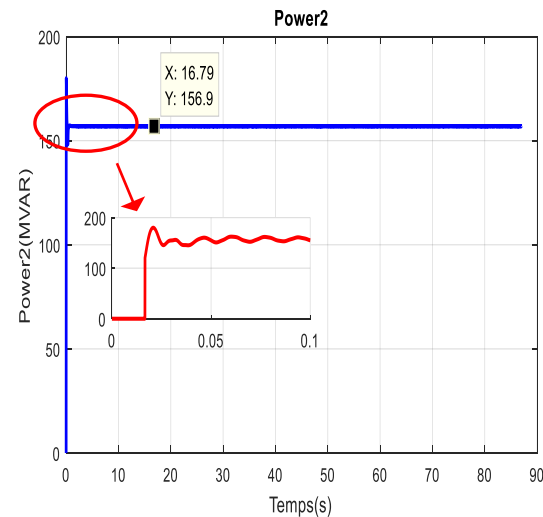


Figure IV.26 : la puissance réactive injectée par le TCSC.

D'après la **Figure IV.25** le transit de puissance est 99.3 MW, la puissance réactive est de l'ordre de 156.9 MVAR selon la **Figure IV.26**. Dans ce mode inductif la ligne transporte plus de puissance réactive qu'active par rapport au réglage du TCSC en mode capacitif.

IV.8 Scénario 3: Démonstration d'une réponse dynamique en temps réel

Les résultats de simulation présentés ci-après montrent l'un des tests qui peuvent être effectués. Le test commence par fournir une compensation du TCSC en mode capacitif puis débrancher la compensation à $t=3\text{sec}$ pendant 0,5sec.

IV.8.1 Réglage du TCSC

Nous avons réglé l'impédance de référence à $Z_{\text{cap}}=120\text{ Ohm}$, et nous avons obtenus les résultats dans les figures suivantes.

IV.8.2 Les graphes de la réponse dynamique

Ces figures représentent la réponse dynamique de la ligne de transport sans et avec le TCSC.

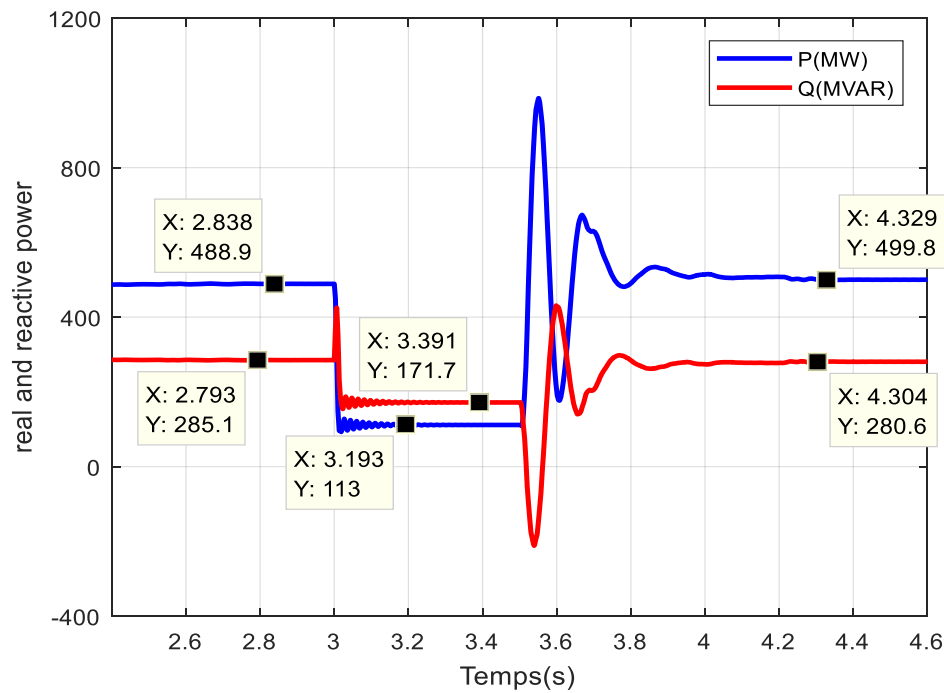


Figure IV.27 : Puissance active et réactive injectée par le TCSC.

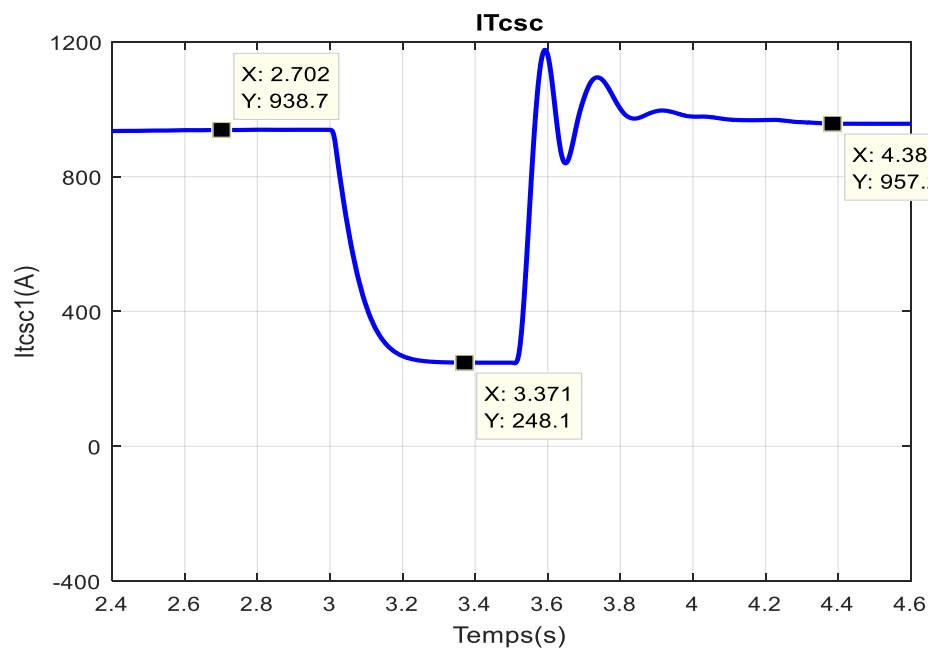


Figure IV.28 : le courant du TCSC.

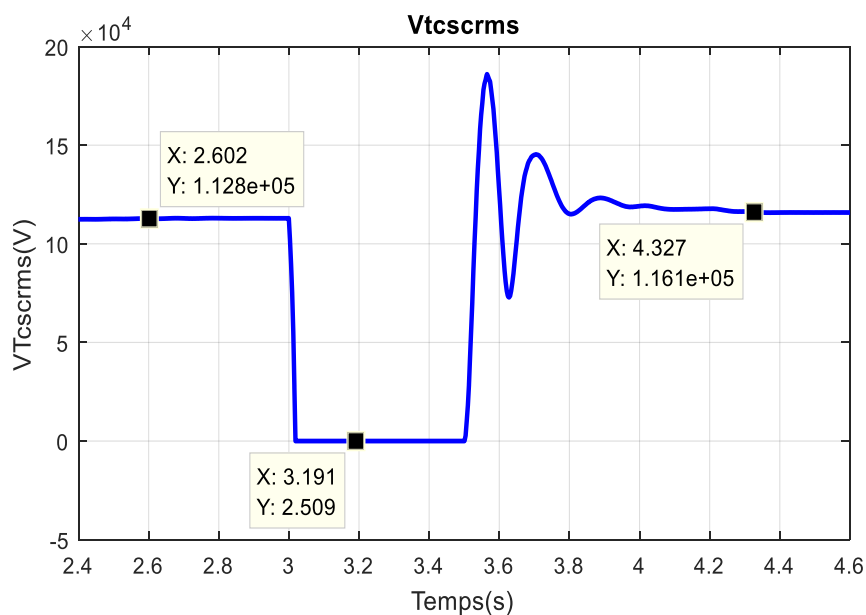


Figure IV.29 : la tension du TCSC.

Les Figures IV.27, IV.28 et IV.29 représentent respectivement les profils des P, Q, V et I en réponse dynamique. Durant les 3 premières secondes nous remarquons que la puissance active transférée par la ligne est de 489 MW et le réactive de 285MVAR puis à l'instant $t=3\text{sec}$ et pendant 0.5sec quand le TCSC est déconnecté de la ligne HT, la puissance active a diminué jusqu'à 113 MW avec une puissance réactive de 172MVAR et la tension du TCSC est nulle.

Quand le TCSC redevient à l'état de compensation et après une phase transitoire de 3.5sec à 3.8sec, la puissance transférée est de 499.8 MW.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une simulation en temps réel sous RT-LAB avec trois scénarios; les deux modes de fonctionnement du TCSC qui sont le mode inductif et le mode capacitif et nous avons remarqué dans ce dernier que le transit de puissance active sur la longue ligne de transport en HT est supporté significativement.

Le 3^{ème} scénario était dédié à l'étude d'un phénomène transitoire dans lequel nous avons débranché le TCSC (Thyristor controlled Serie Capacitor) pendant 0.5 sec en temps réel, les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité du TCSC pour le contrôle et l'amélioration du transit de puissance.

Conclusion générale

Notre projet de mémoire de fin d'études était dédié à l'utilisation de la simulation temps- réel (Real- Time Simulator) en utilisant un simulateur de OPAL-RT le OP4510.

Les challenges de la simulation temps –réel sous RT-LAB sont multiples, nous pouvons citer:

- ✚ La difficulté de gérer des tests sur le terrain.
- ✚ Le coût.
- ✚ Parfois dangereux

Les outils de simulation temps-réel nous permettent :

- ✚ De vérifier progressivement tout au long du projet.
- ✚ De détecter des défauts au plus tôt.
- ✚ De tester une infinité de cas.

Dans notre travail et avant de passer à l'application de la simulation temps –réel pour un exemple sous MATLAB / Simulink afin d'observer les caractéristiques de performance du TCSC sur le simulateur temps –réel OPAL –RT- OP4510, nous avons présenté aux deux premiers chapitres; depuis la conception du modèle avec MATLAB/SIMULINK jusqu'à l'exécution temps réel sur cible OPAL-RT.

Le 3^{ème} chapitre nous a permis d'étudier un dispositif FACTS; le TCSC avant d'observer son impact sur une longue ligne de transport.

Nos résultats de simulation en temps réel au 4^{ème} chapitre pour trois scénarios, deux scénarios dédiés au mode de fonctionnement du TCSC et le troisième, c'est un cas d'une réponse dynamique sont tous satisfaisant et nous ont permis de déduire ce qui suit:

- ✚ Contrôle continu du niveau de compensation série de la ligne de transmission.
- ✚ Contrôle dynamique du transfert de la puissance dans la ligne de transmission sélectionnée au sein du réseau pour permettre une énergie optimale.
- ✚ Supporter la tension.
- ✚ Ainsi, la simulation en temps réel a un grand avantage lors de la conception et du test du TCSC avant l'installation dans le système électrique, pour ses performances dans diverses conditions, gagnant ainsi la confiance du gestionnaire de réseau électrique, pour son contrôle régulier.

En perspective, nous pouvons suggérer une continuité dans les domaines de recherche suivants:

- ✚ Simulation en temps réel -l'intégration des sources des énergies renouvelables dans les réseaux intelligents.
- ✚ Réaliser des simulations HIL de microréseau plus complet.
- ✚ La simulation numérique ou hybride (partie numérique + partie physique) temps-réel des grands réseaux, si on arrive à simuler correctement les grands réseaux en temps-réel, on peut résoudre la plupart des problèmes connus, notamment pour l'aide à la conduite de ces réseaux.

Les simulateurs temps réel sont l'avenir de nombreux domaines de l'ingénierie.

Bibliographie

- [1] **M.Mankour**, « Simulation en temps réel des systèmes HVDC:Application aux réseaux d'interconnexion », thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, Département de Génie Electrique, 2017/2018.
- [2] **A.Hinda**, « Modélisation et Simulation d'un Dispositif STATCOM en Temps Réel dans un Réseau D'énergie Electrique», Mémoire de magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, juillet 2009.
- [3] **A.Hinda**, «Modélisation et Simulation en Temps Réel des Dispositifs FACTS Dédiés aux Systèmes Électriques», Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, 2020/ 2021.
- [4] **E.Kaid, M.Hamada**, « Simulation en temps réel avec le Simulateur RT-LAB applications en type MIL sur « Drive models », Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, Faculté de la Technologie, Département d'Electrotechnique 2019-2020.
- [5] **Manuels et Documentation OPAL-RT/OP101.**
- [6] **Opal-RT Technologies Inc.**, « ARTEMIS v l .2 User's Manual ».
- [7] **Site Internet:** <http://www.opal-rt.com/fr/produit/artemis>.
- [8] **O. Mohammed et N. Abed**, "Real-time simulation of electric machine drives with hardware-in-the-loop," COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 27(4), pp. 929-938, 2008.
- [9] **NATIONAL INSTRUMENTS**, «Principes de base de LabView », Edition de Août 2006.
- [10] **A.Oucif**, « Modélisation et commande d'un compensateur TCSC », Mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf M'sila, Faculté de technologie département de génie électrique, 2015 / 2016.
- [11] **O.L.Bekri**, « Contribution à l'étude des systèmes FACTS (Flexible AC Transmission Systems) et leurs emplacements optimaux dans les réseaux électriques», Thèse de doctorat, Université Djillali liabes de SIDI-BEL-ABBES, Faculté de Technologie, Département d'Électrotechnique, 22/ 04 /2013.
- [12] **A. Derdouri et S. Bouskaya**, « Compensation dynamique de la puissance réactive (Etude comparative SVC et TCSC), » Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhdar d'El-Oued, Faculté de Technologie, Département Génie Électrique, 2018/2019.
- [13] **D.Jovicic et G.N.Pillai**, "Analytical Modelling of TCSC Dynamics" IEEE® Transactions

Bibliographie

on Power Delivery, vol 20, Issue 2, April 2005, pp. 1097-1104

Annexes

Annexe A

Comparaison des coûts des contrôleurs FACTS [11]

Contrôleurs FACTS	Coût (US \$)
Condensateur Shunt	\$8/Kvar
Condensateur Série	\$20 /Kvar
SVC	\$40/Kvar
TCSC	\$40/Kvar
STATCOM	\$50/Kvar
UPFC Partie Série	\$50/Kvar
UPFC Partie Shunt	\$50/Kvar

Tableau A : Comparaison des coûts des contrôleurs FACTS.

Annexe B
Paramètres de la ligne HT

La première source de tension	
La tension	539e3 KV
la fréquence	60 Hz
La ligne de transmission	
Resistance	6.0852 Ohm
Inductance	0.4323 H
Le TCSC	
Tension de primaire	539e3 KV
tension secondaire	477.8e3 KV
Fréquence	60 Hz
Capacité	21.977 μ F
TCR Inductance	0.043 H
factor de Qualité	500
La deuxième source de tension	
La tension	477.8e3 KV
La fréquence	60 Hz

Tableau B : Paramètre de la ligne HT avec TCSC.