



**HAL**  
open science

**Modélisation électrique et énergétique des  
supercondensateurs et méthodes de caractérisation :  
Application au cyclage d'un module de  
supercondensateurs basse tension en grande puissance**

Nassim Rizoug

► **To cite this version:**

Nassim Rizoug. Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance. Energie électrique. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2006. Français. NNT: . tel-00012169

**HAL Id: tel-00012169**

**<https://theses.hal.science/tel-00012169v1>**

Submitted on 21 Apr 2006

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

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

ECOLE CENTRALE DE LILLE  
UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

# THÈSE

présentée en vue d'obtenir le grade de

## DOCTEUR

en  
Génie Electrique

par

**Nassim RIZOUG**

INGENIEUR DE L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

Doctorat délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Lille et  
l'Université des Sciences et Technologies de Lille.

---

---

## **Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance**

---

---

Soutenance prévue pour le 28 Février 2006 devant le jury composé de :

B. MULTON (SATIE)	Rapporteur
G. COQUERY (INRETS)	Rapporteur
A. RUFER (EPFL)	Examineur
J.P. HAUTIER ( L2EP)	Examineur
R. GALLAY (MAXWELL)	Examineur
P. BAUDESSON (STIE/Schneider Electric)	Examineur
P. BARTHOLOMEUS (L2EP)	
P. LE MOIGNE (L2EP)	

Thèse préparée dans le laboratoire, L2EP, à l'Ecole Centrale de Lille  
sous la direction du Professeur Philippe LEMOIGNE



# *Remerciements*

---

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Electrotechnique et Electronique de Puissance (L2EP) au sein de l'équipe « Electronique de Puissance » à l'Ecole Centrale de Lille, sous la direction du professeur Philippe LE MOIGNE, et co-encadré par monsieur Patrick BARTHOLOMEÛS. Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une allocation de recherche ministère et avec le soutien de fonds européen de développement régional (FEDER) pour le développement du banc de test.

Je tiens à remercier monsieur Philippe LE MOIGNE, professeur à l'Ecole Centrale de Lille et responsable de l'équipe E.P. du L2EP, pour la confiance qu'il m'a accordé et pour son accueil au sein de l'équipe. Ses conseils et ses critiques ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements sont adressés à monsieur Patrick BARTHOLOMEÛS, maître de conférences à l'Ecole Centrale de Lille, pour son aide précieuse, ses qualités scientifiques et humaines. Sa maîtrise de l'instrumentation m'a permis d'acquérir des savoir-faire dans ce domaine. Je souhaite lui exprimer toute ma gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Jean Paul HAUTIER, professeur à L'ENSAM de Lille et directeur du L2EP, pour l'honneur qui nous a fait en acceptant d'être président du jury.

Il m'est agréable de pouvoir exprimer ma reconnaissance envers,

Monsieur Bernard MULTON, professeur à ENS Cachan, chercheur au laboratoire Systèmes et Application des Technologies de l'Information et de l'Energie (SATIE),

Monsieur Gérard COQUERY, Directeur de recherche du Laboratoire des Technologies Nouvelles à l'institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS-LTN),

pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail et d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je suis honoré que monsieur Alfred RUFER, professeur à l'école polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) et responsable du laboratoire d'électricité industrielle (LEI) ait accepté de participer à mon jury de thèse.

Je tiens à remercier :

Monsieur Roland GALLAY, responsable R&D chez MAXWELL TECHNOLOGIES et Monsieur Philippe BAUDESSON, responsable innovation chez STIE pour avoir collaborer avec notre laboratoire et pouvoir bénéficier de leurs expériences dans le domaine des composants de puissance

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les membres du L2EP, pour l'aide et les conseils qu'ils m'ont fourni durant la réalisation de cette thèse.

**A tous les membres de ma famille je dis merci.**



*A ma grand-mère*  
*A mes parents*



# Résumé

---

Ce mémoire présente un travail sur le comportement électrique et énergétique des supercondensateurs dans des applications de type traction électrique. Il développe un outil de caractérisation du comportement des supercondensateurs afin de les exploiter dans les applications « courant fort » telles que le transport. Le banc de test développé dans notre laboratoire a permis la caractérisation d'un module de supercondensateurs 112F-48V constitué de 24 composants Maxwell 2700F/2,3V.

En premier lieu, la modélisation du composant nous a paru indispensable pour représenter le comportement de ces composants. Pour cela, deux modèles représentant le comportement énergétique et électrique des supercondensateurs ont été développés. Différentes approches connues ont été confrontées pour aboutir à une méthode simple d'identification, associant des mesures temporelles et fréquentielles.

En utilisant ces modèles, une caractérisation de quatre éléments du module avec un suivi de l'évolution des caractéristiques de chaque élément a été effectuée en fonction de la température. D'autre part, l'observation du vieillissement du module et d'un élément de ce dernier pour les 200.000 premiers cycles a permis de suivre la dégradation des caractéristiques ( $R$ ,  $r_s$  et  $C$ ) des supercondensateurs en fonction du nombre de cycles effectués.

Enfin, un des objectifs initiaux était d'aborder le problème de mise en série du composant afin de l'utiliser en Génie Electrique. Les essais de cyclage réalisés sans dispositif d'équilibrage (hormis les impédances du système de mesure) ont permis d'observer une dispersion naturelle des tensions dépendant de la localisation du composant dans le module.

## Mots clés

---

1	MODULE DE SUPERCONDENSATEURS	5	CARACTERISATION
2	BANC D'ESSAI	6	DESEQUILIBRE DE TENSION
3	CYCLAGE	7	EFFET DE LA TEMPERATURE
4	MODELES	8	VIEILLISSEMENT

# Abstract

---

This document presents a study of the electrical and energetic behaviour of supercapacitors under conditions similar to industrial applications' ones. For that, a test bench has been developed in our laboratory in order to characterize a supercapacitors' module (112F-48V) composed of 24 elements of 2700F/2,3V.

The goal of this work was firstly to evaluate the precision of the existing model about the electrical and energetic characteristics and secondly to improve this precision. For that, two models representing the energetic and electrical behaviour of these components are developed. These models are obtained by a simple identification of the data measured during the cycling tests using frequential and temporal approaches.

Numerous electrical and thermal data are obtained during the cycling test of the module. These data are used to observe the evolution of the equivalent capacity and resistance of several supercapacitor elements of the tested module according to the temperature. For the first 200.000 cycles, the ageing process of supercapacitors and the variation of the module parameters during all the life of this tested module are presented. This study allowed to obtain information about the degradation (R, rs and C) according to the number of cycles carried out.

Finally, the tests of cycling done without balancing device (except the impedance of the measurement system) allow to observe a natural dispersion of the voltage according to the position of the components in the module.

## Keywords

---

**1** SUPERCAPACITORS' MODULE  
**2** TEST BENCH  
**3** CYCLING  
**4** MODELS

**5** CHARACTERIZATION  
**6** IMBALANCE  
**7** AGEING PROCESS

---

---

# Table des matières

---

---

# Table des matières

## \*\*\*\*\* *Chapitre I* \*\*\*\*\*

<b>I.1.PRINCIPE .....</b>	<b>5</b>
I.1.1. MATERIAUX D'ELECTRODES .....	5
I.1.2. L'ELECTROLYTE .....	7
I.1.3. LE SEPARATEUR.....	7
<b>I.2.INTERET DES SUPERCONDENSATEURS.....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.DOMAINES D'APPLICATION DES SUPERCONDENSATEURS .....</b>	<b>9</b>
I.3.1. SYSTEMES ISOLES : .....	9
I.3.2. SYSTEMES HYBRIDES : .....	10
<b>I.4.PROBLEMATIQUE DE NOTRE ETUDE.....</b>	<b>13</b>
I.4.1. CONTRAINTES AGISSANT SUR LE VIEILLISSEMENT DES SUPERCONDENSATEURS ...	13
I.4.2. MISE EN SERIE DES ELEMENTS SUPERCONDENSATEURS .....	14
I.4.3. PROCESSUS DE VIEILLISSEMENT DES SUPERCONDENSATEURS .....	15
<b>I.5.STRATEGIE DEVELOPPEE.....</b>	<b>16</b>
I.5.1. MODELISATION : .....	17
I.5.2. ETUDE EXPERIMENTALE : .....	18
<b>I.6.CONCLUSION .....</b>	<b>19</b>

# ☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆ *Chapitre II* ☆☆☆☆☆☆☆☆☆

---

<b>II.1.MODELE « CONSTRUCTEUR » RC-CC :</b> .....	<b>29</b>
II.1.1 IDENTIFICATION DE LA RESISTANCE SERIE (RC) ET DE LA CAPACITE DE STOCKAGE (CC) :	29
II.1.2. LIMITES DU MODELE RC-CC:	30
<b>II.2.MODELE BASE SUR UNE CARACTERISATION FREQUENTIELLE DES SUPERCONDENSATEURS [C2-10, C2-11]</b> .....	<b>33</b>
II.2.1. MODELE FREQUENTIEL.....	33
II.2.2. TRANSFORMATION DU MODELE FREQUENTIEL EN UN MODELE CIRCUIT :	36
II.2.3. CARACTERISATION AVEC INJECTION D'UN SIGNAL RICHE EN FREQUENCE .....	40
II.2.4. INJECTION D'UN HARMONIQUE 50HZ AVEC LE COURANT DE CYCLAGE .....	43
<b>II.3.MODELE TEMPOREL A CONSTANTES REPARTIES (MODELE ANALYTIQUE)</b> .....	<b>45</b>
II.3.1. LIMITES DU MODELE ANALYTIQUE.....	47
<b>II.4.MODELES A CONSTANTES LOCALISEES :</b> .....	<b>47</b>
II.4.1. MODELE A DEUX BRANCHES [C2-7] :	48
II.4.2. MODELE MULTI-BRANCHES [C2-14] :	50
<b>II.5.METHODE PROPOSEE POUR L'IDENTIFICATION D'UNE LIGNE DE TRANSMISSION</b> .....	<b>56</b>
II.5.1. LIEN ENTRE LES MODELES CIRCUITS ISSUS DES APPROCHES FREQUENTIELLES ET TEMPORELLES :	57
II.5.2. LIMITES DU MODELE UTILISE.....	60
<b>II.6.APPROCHE ENERGETIQUE DES MODELES [C2-16]</b> .....	<b>60</b>
II.6.1. MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE REQ - CEQ EXTRAIT DE LA LIGNE DE TRANSMISSION.....	61
II.6.2. BILAN SUR LES DIFFERENTS TYPES DE CAPACITES APPLIQUES AUX SUPERCONDENSATEURS .....	74
II.6.3. VALIDATION DU MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE POUR DES ESSAIS A PUISSANCE CONSTANTE (DIAGRAMME DE RAGONE) .....	75
<b>II.7.CONCLUSION</b> .....	<b>82</b>

# \*\*\*\*\* *Chapitre III* \*\*\*\*\*

---

<b>III.1.LE BANC DE TEST .....</b>	<b>92</b>
III.1.1. LES MODULES SUPERCONDENSATEURS .....	93
III.1.2. LE CONVERTISSEUR .....	94
III.1.3. DESCRIPTION DES ENTREES-SORTIES DU SYSTEME D'ACQUISITION .....	97
III.1.4. PRINCIPE DU CYCLAGE .....	100
<b>III.2.FONCTIONNEMENT DU BANC EN CYCLAGE .....</b>	<b>101</b>
III.2.1. INITIALISATION DU MATERIEL ET DE LA TENSION DES DEUX MODULES.....	102
III.2.2. CYCLAGE ET ACQUISITIONS .....	102
III.2.3. GESTION DE L'ALIMENTATION AUXILIAIRE .....	103
III.2.4. SCRUTATION.....	103
III.2.5. GESTION DES DEFAUTS .....	103
III.2.6. CONTROLE DE LA TEMPERATURE DES ELEMENTS .....	104
III.2.7. FONCTIONNEMENT GLOBAL DU PROGRAMME : EXEMPLE DE CYCLE.....	105
<b>III.3.LIMITES DU BANC ET MODELE.....</b>	<b>107</b>
III.3.1. LES PERTES DU BANC .....	107
III.3.2. PHASES DE FONCTIONNEMENT POUR LA CHARGE DU MODULE TESTE .....	108
III.3.3. PREDETERMINATION DES DUREES LIMITEES DE CHARGE.....	109
III.3.4. MODELE DU BANC .....	111
III.3.5. AMELIORATION DES PERFORMANCES DE CYCLAGE DU BANC .....	112
<b>III.4.RENDEMENT DES SUPERCONDENSATEURS.....</b>	<b>113</b>
III.4.1. COMPARAISON DE L'EXPERIMENTATION ET DU MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE .....	114
<b>III.5.PRINCIPE DE CARACTERISATION ET CYCLAGE DU MODULE.....</b>	<b>115</b>
III.5.1. CYCLE UTILISE POUR LE VIEILLISSEMENT .....	116
III.5.2. CYCLE UTILISE POUR LA CARACTERISATION .....	116
III.5.3. REPONSE THERMIQUE DU MODULE SUPERCONDENSATEUR.....	117
<b>III.6.RESULTATS EXPERIMENTAUX DE CARACTERISATION.....</b>	<b>120</b>
III.6.1. DEMARCHE.....	120
III.6.2. CARACTERISATION A L'AIDE DU MODELE SIMPLIFIE DE LA LIGNE DE TRANSMISSION.....	120

III.6.3. CARACTERISATION DU MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE .....	125
III.6.4. COMPARAISON DES RESULTATS DE CARACTERISATION OBTENUS AVEC LES DEUX TYPES DE CYCLES.....	132
<b>III.7.ETUDE DU VIEILLISSEMENT .....</b>	<b>133</b>
III.7.1. METHODES UTILISEES POUR L'ETUDE DU VIEILLISSEMENT .....	133
III.7.2. EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES .....	135
<b>III.8.CONCLUSION .....</b>	<b>138</b>

☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆ *Chapitre IV* ☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆

---

<b>IV.1.MISE EN EVIDENCE EXPERIMENTALE DU DESEQUILIBRE .....</b>	<b>146</b>
IV.1.1. CONTEXTE DE CETTE ETUDE .....	146
IV.1.2. CONFIGURATION MATERIELLE .....	146
IV.1.3. PROCEDURE EXPERIMENTALE .....	146
IV.1.4. RESULTATS EXPERIMENTAUX .....	148
IV.1.5. CORRELATION ENTRE LA TEMPERATURE DES ELEMENTS DU MODULE ET L'EVOLUTION DE LEUR DESEQUILIBRE DE TENSION .....	150
<b>IV.2.INFLUENCE DES PARAMETRES DES MODELES POUR LA MISE EN SERIE.151</b>	
IV.2.1. MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE REQ - CEQ.....	152
IV.2.2. MODELE AMELIORE DE LA LIGNE DE TRANSMISSION .....	154
<b>IV.3.CONSIDERATIONS SUR LES FUITES .....</b>	<b>160</b>
IV.3.1 METHODE DE MESURE.....	160
IV.3.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	161
IV.3.3 REMARQUES SUR LES RESULTATS DES ESSAIS DE FUITE .....	163
<b>IV.4. CONCLUSION .....</b>	<b>164</b>



---

---

# Introduction générale

---

---



# Introduction générale

---

---

De nos jours, le transport collectif urbain s'impose comme une alternative pour remplacer les moyens individuels de déplacement. L'utilisation de ces derniers comme outil de transport montre aujourd'hui ses limites : embouteillage, pollutions atmosphériques (dégagement important de CO<sub>2</sub>, maladies respiratoires...), pollutions sonores, pollutions visuelles, surfaces au sol occupée (encombrements...). En conséquence, les responsables d'agglomérations cherchent à dynamiser les transports en commun afin de résoudre en partie ces problèmes, ceci étant une question de responsabilité associée à un enjeu économique majeur. Toutefois, les contraintes du transport public urbain sont très nombreuses et variées. La dimension environnementale devient en effet une donnée stratégique que les « transporteurs » intègrent dans leur démarche de la conception à la fabrication. Par ailleurs, il doit être rentable, avec une infrastructure légère, sans pollution directe donc électrique, souple d'utilisation et évolutif afin que les divers investissements ne soient pas remis en cause au bout de quelques années. Ceci implique le développement de stratégies nouvelles, permettant une optimisation de la consommation énergétique du système.

C'est dans ce contexte que le L2EP s'est impliqué en 1997/2000 sur un projet proposé par BOMBARDIER TRANSPORT et soutenu par le GRRT (Groupement Régional pour la Recherche dans les Transports). Le but de ce travail était de remplacer les caténaires des tramways par un réservoir d'énergie électrique embarqué de nouvelle génération, à savoir les supercondensateurs. En effet, l'utilisation d'une technologie de réservoir d'énergie électrique capable de supporter des charges/décharges très rapides et possédant une importante durée de vie était la clé du concept proposé. Ce travail basé sur le dimensionnement de la batterie de supercondensateurs embarqué a amené une multitude d'interrogations sur son comportement énergétique et électrique. Par ailleurs, la maîtrise et la compréhension de son comportement semblent primordiales pour une meilleure optimisation de sa durée de vie. C'est dans ce cadre et dans cette optique que le L2EP s'est investi dans le développement d'un banc d'essai testant un module de supercondensateurs de la marque EPCOS, initialement constitué de 28 éléments Maxwell 2700 Farads, afin d'aborder le comportement réel des supercondensateurs subissant des contraintes proches des applications à courant fort. Les éléments constituant ce banc ont été financés par ce projet (fonds FEDER). Mon travail de thèse s'est ainsi intégré dans le prolongement de cette étude avec cette fois une « vision composant » et a dû aborder des aspects théoriques (modélisation) et pratiques (banc d'essai, caractérisation, vieillissement).

L'architecture choisie du banc et les moyens de mesures envisagés avaient pour objectif de permettre notamment:

- ✓ Une consommation limitée du banc de test
- ✓ Un cyclage continu du module avec un profil de courant réglable
- ✓ Une surveillance du comportement thermique des supercondensateurs

- ✓ Une surveillance du comportement électrique des composants (v,i)
- ✓ Un stockage des données afin de permettre leur exploitation ultérieure
- ✓ L'identification des problèmes de mise en série

Mon travail de thèse avait pour objectif de travailler sur les aspects modélisation afin de pouvoir exploiter les données obtenues, de participer à la mise au point du banc, et des méthodes et outils de caractérisation. L'idée de fond était de chercher à identifier les paramètres importants faisant apparaître les qualités et défauts de ce composant au travers d'une étude de vieillissement.

Le mémoire est décomposé en quatre chapitres :

- le *premier chapitre* présente le principe de fabrication et les avantages des supercondensateurs, ainsi que les applications qui ont bénéficiées ou qui peuvent bénéficier de cette technologie. Dans la deuxième partie du chapitre, le problème de vieillissement des supercondensateurs est posé ainsi que l'approche développée au cours de l'étude pour la caractérisation du module étudié.
- le *deuxième chapitre* présente une étude synthétique des principaux modèles existants dans la littérature. Elle aboutit à deux modèles qui seront utilisés dans le cadre de cette étude. Ces modèles se distinguent par les méthodes de caractérisation utilisées où on propose une combinaison de différentes méthodes de caractérisation (fréquentielle et temporelle) afin d'exploiter les avantages des deux méthodes. Les deux modèles proposés seront validés électriquement et énergétiquement.
- le *troisième chapitre* présente l'architecture du banc développé au laboratoire ainsi que son mode opératoire. Ces parties seront par la suite modélisées et intégrées avec le modèle du supercondensateur afin de constituer un modèle global du banc de test. Ce modèle global permet de préparer les essais et sert à l'étude du comportement des composants dans le module et à l'analyse des résultats. La deuxième partie du chapitre présente la caractérisation de quatre éléments du module supercondensateur à un moment donné de leur vie (après 130.000 Cycles). Pour cette caractérisation, on utilise les deux modèles proposés et on effectue une étude comparative des caractéristiques obtenues. En fin de chapitre, une caractéristique de vieillissement montrant l'évolution des caractéristiques des éléments du module ainsi que les caractéristiques moyennes du module est présentée.
- Le *quatrième chapitre* aborde les phénomènes lents négligés dans les parties précédentes. Un déséquilibre en tension apparaît en effet entre les différents éléments supercondensateurs au cours d'une longue utilisation (cyclage). Le but de ce chapitre est d'identifier les paramètres influents des modèles, vis-à-vis de ce comportement.

## *Chapitre 1 :*

*Supercondensateur :  
Principe, application et  
approche de l'étude*



# Table des matières



## Chapitre 1 : Supercondensateur : Principe, application et approche de l'étude

<b>I.1. PRINCIPE</b> .....	<b>5</b>
I.1.1.  MATERIAUX D'ELECTRODES .....	5
I.1.1.1.  Le charbon actif.....	6
I.1.1.2.  Les tissus activés.....	6
I.1.2.  L'ELECTROLYTE .....	7
I.1.3.  LE SEPARATEUR.....	7
<b>I.2. INTERET DES SUPERCONDENSATEURS</b> .....	<b>7</b>
<b>I.3. DOMAINES D'APPLICATION DES SUPERCONDENSATEURS</b> .....	<b>9</b>
I.3.1.  SYSTEMES ISOLES : .....	9
I.3.2.  SYSTEMES HYBRIDES : .....	10
I.3.2.1.  Couplage réseaux-supercondensateurs : .....	11
I.3.2.2.  Hybridation embarquée : .....	13
<b>I.4. PROBLEMATIQUE DE NOTRE ETUDE</b> .....	<b>13</b>
I.4.1.  CONTRAINTES AGISSANT SUR LE VIEILLISSEMENT DES SUPERCONDENSATEURS .....	13
I.4.2.  MISE EN SERIE DES ELEMENTS SUPERCONDENSATEURS .....	14
I.4.3.  PROCESSUS DE VIEILLISSEMENT DES SUPERCONDENSATEURS.....	15
<b>I.5. STRATEGIE DEVELOPPEE</b> .....	<b>16</b>
I.5.1.  MODELISATION : .....	17
I.5.2.  ETUDE EXPERIMENTALE : .....	18
<b>I.6. CONCLUSION</b> .....	<b>19</b>

# Chapitre 1

## Supercondensateur : Principe, applications et approche de l'étude

L'utilisation d'un système de stockage d'énergie est souvent nécessaire pour les applications de type traction électrique. Le composant de stockage est utilisé :

- dans les systèmes isolés où il alimente des dispositifs demandant une énergie réduite
- dans les systèmes hybrides où il joue un rôle en terme d'apport de puissance ou d'énergie selon l'application (ex : phases d'accélération ou de freinage).

Jusqu'à maintenant, les systèmes les plus utilisés sont les accumulateurs qui ont une puissance spécifique et une autonomie relativement élevée. Les condensateurs classiques ont une autonomie insuffisante, mais possèdent une puissance spécifique incomparable. Les supercondensateurs apparaissent comme des composants intermédiaires en terme de propriétés énergétiques qui les rendent très intéressants car il n'ont pratiquement pas de concurrents dans ce domaine.



Fig.1.1. : Exemple des supercondensateurs du fabricant EPCOS

## I.1. Principe

Dans un condensateur, l'énergie emmagasinée est liée à la valeur de  $C$  et à la tension de service  $E = \frac{1}{2} C V^2$ , où  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{D}$  ( $S$  : surface en regard,  $D$  : épaisseur diélectrique).

Si on veut accroître la capacité de stockage, il faut augmenter la permittivité relative ou accroître la valeur du rapport  $\frac{S}{D}$ . Le principe de base des supercondensateurs est lié à la valeur élevée de  $\frac{S}{D}$ . Ainsi, les charges se trouvent localisées sur des surfaces très importantes (électrodes poreuses) et à des distances très faibles. Il y a création de 2 zones de charge d'espace (principe de double couche électrochimique) (Figure.1.2.) où apparaissent les ions de l'électrolyte et les charges opposées au sein de l'électrode [C1-1].

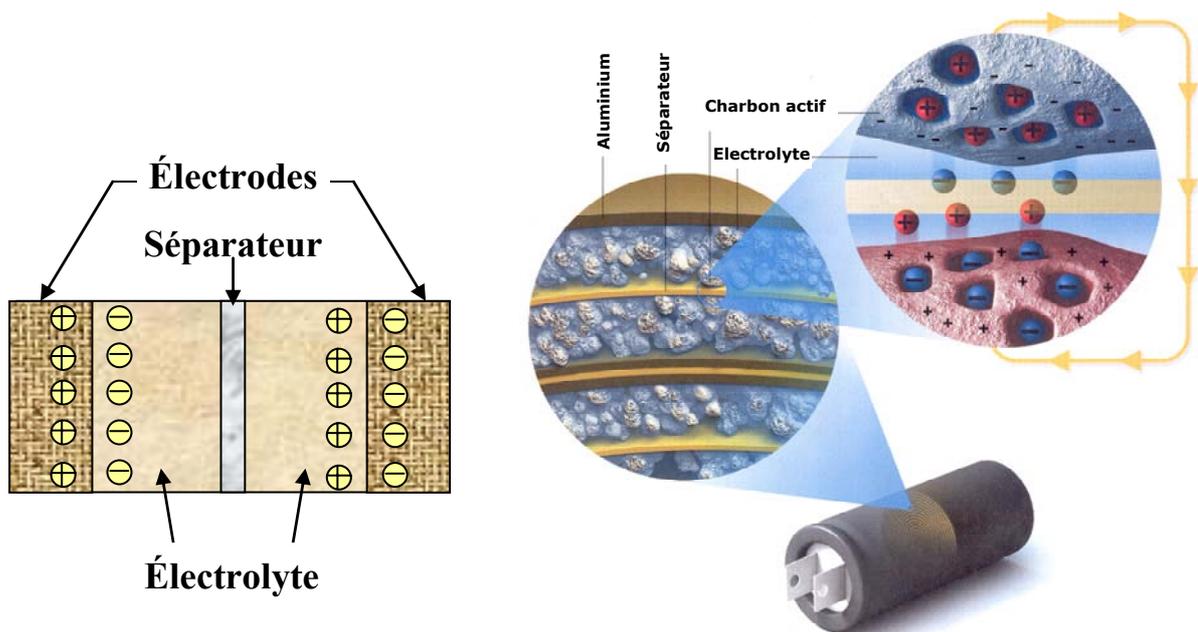


Fig.1.2. : Création des couches double électrique

Un supercondensateur peut être schématisé par deux capacités représentatives des charges stockées connectées par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte (Figure.1.3.).

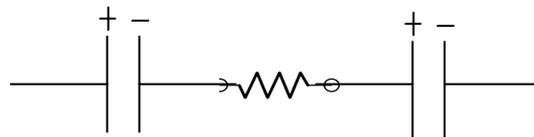


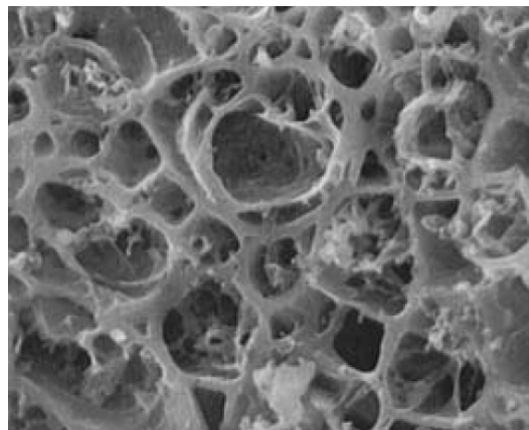
Fig.1.3. : Schéma représentatif d'un supercondensateur

### I.1.1. Matériaux d'électrodes

Il existe différents types de composés carbonés pouvant servir de matériaux d'électrodes polarisables. En particulier, les charbons actifs et les fibres de tissu activé, qui possèdent des surfaces actives très importantes et permettent d'accroître la capacité.

### **1.1.1.1. Le charbon actif**

Le charbon actif est un composé carboné. Les procédés de fabrication des carbones activés sont de deux types : l'activation dite « physique » et l'activation « chimique ». Il existe divers types de charbon actif ayant des surfaces spécifiques comprises entre 100m<sup>2</sup>/g et 2500m<sup>2</sup>/g. La tendance actuelle est d'utiliser des charbons de surfaces comprises entre 700 et 1800 m<sup>2</sup>/g. Des études récentes montrent qu'une surface trop développée a deux inconvénients : une capacitance volumique relativement faible et un taux d'oxygène trop élevé [C1-2]. D'autres études dans ce domaine ont montré que la résistance est plus faible et les caractéristiques électrochimiques meilleures lorsque la taille des pores est adaptée à la taille de l'ion actif dans la double couche. Enfin un taux d'impuretés métalliques trop important (>100ppm) entraîne une autodécharge importante. La figure suivante montre la structure carbonée de base.



**Fig.1.4. : Structure microscopique d'une électrode au charbon actif (porosité de type cylindrique)**

### **1.1.1.2. Les tissus activés**

Ce sont des produits basés sur l'utilisation de fibres polymères ayant subi une calcination et une activation. Les surfaces spécifiques actives atteignent là encore 2000 m<sup>2</sup>/g. Par rapport aux charbons actifs, ces produits présentent des porosités bien supérieures, une meilleure conductivité électronique avec moins d'impuretés [C1-3, C1-4, C1-5, C1-6, C1-7]. Le seul désavantage de ce type d'électrode est le coût très supérieur par rapport à la technologie basée sur les charbons actifs. La figure suivante montre la structure d'un tissu activé, observé en microscopie électronique :



**Fig.1.5. : Structure microscopique d'un tissu activé**

### I.1.2. L'électrolyte

Le choix de l'électrolyte se base sur deux critères : la conductivité et le potentiel maximal supporté par l'électrolyte. Il existe deux types d'électrolyte : aqueux comme H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou KOH qui possèdent un domaine de potentiel limité, mais une conductivité élevée. L'autre solution est l'utilisation d'un électrolyte organique (tel que le Carbonate de Propylène) avec un domaine de potentiel plus élevé mais une conductivité plus faible. L'électrolyte peut être liquide ou polymère (plastique ou gel). Afin d'obtenir des densités de puissances importantes, la technologie "film mince-électrolyte liquide" semble la mieux adaptée.

### I.1.3. Le séparateur

Il existe peu de solutions pour le séparateur : le séparateur le plus utilisé est sans doute le Celgard, mais il existe aussi des séparateurs celluloseux [C2-8, C2-9, C2-10].

## I.2. Intérêt des supercondensateurs

Les premiers supercondensateurs avaient une résistance série élevée, ce qui induisait un rendement moyen et une puissance spécifique limitée. Au cours des dernières années, on a assisté à un très grand effort de la part des fabricants afin de diminuer la résistance interne, augmenter la capacité de stockage, ainsi que la tension nominale de fonctionnement. Le tableau suivant [C1-11] donne l'illustration de l'évolution des performances des supercondensateurs.

Tension Nominale	Capacité (F)	Volume (L)	Résistance série (mΩ)	Puissance Spécifique	Energie Spécifique	Courant (A)
2.3V	100	0.031	8	4.5 kW/kg ; 5.4 kW/l	2.0 Wh/kg ; 2.4 Wh/l	30
	600	0.183	2	2.3 kW/kg ; 3.6 kW/l	1.5 Wh/kg ; 2.4 Wh/l	300
	1800	0.26	0.4	10.7 kW/kg ; 12.8 kW/l	4.5 Wh/kg ; 5.1 Wh/l	–
	2300	0.59	0.5	3.6 kW/kg ; 4.5 kW/l	2.3 Wh/kg ; 2.9 Wh/l	400
	2700	0.60	0.6	3.0 kW/kg ; 3.7 kW/l	2.7 Wh/kg ; 3.3 Wh/l	400
	3600	0.59	0.59	1.7 kW/kg ; 1.9 kW/l	4.1 Wh/kg ; 4.5 Wh/l	200
2.5V	200	0.047	1.8	16 kW/kg ; 18 kW/l	3.2 Wh/kg ; 3.7 Wh/l	50
	600	0.14	0.6	16.3 kW/kg ; 18.8 kW/l	3.3 Wh/kg ; 3.8 Wh/l	300
	1200	0.23	0.4	13 kW/kg ; 17.3 kW/l	3.5 Wh/kg ; 4.6 Wh/l	300
	2700	0.52	0.23	11.3 kW/kg ; 13 kW/l	3.9 Wh/kg ; 4.5 Wh/l	500
	3600	0.64	0.2	11.2 kW/kg ; 12.3 kW/l	4.5 Wh/kg ; 4.9 Wh/l	500
	5000	0.80	0.25	7.4 kW/kg ; 7.8 kW/l	5.1 Wh/kg ; 5.4 Wh/l	500
2.7V	2600	0.36	0.28	4.1 kW/kg	5.6 Wh/kg	500

Tab. 1.1- Evolution des caractéristiques des supercondensateurs Maxwell

La fabrication des composants MAXWELL a commencé avec la gamme 2,3V. Pour cette gamme, la capacité ne dépassait pas 3600F, et le courant 400A. La seconde gamme utilise une tension nominale de 2,5V, ce qui implique une augmentation importante de l'énergie stockée. Ils présentent également des résistances séries bien plus faible, ce qui améliore leur puissance spécifique. Ainsi, un supercondensateur de 5000 F atteint une puissance spécifique de 7,4 kW/kg et une énergie spécifique de 5,1 Wh/kg. Ces résultats ouvrent des perspectives certaines pour construire des systèmes de stockage plus efficaces. Enfin, les composants les plus récents ont une tension nominale de fonctionnement qui atteint actuellement 2.7V.

Les supercondensateurs ont plusieurs atouts pour les applications de traction électrique [C1-12, C1-13]. Leur utilisation comme système de puissance secondaire permet de fournir une source de puissance rapidement disponible lors des phases d'accélération et de freinage. En effet, la constante de temps des condensateurs est plus faible que celle des générateurs électrochimiques classiques (décharge possible en quelques secondes) et les supercondensateurs sont capables de fournir une puissance importante sur un temps très court [C1-14]. De plus, en cas de limitation énergétique, l'utilisation d'un supercondensateur associé à une batterie permet d'augmenter la durée de vie de cette dernière en évitant les décharges profondes lors des appels de puissance. Enfin, ce genre de dispositif possède une bonne cyclabilité (plus de  $5.10^5$  cycles) et une bonne stabilité du fait de l'absence de réactions électrochimiques aux électrodes. Le tableau suivant nous donne une comparaison entre les trois systèmes de stockage.

	Condensateurs classiques	Supercondensateurs	Batteries
Energie Spécifique (Wh.kg <sup>-1</sup> )	<0,1	1 à 10	10 à 150
Puissance spécifique (W.kg <sup>-1</sup> )	<100,000	<10,000	<1,000
Durée de Vie (Cycles)	>500,000	>500,000	1000
Durée de la charge nominale	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-3</sup> secondes	1 à 30 secondes	1 à 5 heures
Durée de la décharge nominale	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-3</sup> secondes	1 à 30 secondes	0,3 à 3 heures
Rendement charge/décharge(%)	>95%	85% à 98%	70% à 85%

Tab. 1.2- Comparaison des différents systèmes de stockage

D'après les données présentées dans ce tableau, les supercondensateurs se positionnent entre les batteries et les condensateurs classiques [C1-15, C1-16, C1-17, C1-18, C1-19]. Leur plus grand avantage est leur énergie spécifique bien plus élevée que celle des condensateurs classiques. Mais l'énergie stockée est 10 fois plus faible que l'énergie stockée dans une batterie. Le problème des batteries classiques réside dans leur faible puissance spécifique qui représente 2% de la puissance spécifique d'un supercondensateur ; dans ce domaine les condensateurs restent indétrônables avec une puissance spécifique qui peut atteindre les 100kW.kg<sup>-1</sup>; ce qui représente dix fois la puissance spécifique d'un supercondensateur. L'autre avantage des supercondensateurs est leur durée de vie importante, avec plus de  $5.10^5$  cycles ou plus de 10 ans.

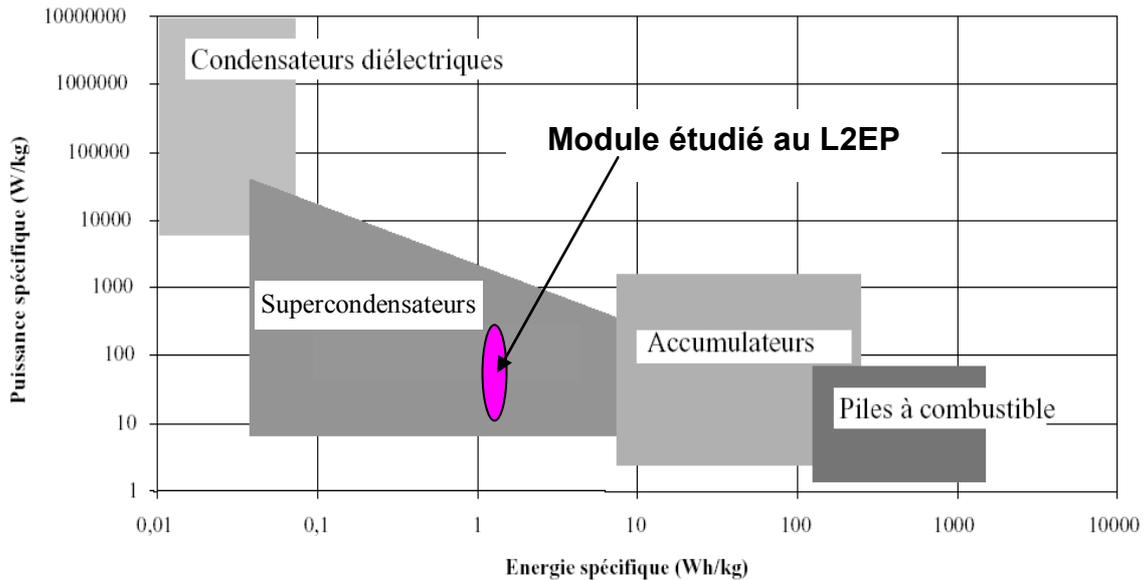


Fig.1.6. : Comparaison des systèmes de stockage [C1-2]

### I.3. Domaines d'application des supercondensateurs

Actuellement, l'évolution des performances et des coûts des supercondensateurs fait qu'un grand nombre de fabricants de systèmes électriques et de laboratoires de recherche dans le domaine de l'électronique de puissance s'intéressent à l'utilisation de ces composants dans les applications présentant des pics de puissance importants par rapport à la puissance moyenne. On peut distinguer deux principales familles. L'une concerne les systèmes isolés pour lesquels seuls les systèmes de faible puissance émergent, l'autre les systèmes hybrides (multi-sources) plus adaptés aux applications de puissance.

#### I.3.1. Systèmes isolés :

Ce concept est applicable pour alimenter les moyens de transport qui ont une distance inter-arrêt réduite, avec recharge des supercondensateurs lors des arrêts. Il existe plusieurs travaux réalisés dans ce domaine ; on peut citer le travail de collaboration entre le L2EP et ANF BOMBARDIER [C1-20] pour l'alimentation d'un tramway sans caténaire (figure 1.7.).

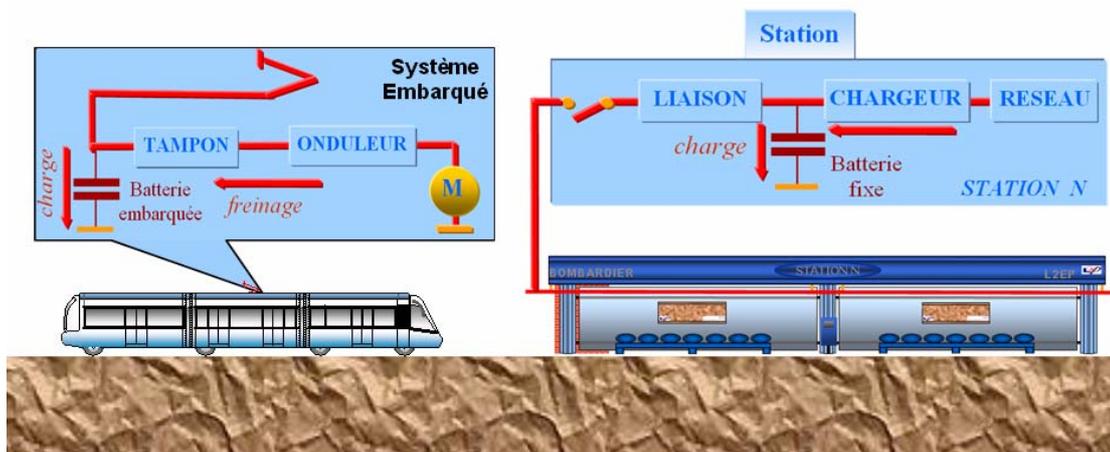


Fig.1.7. : Projet de collaboration entre BOMBARDIER et L2EP

Le but de ce projet était d'utiliser des batteries de supercondensateurs localisées à la fois en station et dans l'engin de transport afin de réaliser des réservoirs de puissance et d'énergie à recharge et décharge très rapides [C1-21]. Le processus de ravitaillement en station s'opère par échange d'énergie entre les deux batteries de supercondensateurs. Ces dernières permettent des recharges rapides limitées naturellement par le temps d'arrêt en station (environ dix secondes), afin de rendre la recharge « transparente » pour l'usagé. L'objectif primaire était, bien sûr, de ne plus avoir de fils suspendus en centre ville (avec éventuellement des tronçons avec/sans caténaires), notamment dans les quartiers inadaptés pour l'implantation de système sécurisé avec une alimentation aérienne du tramway. L'inconvénient de cette solution était le volume important de supercondensateurs embarqués.

Dans ce domaine d'application, on peut citer aussi le projet de bus électrique autonome proposé par le laboratoire d'électronique industrielle de l'école polytechnique fédérale de Lausanne [C1-22, C1-23]. Ce projet dont le principe est similaire au précédent (figures 1.8.-1.9.) avait pour objectif le dimensionnement du système d'alimentation du bus.



**Fig.1.8. : Maquette du Projet de bus autonome proposé par le laboratoire d'électronique industrielle de Lausanne**



**Fig.1.9. : Projet du bus autonome proposé par le laboratoire d'électronique industrielle de Lausanne**

### **1.3.2. Systèmes hybrides :**

Pour les applications de forte puissance, les supercondensateurs sont principalement employés pour une utilisation de type hybride. Ils présentent ainsi une solution d'hybridation des batteries. Ces dernières sont en général moins performantes en ce qui concerne le démarrage, l'accélération, la récupération d'énergie à cause de leurs puissances spécifiques relativement faibles. Aussi, l'adjonction de supercondensateurs peut permettre d'allonger la durée de vie des batteries et d'améliorer les performances du système.

Les supercondensateurs sont utilisés de façon globale pour fournir les pics de puissance dans les systèmes de distribution d'énergie, qu'ils soient embarqués ou non [C1-24, C1-25, C1-26, C1-27, C1-28].

### 1.3.2.1. Couplage réseaux-supercondensateurs :

Les supercondensateurs jouent le rôle de compensateur de puissance instantanée en permettant de lisser la puissance fournie par le réseau [C1-29]. Différentes applications ont été étudiées.

On peut citer l'utilisation de supercondensateurs pour l'alimentation des ascenseurs [C1-30, C1-31]. Dans cette application, les supercondensateurs jouent un double rôle : la récupération d'énergie et le lissage de la puissance prise au réseau.

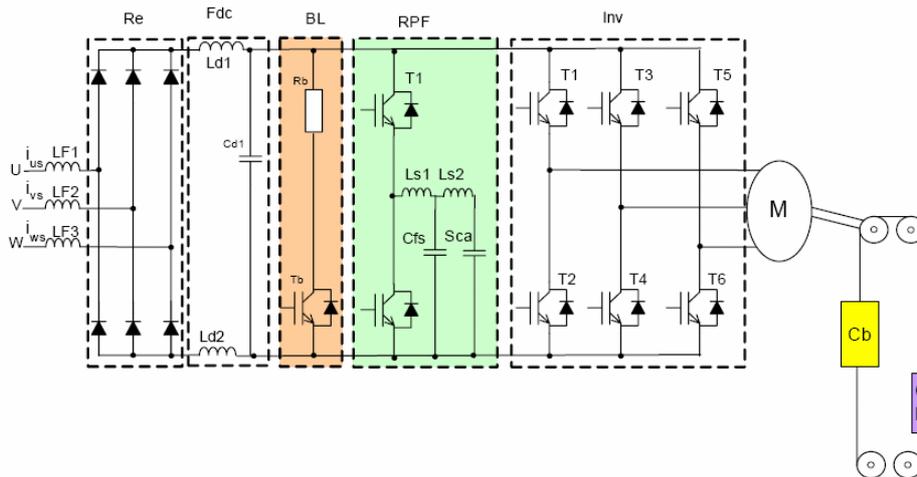


Fig.1.10. : Schéma de l'alimentation d'un ascenseur avec l'utilisation des supercondensateurs [C1-30]

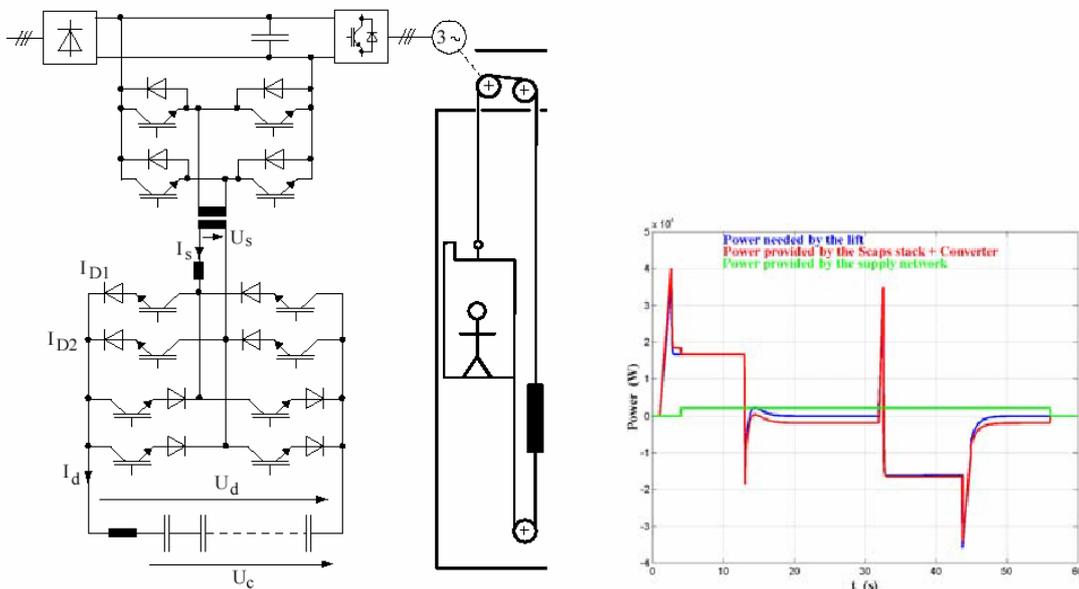


Fig.1.11. : Prototype d'un ascenseur alimenté par des supercondensateurs [C1-31]

On trouve également des travaux sur leur utilisation dans les éoliennes (figure 1.12.), toujours dans un but de lissage de la puissance fournie au réseau.

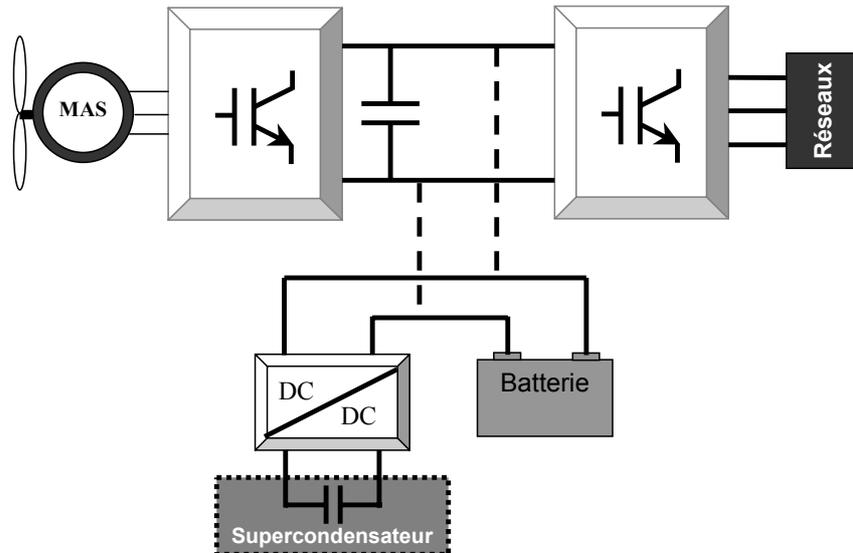


Fig.1.12. : Utilisation des supercondensateurs dans le domaine des éoliennes [C1-32]

Dans le domaine de traction électrique, BOMBARDIER TRANSPORT a depuis deux ans mis en essai un système de tramway qui combine une double alimentation (supercondensateurs et caténaires) (Figure 1.13.) [C1-33]. Ce système propose une utilisation des supercondensateurs moins contraignante qu'avec le système isolé envisagé au L2EP. Le principe de ce système est d'alterner l'utilisation des deux moyens d'alimentation (supercondensateurs et caténaire). Les supercondensateurs sont utilisés sur des tronçons très courts (intersections, carrefours...) où on supprime la caténaire et dans les phases d'accélération et de freinage avec présence de la caténaire de façon à limiter la puissance fournie par cette dernière. Avec ce système, le gain de consommation affiché est d'environ 30% sur une année.



Fig.1.13. : Prototype du tramway fabriqué par BOMBARDIER avec l'utilisation du supercondensateur comme alimentation secondaire

### 1.3.2.2. Hybridation embarquée :

Les supercondensateurs représentent une solution alternative vis à vis des batteries. On peut citer à titre d'exemple ce que fait HONDA avec la FCX [C1-34]. Cette voiture électrique regroupe deux systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs et réservoir à hydrogène). La pile à combustible joue le rôle de générateur et les supercondensateurs fournissent les variations de puissance (phase d'accélération/freinage) afin de solliciter de façon limitée la pile durant les phases dynamiques.

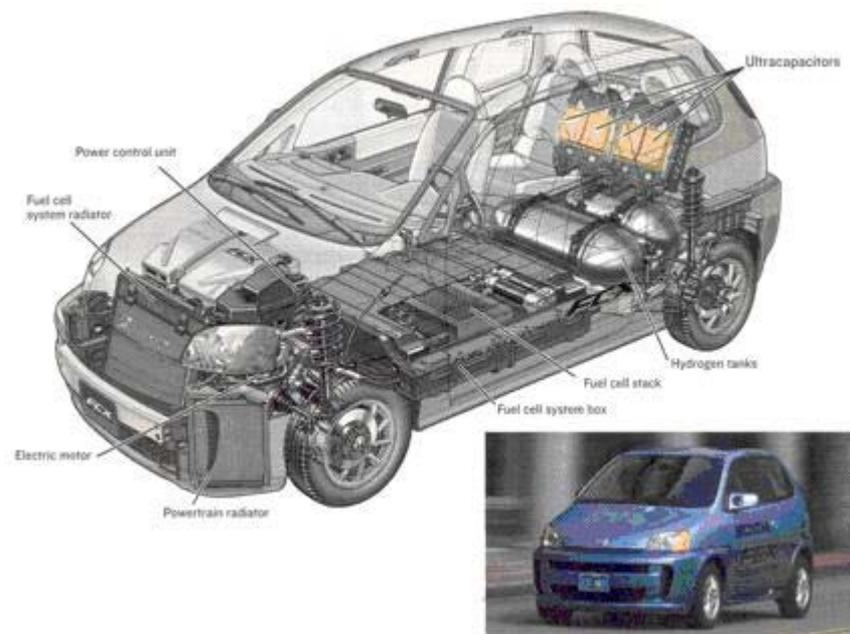


Fig.1.14. : Prototype d'une voiture hybride proposé par HONDA

## 1.4. Problématique de notre étude

### 1.4.1. Contraintes agissant sur le vieillissement des supercondensateurs

Comme on l'a expliqué précédemment, les supercondensateurs possèdent une bien meilleure durée de vie que les systèmes électrochimiques classiques. Cet avantage n'est pas absolu et dépend des conditions d'utilisation. Deux principaux paramètres peuvent agir sur la dégradation des performances des éléments supercondensateurs [C1-35, C2-36] :

- ✓ La tension d'utilisation des composants
- ✓ La température des éléments supercondensateurs

La figure 1.15. proposée par le fabricant EPCOS illustre l'évolution de la durée de vie d'un élément supercondensateur en fonction de la tension d'utilisation pour différentes températures [C1-25].

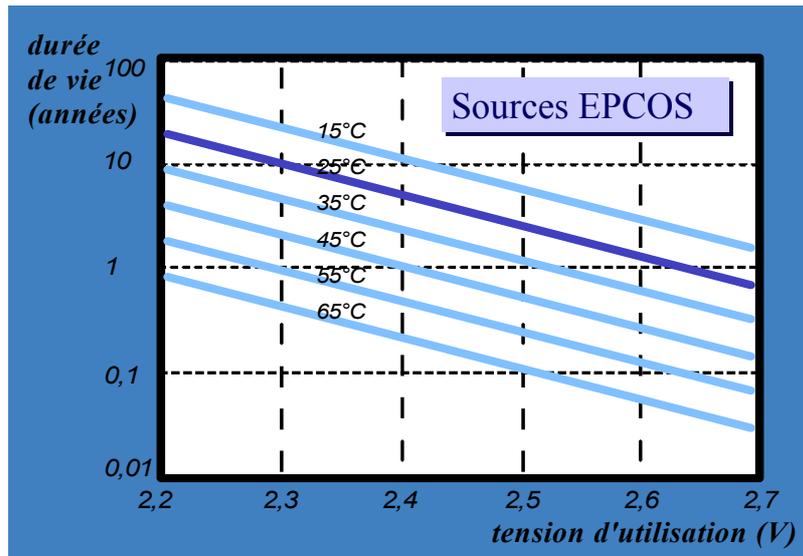


Fig.1.15. : Evolution de la durée d'un supercondensateur en fonction des contraintes (tension, température) [C1-25]

Cette figure montre qu'en augmentant la tension d'utilisation du supercondensateur, la durée de vie du composant diminue. Pour la même température, une augmentation de 100mV de la tension d'utilisation du supercondensateur engendre une diminution de 35% de la durée de vie de l'élément. On obtient le même pourcentage de dégradation en gardant la même tension d'utilisation et avec une augmentation de la température de 10°C. Ces données illustrent l'importance de l'effet des deux contraintes (température et tension d'utilisation) sur la durée de vie du supercondensateur.

### 1.4.2. Mise en série des éléments supercondensateurs

La faible tension supportée par les supercondensateurs (2,7V au plus actuellement) nécessite leur mise en série pour les applications de puissance. Les fabricants proposent ainsi des modules de supercondensateurs (figure 1.16.) afin d'augmenter la tension de service du système et d'optimiser le rendement de la structure « composant de stockage/convertisseur ».



Fig.1.16. : Quelques modules commercialisés

Cette mise en série entraîne l'apparition d'un déséquilibre de tension qui peut accélérer la dégradation des éléments du module s'il n'est pas contrôlé [C1-37]. Ce problème de déséquilibre de tension est dû à la dispersion des caractéristiques de fonctionnement des éléments supercondensateurs. Cette non similitude peut être liée à divers facteurs : fabrication, évolution des caractéristiques, conditions d'utilisation.... Un des points de notre étude concernera la mise en évidence de facteurs influents pour ce comportement. Les fabricants proposent de façon systématique des dispositifs d'équilibrage associés à ces modules afin de gérer ce problème.

### 1.4.3. Processus de vieillissement des supercondensateurs

L'évolution de la température des éléments supercondensateurs influence de manière directe ou indirecte le vieillissement du module. D'un côté, l'évolution de la température des éléments agit directement sur la dégradation directe des caractéristiques des composants. D'un autre côté, cette variation de température couplée à un refroidissement non homogène (éléments centraux/latéraux) provoque une disparité de l'évolution des caractéristiques des éléments d'un module. Ceci engendre nécessairement un problème de déséquilibre de tension si aucun moyen d'action n'est mis en place. La figure 1.17. illustre le processus de vieillissement des supercondensateurs.

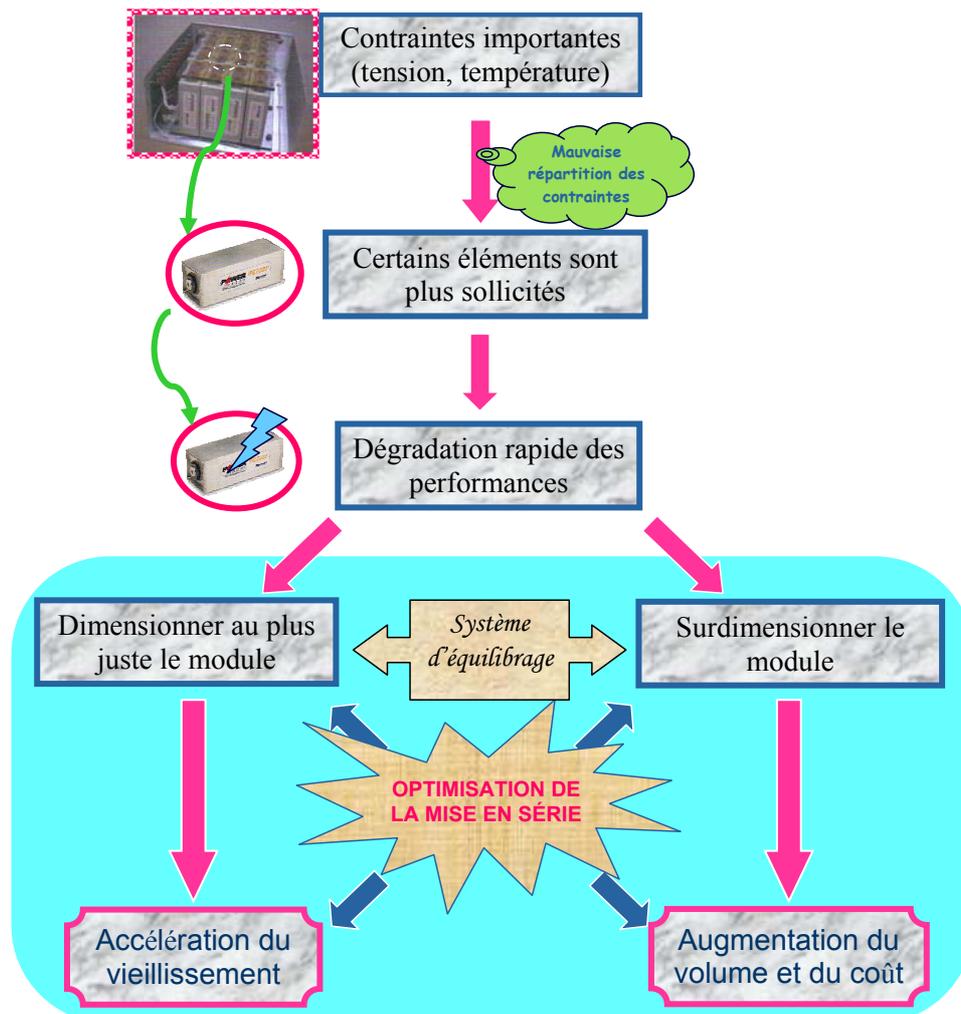


Fig.1.17. : Conséquence d'une mauvaise répartition des contraintes sur tous les éléments d'un module supercondensateur

Le dimensionnement du module supercondensateur passe par le choix des performances voulues pour ce système (coût, volume, rendement, durée de vie). Suivant la performance avantagée, on peut choisir l'une des trois solutions suivantes :

**Surdimensionner le module supercondensateur :** l'utilisation d'un nombre important d'éléments permet de réduire les contraintes électriques (tension, courant) imposées sur le module. En réduisant les contraintes électriques, on baisse de manière indirecte les contraintes thermiques. L'augmentation du nombre d'éléments permet d'augmenter la durée de vie du module au détriment du coût et du volume du système.

**Dimensionner au plus juste le module supercondensateur :** cette méthode permet de réduire le coût et le volume du module supercondensateur avec une accélération de la dégradation des performances de ce dernier. Le vieillissement dans ce cas est rapide car on pourrait passer d'une durée de vie d'une dizaine d'année à éventuellement quelques mois.

**Utilisation d'un système d'équilibrage :** l'utilisation d'un système d'équilibrage peut être combinée avec l'une des deux possibilités précédentes. Cette méthode assure une dispersion homogène des contraintes électriques sur tous les éléments du module supercondensateur. L'utilisation d'un tel système provoque une diminution du rendement du système et donc de son autonomie dans le cas d'un équilibrage résistif ou bien un coût supplémentaire dans le cas de systèmes utilisant des semi-conducteurs.

## **I.5. Stratégie développée**

Afin d'aborder cette étude sur les supercondensateurs, le plan de travail a été basé sur deux axes développés en parallèle (Figure 1.18.):

- ✓ La modélisation du système
- ✓ L'étude expérimentale (cyclage)

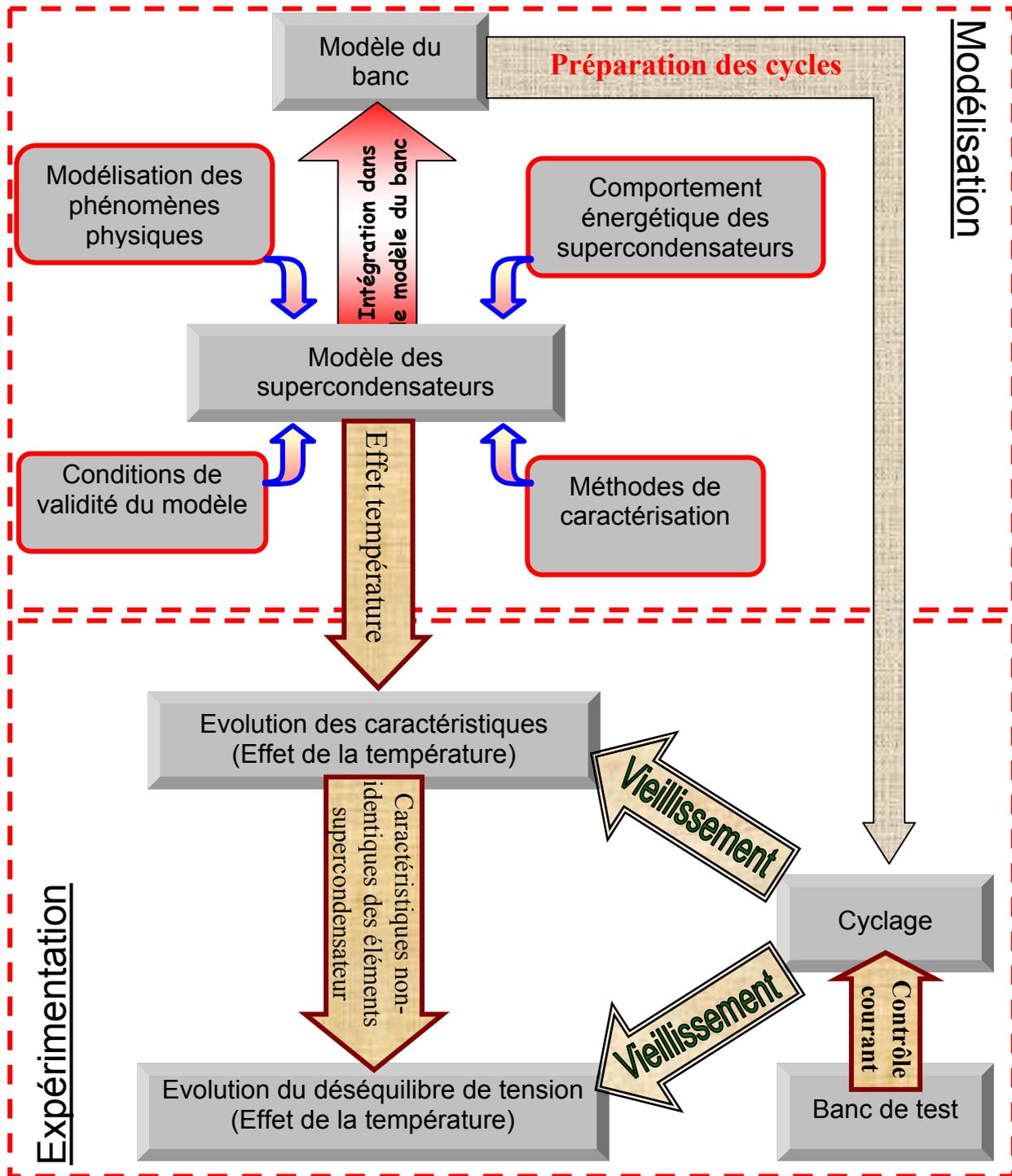


Fig.1.18. : Synoptique de la stratégie développée pour l'étude de vieillissement du supercondensateur

### 1.5.1. Modélisation :

Afin d'étudier l'évolution des paramètres du supercondensateur en fonction notamment de la température, il faut définir les caractéristiques représentant le comportement du composant. Bien évidemment ces caractéristiques doivent être rassemblées dans un modèle représentatif du supercondensateur. Parmi les modèles de supercondensateur, on peut distinguer deux catégories :

- ✓ **Modèle électrique :** avec ce type de modèle, on vérifie la validité de la réponse électrique des modèles. On essaie de rendre la réponse temporelle du modèle proposé la plus proche possible de la réponse expérimentale.

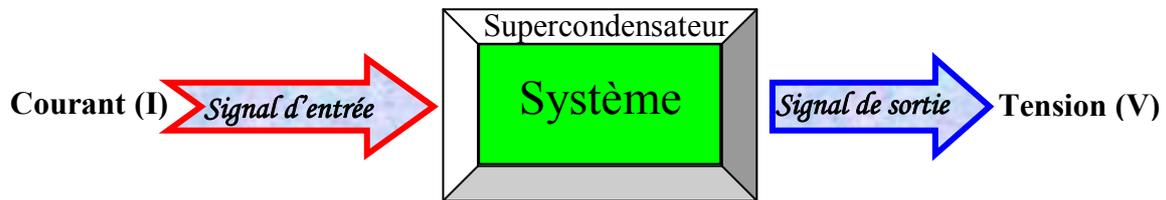


Fig.1.19. : Modèle électrique du supercondensateur

- ✓ **Modèle énergétique :** avec ce type de modèle, on vérifie la validité du bilan énergétique des modèles. On privilégie ainsi l'aspect énergétique (énergie stockée et pertes), approche qui est plus globale (liée au cycle d'utilisation) que l'approche électrique précédente ayant un caractère plus instantané.

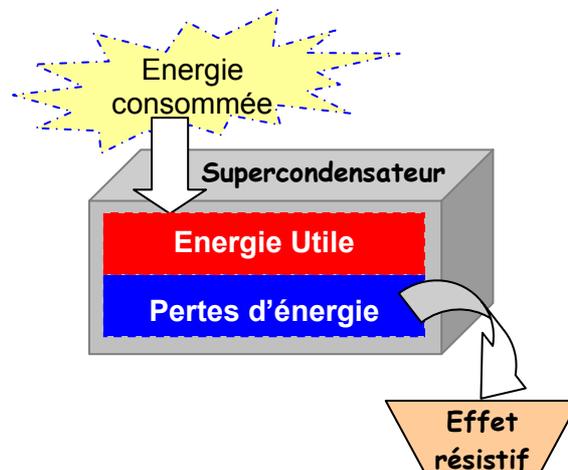


Fig.1.20. : Modèle énergétique du supercondensateur

## 1.5.2. Etude expérimentale :

Cette partie présente le développement d'un banc d'essai utilisant des méthodes originales de caractérisation pour les supercondensateurs. Avec l'utilisation des modèles proposés associés aux différentes méthodes de caractérisation, on peut suivre l'évolution des caractéristiques énergétiques et électriques des supercondensateurs le long du cyclage pour une gamme de température comprise entre 23°C et 60°C. Cet outil sert de base à l'analyse du comportement des modules testés.

L'utilisation couplée des modèles de supercondensateurs et des mesures réalisées sur le banc doit permettre d'identifier les paramètres les plus influents sur le comportement des modules de supercondensateurs.

## 1.6. Conclusion

De nos jours, les supercondensateurs suscitent un intérêt certain dans le domaine de la conception des systèmes électriques. Ils sont un véritable challenge en matière d'innovation et ils vont de pair avec l'évolution des technologies actuelles.

En l'espace de quelques années, ils sont devenus une réalité industrielle. Les sociétés travaillant dans ce domaine sont de plus en plus nombreuses et la production de volume de ce type de composant est bien réelle. Du fait, des applications ciblées sont d'ores et déjà envisageables. Le marché potentiel du supercondensateur est en effet énorme: des modules d'une centaine de Farad peuvent remplacer des accumulateurs dans les applications de moyenne puissance comme l'outillage portable, les jouets électriques, rasoirs électriques. Ainsi que dans les application de traction électrique (transport urbain, véhicule électrique et énergie renouvelable).

Ce composant possède de nombreux atouts qui résident dans l'absence de maintenance par rapport à des solutions constituées de piles ou d'accumulateur, dans la durée de vie qui peut dépasser les 10 ans ou 1 million de cycles. Ses performances se situent entre celles des accumulateurs et celles des condensateurs classiques. C'est à la fois un défaut car il est incapable de rivaliser avec les accumulateurs si on considère ses performances énergétiques. C'est également son principal atout car il n'a pratiquement aucun concurrent dans ce domaine. C'est ce qui le rend parfaitement adapté aux systèmes hybrides. En effet, il permet d'une part de limiter le dimensionnement en puissance de la source principale et de son infrastructure, et d'autre part il autorise le freinage électrique pour les applications électromécaniques ce qui doit induire sur le long terme une économie énergétique et donc financière.

Malgré tout cet intérêt, le comportement de ce composant reste mal connu par les utilisateurs des systèmes de stockage d'énergie. Son utilisation dans le secteur des applications « courant fort » passe par la mise en série d'un grand nombre d'éléments. Ceci aura nécessairement des conséquences sur le vieillissement du dispositif de stockage. C'est la raison pour laquelle le L2EP s'est impliqué dans le développement d'un banc de test de module de supercondensateur.

Avant d'étudier le comportement du module, il est nécessaire d'aborder de façon approfondie la modélisation du comportement électrique du supercondensateur et sa caractérisation à l'aide des moyens de mesure développés au laboratoire. Ceci permet d'obtenir à partir des mesures observées sur le banc, les caractéristiques de ce composant. Ceci constitue l'objet du second chapitre dédié à la modélisation et la caractérisation des supercondensateurs.



# Figures du chapitre 1

<i>Fig. 1.1</i> : Exemple des supercondensateurs du fabricant EPCOS.....	4
<i>Fig. 1.2</i> : Création des couches double électrique.....	5
<i>Fig. 1.3</i> : Schéma représentatif d'un supercondensateur.....	5
<i>Fig. 1.4</i> : Structure microscopique d'une électrode au charbon actif (porosité de type cylindrique).....	6
<i>Fig. 1.5</i> : Structure microscopique d'un tissu activé.....	6
<i>Fig. 1.6</i> : Comparaison des systèmes de stockage [C1-2].....	9
<i>Fig. 1.7</i> : Projet de collaboration entre BOMBARDIER et L2EP .....	9
<i>Fig. 1.8</i> : Maquette du Projet de bus autonome proposé par le laboratoire d'électronique industrielle de Lausanne .....	10
<i>Fig. 1.9</i> : Projet du bus autonome proposé par le laboratoire d'électronique industrielle de Lausanne.....	10
<i>Fig. 1.10</i> : Schéma de l'alimentation d'un ascenseur avec l'utilisation des supercondensateurs.....	11
<i>Fig. 1.11</i> : Prototype d'un ascenseur alimenté par des supercondensateurs [C1-31].....	11
<i>Fig. 1.12</i> : Utilisation des supercondensateurs dans le domaine des éoliennes.....	12
<i>Fig. 1.13</i> : Prototype du tramway fabriqué par BOMBARDIER avec l'utilisation du supercondensateur comme alimentation secondaire .....	12
<i>Fig. 1.14</i> : Prototype d'une voiture hybride proposé par HONDA .....	13
<i>Fig. 1.15</i> : Evolution de la durée d'un supercondensateur en fonction des contraintes (tension, température) [C1-25].....	14
<i>Fig. 1.16</i> : Quelques modules commercialisés.....	14
<i>Fig. 1.17</i> : Conséquence d'une mauvaise répartition des contraintes sur tous les éléments d'un module supercondensateur.....	15
<i>Fig. 1.18</i> : Synoptique de la stratégie développée pour l'étude de vieillissement du supercondensateur .....	17
<i>Fig. 1.19</i> : Modèle électrique du supercondensateur.....	18
<i>Fig. 1.20</i> : Modèle énergétique du supercondensateur.....	18

# *Bibliographie du chapitre 1*

**[C1-1]**

D.Vandenberge, "Les supercapacités," <http://perso.club-internet.fr/phlegoff/supcap.htm>, 1999.

**[C1-2]**

P. Azaïs, "Recherche des causes du vieillissement de supercondensateurs a electrolyte organique a base de carbones actives," thèse doctorat, Université d'Orléans, novembre 2003.

**[C1-3]**

S.J. Shanley, G. Dorval-Douville, J. Rozière, D.J.Jones, J.L. Pascal and F. Favier, "Manganese oxide nanocomposites as supercapacitor electrode materials: Preparation and electrochemical performances," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C1-4]**

V. Herman, A. Schneuwly, R. Gallay, Montena components (Suisse), "High performance double-layer capacitor for power electronic applications," 2nd Boostcap meeting, mars 2001, Fribourg.

**[C1-5]**

Y. K. Zhou, G. Dorval-Douville, and F. Favier, "Fabrication of Birnessite-type Layered Manganese Oxide Films for Supercapacitors," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C1-6]**

P.Guillemet, Y.Scudeller, T.Brousse, "Electro-thermal analysis of hybrid electrochemical Supercapacitors," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C1-7]**

F. Belhachemi, S. Raël, B. Davat, "A physical based model of power electric double-layer supercapacitors," IEEE-IAS'2000, Rome, Italie.

**[C1-8]**

J.C. Lassègues « Laboratoire de physico-chimie moléculaire de l'université de Bordeaux1 (France) », "Supercondensateurs," Techniques de l'ingénieur, D3 334.

**[C1-9]**

B.E. Conway, "Electrochemical supercondensators – Scientific fundamentals and technological applications," Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York 1999.

**[C1-10]**

B.E. Conway, V. Birss, J. Wojtowicz, "The role and utilization of pseudocapacitance for energy storage by supercapacitors," Journal of power sources, May 1997.

**[C1-11]**

Maxwell technology, "Boostcap Ultracapacitor Module Operating Manual," [www.Maxwell.com](http://www.Maxwell.com), Janvier 2003.

**[C1-12]**

P. Mestre, S.Astier, "Utilization of ultracapacitors as a auxiliary power source in electric vehicle," EPE, 1997.

**[C1-13]**

P. Barrade, A. Rufer, "Supercapacitors as energy buffers: a solution for elevators and for electric busses supply," PCC'2002.

**[C1-14]**

A. Rufer, "Le super-condensateur et la batterie se marient pour fournir de l'énergie," Electronique, No 100, Février 2000

**[C1-15]**

C. Raible, M. Hartmut, « Siemens-Matsushita Components (Allemagne) », "Bursting with power: high energy density with ultracapacitors," Note d'application, 1999.

**[C1-16]**

J. Lachaize, " Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction," thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, septembre 2004.

**[C1-17]**

D. Candusso, " Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique," thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, Novembre 2004.

**[C1-18]**

Maxwell datasheets, "site internet de Maxwell technologies," <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/products/datasheets.html>

**[C1-19]**

P. Le Goff, "Les supercondensateurs, Les piles à combustibles," Mise à jour :Sept. 1999 - version 2.0 <http://pl.legoff.free.fr>

**[C1-20]**

G. Pereira, P. Bartholomeus, P. Le Moigne, C. Rombaut, P. Van Berten, "Ultracapacitors and tramway without catenary," 2nd Boostcap Meeting, 2001, Fribourg, Swiss.

**[C1-21]**

G. Pereira, P. Bartholomeüs, P. Le Moigne, C. Rombaut, P. Van Berten, "Structures de conversion d'énergie d'un engin de transport en commun urbain à supercondensateurs," EPF'2000, Lille, December 2000, Actes pp. 225-230.

**[C1-22]**

P. Barrade, A. Rufer, "High-power fast energy exchange between storage systems : Supercapacitors as energy buffer in transportation systems," 18th Electric Vehicle Symposium, October 2001, Berlin.

**[C1-23]**

P. Barrade, A. Rufer, "Apport des supercondensateurs dans le transport terrestre : une meilleure gestion de l'énergie," 2002, Belfort, France.

**[C1-24]**

R. A. Sutula, K. L. Heitner, S.A. Rogers, T. Q. Duong, P. G. Patil, "Electric and hybrid vehicle energy storage R & D programs of the US-Department of energy ," EPE, 1999.

**[C1-25]**

EPCOS AG (Munich, Allemagne), "Ultracap, Double layer capacitors: A new energy storage device for peak power applications," 2002, <http://www.EPCOS.com>.

**[C1-26]**

P. Chapoulie, S. Astier, "Modeling of an electric vehicle including ultracapacitors with SABER," EPE, 1999

**[C1-27]**

P. Desprez, G. Barrailh, L. Moreau, B. Pichon, D. Rochard, C. Jehoulet, "Supercondensateurs: un tampon de puissance pour source d'énergie," CNRT 2000, Belfort.

**[C1-28]**

N.A. Fries, C. Weber, A. Schwake, T. Dietrich, «Epcos (Allemagne)» , "UltraCaps: the energy storage for innovative power supplies," PCIM, Avril 2000.

**[C1-29]**

A. Marquet, Direction des études et recherches EDF (France), "Application des supercondensateurs dans les réseaux de distribution électrique," JESC' 98, Paris, 5-6 février 1998.

**[C1-30]**

W. Koczara, Z. Chłodnicki, B. Dakyo, "Power-energy management in lift drive system with supercapacitor compensator," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C1-31]**

P. Barrade, A. Rufer, "Supercapacitors as energy buffers: a solution for elevators and for electric busses supply," PCC'2002.

**[C1-32]**

N. R. Ullah, J. Groot, T. Thiringer, "The Use of a Combined Battery/Supercapacitor Storage to Provide Voltage Ride-Through Capability and Transient Stabilizing Properties by Wind Turbines," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C1-33]**

M. Steiner, J. Scholten, "Energy Storage on board of railway vehicles," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C1-34]**

G. Zorpette, "A tiny south Korean company is out to make capacitors powerful enough to propel the next generation of hybrid-electric cars," IEEE spectrum, Janvier 2005.

**[C1-35]**

N. Rizoug, P. Bartholomeüs, P. Le Moigne, B. Vulturescu, "Electrical and thermal behaviour of a supercapacitor module: on-line characterization," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C1-36]**

N. Rizoug, "Caractérisation d'un module supercondensateur pour des contraintes électriques de type traction," JCGE'2005, Montpellier, France.

**[C1-37]**

N. Rizoug, P. Bartholomeüs, B. Vulturescu, X. Pierre, P. Le Moigne, "Voltage sharing in supercapacitor modules : Experimental study," PESC'2004, Aschen, Allemagne, pp. 690-696.



## *Chapitre 2 :*

# *Modélisation et caractérisation des supercondensateurs*

# Table des matières

## Chapitre 2 : Modélisation et caractérisation des supercondensateurs

<b>II.1. MODELE « CONSTRUCTEUR » <math>R_C-C_C</math> :</b>	<b>29</b>
II.1.1 IDENTIFICATION DE LA RESISTANCE SERIE ( $R_C$ ) ET DE LA CAPACITE DE STOCKAGE ( $C_C$ ) :	29
II.1.2. LIMITES DU MODELE $R_C-C_C$ :	30
<i>II.1.2.1 Limite due à la variation de la résistance équivalente en fonction de la fréquence</i>	<i>30</i>
<i>II.1.2.2. Limite due à la variation de la capacité en fonction de la tension :</i>	<i>32</i>
<b>II.2. MODELE BASE SUR UNE CARACTERISATION FREQUENTIELLE DES SUPERCONDENSATEURS [C2-10, C2-11]</b>	<b>33</b>
II.2.1. MODELE FREQUENTIEL	33
II.2.2. TRANSFORMATION DU MODELE FREQUENTIEL EN UN MODELE CIRCUIT :	36
<i>II.2.2.1. Validation du modèle circuit</i>	<i>37</i>
<i>II.2.2.2. Avantages et limites du modèle</i>	<i>37</i>
<i>II.2.2.3. Avantages et limites de la caractérisation</i>	<i>39</i>
II.2.3. CARACTERISATION AVEC INJECTION D'UN SIGNAL RICHE EN FREQUENCE	40
II.2.4. INJECTION D'UN HARMONIQUE 50HZ AVEC LE COURANT DE CYCLAGE.	43
<b>II.3. MODELE TEMPOREL A CONSTANTES REPARTIES (MODELE ANALYTIQUE) .....</b>	<b>45</b>
II.3.1. LIMITES DU MODELE ANALYTIQUE	47
<b>II.4. MODELES A CONSTANTES LOCALISEES :</b>	<b>47</b>
II.4.1. MODELE A DEUX BRANCHES [C2-7] :	48
II.4.2. MODELE MULTI-BRANCHES [C2-14] :	50
<i>II.4.2.1. Modèle circuit issu du modèle temporel analytique de la ligne de transmission</i>	<i>50</i>
<i>II.4.2.2. Identification des paramètres du modèle</i>	<i>52</i>
<i>II.4.2.3. Modèle global du module testé</i>	<i>55</i>
<i>II.4.2.4. Avantages et limites du modèle et de sa caractérisation</i>	<i>56</i>
<b>II.5. METHODE PROPOSEE POUR L'IDENTIFICATION D'UNE LIGNE DE TRANSMISSION .....</b>	<b>56</b>
II.5.1. LIEN ENTRE LES MODELES CIRCUITS ISSUS DES APPROCHES FREQUENTIELLES ET TEMPORELLES :	57
II.5.2. LIMITES DU MODELE UTILISE	60
<b>II.6. APPROCHE ENERGETIQUE DES MODELES [C2-16] .....</b>	<b>60</b>
II.6.1. MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE $R_{EQ} - C_{EQ}$ EXTRAIT DE LA LIGNE DE TRANSMISSION	61

<i>II.6.1.1. Caractérisation temporelle.....</i>	<i>61</i>
II.6.1.1.1. Utilisation des caractéristiques du modèle simplifié de la ligne de transmission pour calculer les caractéristiques du modèle énergétique simplifié.....	62
II.6.1.1.2. Influence du nombre de branches sur le comportement énergétique.....	65
<i>II.6.1.2. Caractérisation énergétique [C2-17].....</i>	<i>70</i>
II.6.1.2.1. Résistance énergétique.....	71
II.6.1.2.2. Capacité énergétique.....	71
<i>II.6.1.3. Relation entre les deux modèles énergétiques proposés.....</i>	<i>72</i>
II.6.1.3.1. Relation entre la résistance équivalente $R_{eq}$ et la résistance énergétique $R_E$ .....	72
II.6.1.3.2. Relation entre la capacité instantanée ( $C_{eq}$ ) et la capacité énergétique ( $C_E$ ).....	73
II.6.2. BILAN SUR LES DIFFERENTS TYPES DE CAPACITES APPLIQUES AUX SUPERCONDENSATEURS	74
II.6.3. VALIDATION DU MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE POUR DES ESSAIS A PUISSANCE CONSTANTE (DIAGRAMME DE RAGONE).....	76
<i>II.6.3.1. Essai avec des puissances constantes.....</i>	<i>76</i>
II.6.3.1.1. Utilisation du modèle énergétique simplifié pour tracer le diagramme de Ragone.....	78
<b>II.7. CONCLUSION.....</b>	<b>83</b>



# Chapitre 2

## Modélisation Et Caractérisation Des Supercondensateurs

Ce chapitre concerne l'étude et la comparaison des modèles de représentation des supercondensateurs. La modélisation des supercondensateurs permet de prévoir leur comportement dans différentes applications, tout en basant ces modèles sur une représentation des principaux phénomènes physiques apparaissant au sein du composant.

Pour l'électricien, le supercondensateur est un composant parmi d'autres faisant partie d'un système énergétique qu'il convient d'identifier :

- pour cela, il est prioritaire d'avoir une bonne représentation énergétique de ce composant puisque sa fonction principale est le stockage.
- en second lieu, il est également important de connaître son comportement temporel afin d'évaluer les contraintes qu'il impose au reste du circuit.

La figure 2.1. montre un schéma de base représentant le comportement énergétique des supercondensateurs au travers des deux principaux phénomènes apparaissant dans les systèmes de stockage :

- l'injection ou l'extraction de charges sur des durées en général relativement courtes est quantifiée au travers de paramètres de type (R, C).
- la présence d'une charge stockée de façon permanente induit des phénomènes secondaires générant des pertes de charges et représentés souvent par une résistance de fuite.

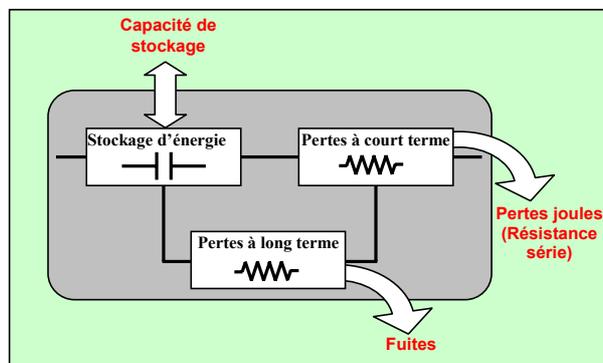


Fig. 2.1. : Schéma de base du comportement des supercondensateurs

Différents types de modèles peuvent être employés :

- les modèles des électrochimistes, modèles que l'on peut qualifier de « microscopiques », capables de représenter de manière très précise les phénomènes internes [C2-1 , C2-2 , C2-3, C2-4, C2-5, C2-6].
- les modèles de type circuit, « macroscopiques », moins proches de la réalité physique mais plus faciles à manipuler [C2-7].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux modèles de type circuit, plus adaptés à l'usage de l'électricien et intéressants pour leur simplicité relative. Dans cette démarche, il est nécessaire d'identifier les principaux phénomènes apparaissant au sein du composant et de les modéliser à l'aide de schémas électriques classiques, permettant ainsi de représenter les phénomènes de stockage et de dissipation apparaissant au sein du composant.

En réalité, la problématique est double : il faut être capable de définir d'une part la topologie du modèle, mais aussi la façon de déterminer les paramètres de façon à ce que le modèle soit fiable compte tenu des hypothèses de validité à préciser pour chaque cas. De fait, la bibliographie sur le sujet montre différents types de modèles s'appuyant sur différentes méthodes d'identification.

Notre but, au travers de ce chapitre, n'est pas de trouver un modèle universel, mais plutôt de présenter ceux déjà développés et d'essayer de définir les liens entre ces différentes approches d'un même problème et leur domaine d'application. Un point important distinguant souvent les modèles proposés concerne les méthodes de caractérisation, basées souvent sur les réponses fréquentielles ou sur les réponses temporelles. En effet, la rigueur et la simplicité de la méthode utilisée peuvent apporter au modèle utilisé une précision et une fiabilité qu'il convient de prendre en compte.

Cette synthèse de modèles peut ainsi être faite en fonction du type d'utilisation souhaité et peut privilégier certains aspects par rapport à d'autres:

- modèle axé sur une bonne réponse temporelle
- modèle axé sur une bonne précision énergétique
- modèle destiné à représenter des phénomènes sur une grande échelle de temps (ex : étude du déséquilibre de tension qui peut apparaître lors de l'utilisation en série)
- modèle adapté à une utilisation particulière (en général à une bande passante définie et liée à la durée du cycle d'utilisation)
- ....

Dans ce chapitre, les principaux modèles développés jusqu'à présent sont présentés, leurs limites, ainsi que les liens pouvant apparaître entre ces derniers. Le domaine de validité de ces modèles ne dépasse pas les 200 secondes (0,005Hz). La représentation des fuites ne figure pas dans la partie modélisation du composant de ce chapitre.

Le comportement de ces différents modèles est comparé aux mesures réalisées sur le banc de test de module de supercondensateurs développé au L2EP, banc destiné à la caractérisation d'un module supercondensateur EPCOS 112F/48V constitué de 24 composants Maxwell 2700F/2,3V. Pour cela, on compare les courants et tensions simulés

pour un élément, au courant mesuré pour le module et à la tension moyenne par élément. Le chapitre suivant montrera les différences de comportement pouvant apparaître entre les éléments en fonction de certains paramètres.

## II.1. Modèle « constructeur » $R_c-C_c$ :

Afin de modéliser les supercondensateurs, les constructeurs utilisent la similitude entre le comportement de ces derniers et celui des condensateurs électrolytiques. Pour cela un supercondensateur peut être caractérisé par une résistance série ( $R_c$ ) et une capacité de stockage ( $C_c$ ). Avec un simple essai de décharge à courant constant, il est possible de calculer ces deux paramètres. La différence du niveau de tension entre la fin de la phase de décharge et cinq secondes après cette phase de décharge ( $V_r$ ) donne l'image de la résistance série. L'image de la capacité de stockage de l'élément est donnée par la chute de tension entre l'état initial (état de repos avant la décharge) et l'état final (cinq seconde après la décharge). La figure 2.2. montre l'essai utilisé par le constructeur MAXWELL [C2-8, C2-9] pour effectuer la caractérisation d'un élément supercondensateur.

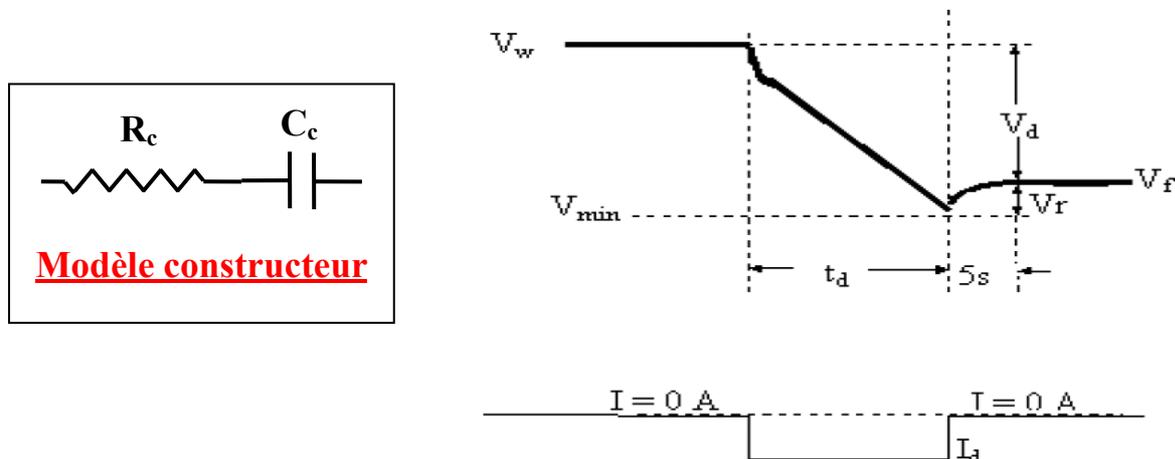


Fig. 2.2.: Méthode de caractérisation utilisée par MAXWELL

### II.1.1 Identification de la Résistance série ( $R_c$ ) et de la capacité de stockage ( $C_c$ ) :

L'utilisation de la réponse temporelle du supercondensateur (Figure 2.2.), permet de calculer les deux paramètres du modèle :

$$C_c = \frac{I_d \cdot t_d}{V_d} \quad (\text{II-1})$$

$$R_c = \frac{V_r}{I_d} \quad (\text{II-2})$$

L'application de cette procédure d'identification sur notre module supercondensateur conduit aux caractéristiques moyennes suivantes :

$$R_c = 0.0011\Omega \quad - \quad C_c = 2791\text{F}$$

Ces paramètres ont été déterminés pour une température constante (Température=25°C). Ils représentent le comportement du module neuf durant les premiers jours d'utilisation. La figure 2.3. montre la réponse mesurée du module et une réponse simulée du modèle R-C pour un essai de charge avec un courant constant  $I=100A$ .

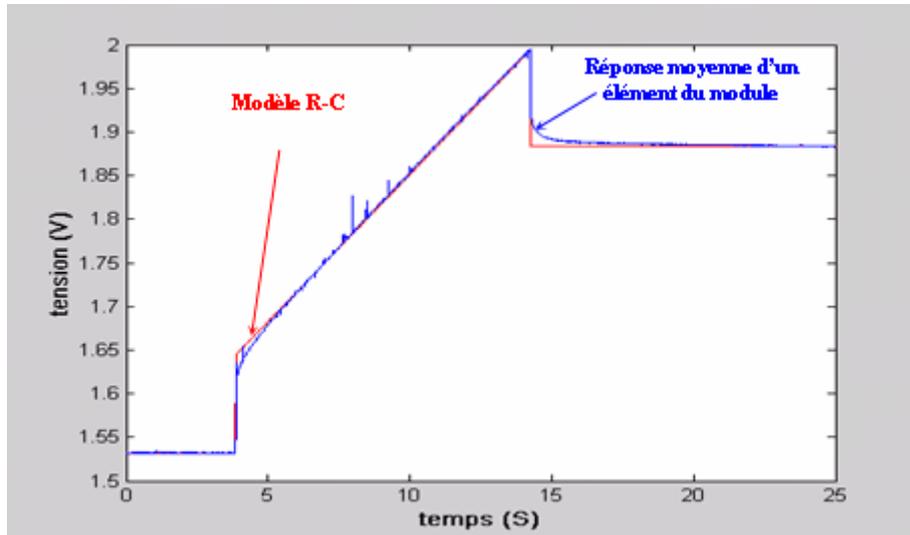


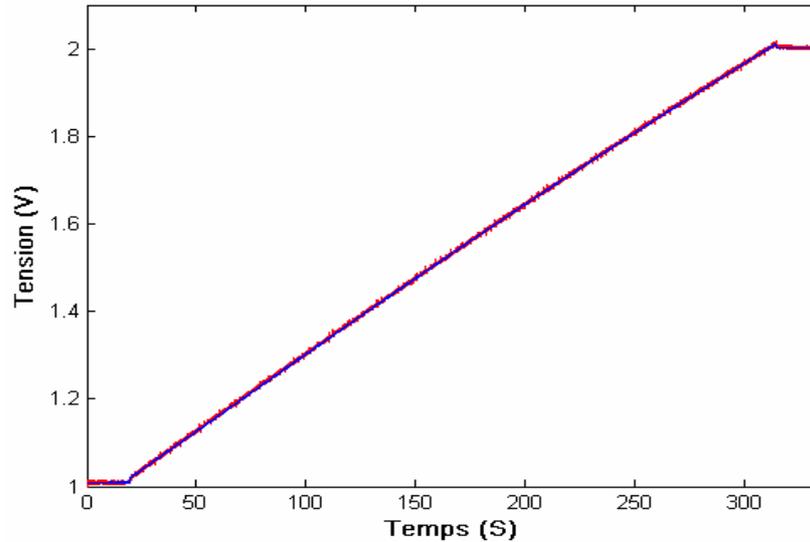
Fig. 2.3.: Comparaison du modèle RC d'un supercondensateur avec la réponse expérimentale

D'après les courbes, nous constatons que la réponse donnée par le modèle est acceptable pour ce type d'essai. La seule différence entre les deux réponses se trouve dans les phases dites transitoires, durant les premières secondes suivant la variation du courant de charge; au début de la charge du supercondensateur et après la charge, une courbure apparaît sur la forme d'onde de tension qui n'est pas prise en compte par le modèle R-C. Avec ce modèle, la tension est linéaire et ne prend pas en compte les phénomènes de propagation et de redistribution rapide des charges liés à la capacité de stockage volumique des supercondensateurs.

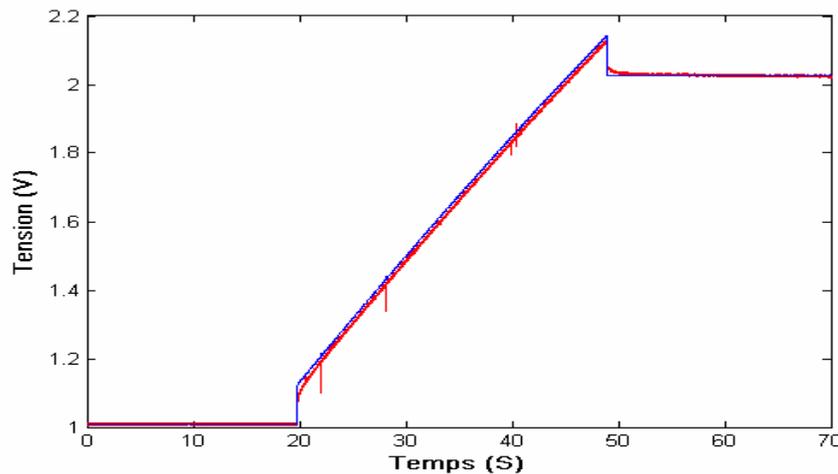
## II.1.2. Limites du modèle $R_c-C_c$ :

### II.1.2.1 Limite due à la variation de la résistance équivalente en fonction de la fréquence

Si on se base sur les résultats de la figure 2.3., on peut admettre que le comportement d'un supercondensateur est proche de celui d'un condensateur électrolytique. Afin de mettre en évidence les limites de cette hypothèse, on peut tester le comportement de ce modèle pour des essais à différents niveaux de courant. Pour cela, les paramètres du modèle  $R_c-C_c$  sont identifiés avec un essai à courant constant ( $I = 10A$ ), le supercondensateur étant chargé de 1V à 2V (figure 2.4.). La réponse du modèle pour  $I = 100A$  est ensuite comparée à un essai de charge à  $I = 100A$ , le supercondensateur étant toujours chargé entre 1V et 2V (figure 2.5.).



**Fig. 2.4.:** Comparaison de la réponse d'un modèle  $R_c C_c$  avec une réponse expérimentale d'un élément pour un essai de charge à courant constant ( $I=10A$ )



**Fig. 2.5.:** Utilisation d'un modèle caractérisé avec un essai à ( $I=10A$ ) pour un essai à  $I=100A$

La figure 2.4. montre que la réponse du modèle et de l'essai sont très voisines (durée de charge = 215 secondes, courant constant  $I=10A$ ). Par contre, la comparaison de la réponse du même modèle avec la réponse expérimentale pour  $I=100A$  (durée de charge = 29 secondes) montre que la résistance du modèle n'est plus adaptée (figure 2.5.). Ces deux essais prouvent qu'en réalité, pour ce type de modèle, la résistance équivalente d'un supercondensateur doit varier en fonction des contraintes électriques. Ces deux essais tendent à faire croire que la résistance équivalente d'un supercondensateur devrait varier en fonction des contraintes électriques. Ceci aura naturellement des conséquences sur la précision du modèle du point de vue énergétique.

La figure 2.6. montre la variation de la résistance  $R_c$  pour des essais à différents niveaux de courants, la tension variant toujours de 1V à 2V ( $I=10A$ , durée de charge=315 secondes -  $I=50A$ , durée de charge=58 secondes -  $I=100A$ , durée de charge=29 secondes).

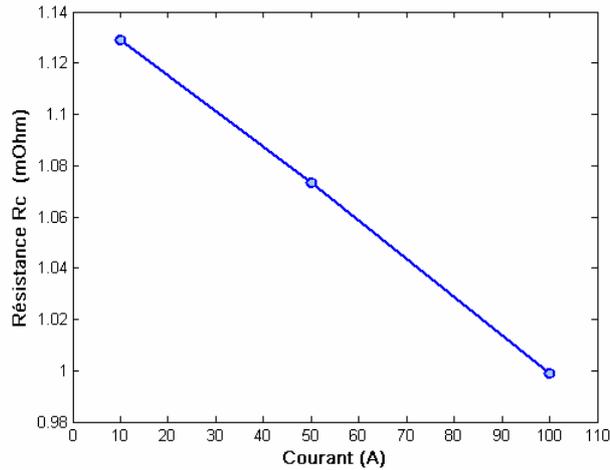


Fig. 2.6.: Variation de la résistance  $R_c$  pour différentes durées de la charge

### II.1.2.2. Limite due à la variation de la capacité en fonction de la tension :

Une autre limite du modèle Rc-Cc est mise en évidence sur la figure 2.7.. Elle représente la réponse expérimentale et celle du modèle Rc-Cc pour un essai de charge complet avec un courant constant  $I = 10A$ . Cette figure montre que, bien que la réponse du modèle suive la réponse expérimentale avant et après la phase de charge (courant nul), la réponse de ce modèle s'éloigne de celle mesurée durant la phase de charge ( $I = 10A$ ). Ce décalage entre les deux réponses est dû à une variation de la capacité en fonction de la tension instantanée.

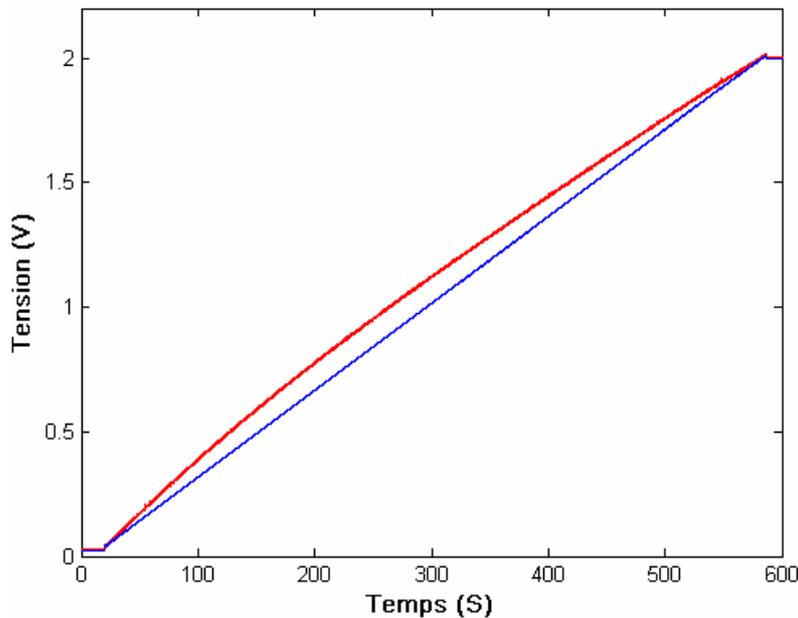


Fig. 2.7.: Essai de charge complète du supercondensateur

## II.2. Modèle basé sur une caractérisation fréquentielle des supercondensateurs [C2-10, C2-11]

### II.2.1. Modèle fréquentiel

Ce modèle est basé sur l'utilisation de la réponse fréquentielle du dispositif. Pour caractériser les supercondensateurs, un impédancemètre est normalement utilisé afin de mesurer la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans le plan de Nyquist (plan complexe). Il est de plus nécessaire d'effectuer un balayage en fréquence pour différents niveaux de tension pour connaître la variation de la capacité en fonction de la tension à ses bornes.

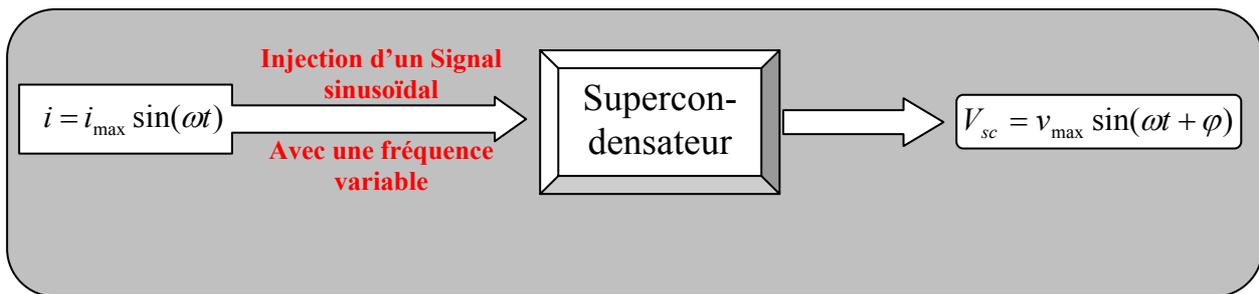


Fig. 2.8.: Principe de la caractérisation fréquentielle d'un supercondensateur

Cette méthode utilise le fait que la réponse fréquentielle d'un supercondensateur est proche de celle donnée par une ligne de transmission  $Z_{\text{harm}}$  [Annexe 2] avec une résistance série  $R_s$  qui représente la limite de la partie réelle quand  $\omega \rightarrow \infty$  :

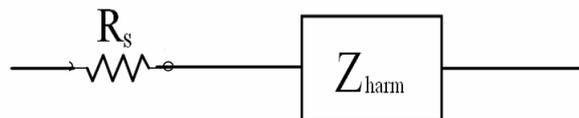


Fig. 2.9.: Schéma de base du modèle fréquentiel

$Z_{\text{harm}}$  est donnée par la fonction de Laplace suivante :

$$Z_{\text{harm}}(j.\omega) = \frac{\tau \cdot \coth \sqrt{j\omega\tau}}{C \cdot \sqrt{j\omega\tau}} \quad (\text{II-3})$$

Avec :  $\tau = R \cdot C$

Une comparaison entre la réponse fréquentielle d'un composant supercondensateur et celle donnée par la formule (II-3) pour un composant (2,5V/1400F), est faite par S. Buller [C2-11] (figure 2.10.).

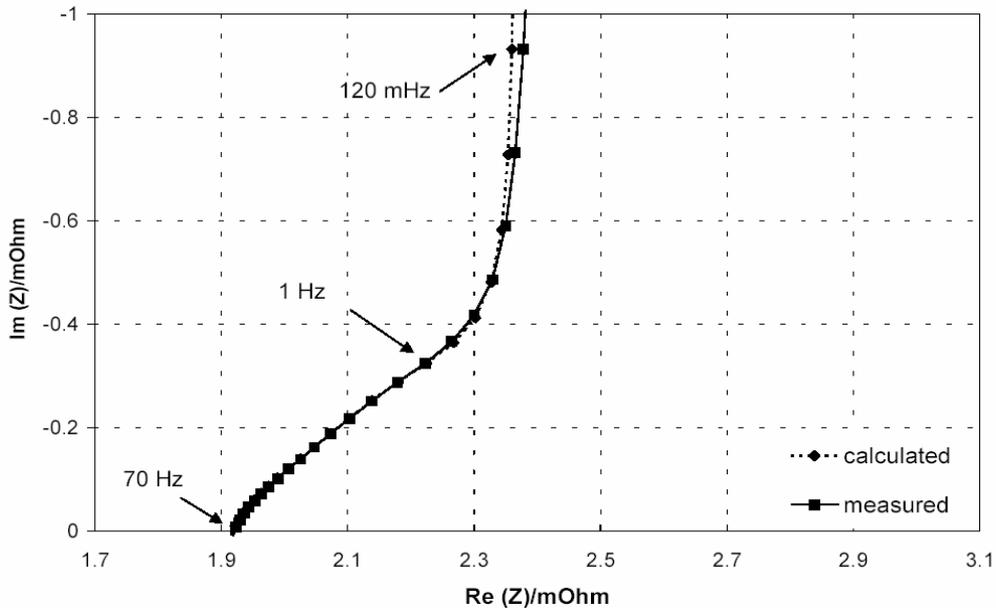


Fig. 2.10.: Comparaison d'une réponse expérimentale avec une réponse donnée par une ligne de transmission [C2-11]

$$\begin{cases} \sqrt{jx} = \sqrt{\frac{x}{2}}(1+j) \\ sh(\sqrt{jx}) = \cos(\sqrt{\frac{x}{2}}).sh(\sqrt{\frac{x}{2}}) + j.\sin(\sqrt{\frac{x}{2}}).ch(\sqrt{\frac{x}{2}}) \\ ch(\sqrt{jx}) = \cos(\sqrt{\frac{x}{2}}).ch(\sqrt{\frac{x}{2}}) + j.\sin(\sqrt{\frac{x}{2}}).sh(\sqrt{\frac{x}{2}}) \end{cases} \quad (II-4)$$

En utilisant les identités données par les formules (II-4) et en remplaçant  $x$  par  $\tau\omega$ , la formule de l'impédance peut être mise sous la forme suivante :

$$Z_{imp}(j.\omega) = \frac{R}{\sqrt{8\tau.\omega}} \cdot \frac{sh(\sqrt{2\tau\omega}) - j.\sin(\sqrt{2\tau\omega})}{sh^2(\sqrt{\tau\omega}/2) + \sin^2(\sqrt{\tau\omega}/2)} \quad (II-5)$$

Cette expression peut être décomposée en deux parties (parties réelle et imaginaire) :

$$\begin{cases} \text{Re}(Z_{imp}(j.\omega)) = \frac{R}{\sqrt{8\tau.\omega}} \cdot \frac{sh(\sqrt{2\tau\omega}) - \sin(\sqrt{2\tau\omega})}{sh^2(\sqrt{\tau\omega}/2) + \sin^2(\sqrt{\tau\omega}/2)} \\ \text{Im}(Z_{imp}(j.\omega)) = \frac{R}{\sqrt{8\tau.\omega}} \cdot \frac{sh(\sqrt{2\tau\omega}) + \sin(\sqrt{2\tau\omega})}{sh^2(\sqrt{\tau\omega}/2) + \sin^2(\sqrt{\tau\omega}/2)} \end{cases} \quad (II-6)$$

En cherchant les limites pour  $\omega \rightarrow 0$  et  $\omega \rightarrow \infty$ , on trouve deux asymptotes:

$$\begin{cases} \lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Re}(Z_{harm}(j.\omega)) = \frac{R}{3} \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Im}(Z_{harm}(j.\omega)) = -\frac{1}{C\omega} \end{cases} \quad (II-7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lim_{\omega \rightarrow \infty} \operatorname{Re}(Z_{\text{harm}}(j.\omega)) = 0 \\ \lim_{\omega \rightarrow \infty} \operatorname{Im}(Z_{\text{harm}}(j.\omega)) = 0 \\ \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\operatorname{Re}(Z_{\text{harm}}(j.\omega))}{\operatorname{Im}(Z_{\text{harm}}(j.\omega))} = -1 \end{array} \right. \quad (\text{II-8})$$

La limite pour  $\omega \rightarrow 0$  nous donne une asymptote verticale, tandis que pour  $\omega \rightarrow \infty$  on trouve une asymptote oblique inclinée de  $45^\circ$  par rapport à l'axe des réels.

La figure 2.11. montre la comparaison entre la réponse fréquentielle d'un élément moyen du module testé avec la réponse harmonique d'une ligne de transmission représentée par (6). Les relevés expérimentaux ont été faits avec le banc de test développé au laboratoire. Pour une plage de fréquence comprise entre 50mHz et 50Hz on injecte un courant sinusoïdal de 20A crête et on relève la réponse en tension du module supercondensateur. Cette méthode originale pour mesurer la réponse fréquentielle a été mise en place afin d'éviter l'utilisation d'un impédance-mètre et donc éviter tout démontage du banc. Ce procédé s'est avéré très performant en terme de résultats et permet ainsi d'envisager des méthodes d'identification fréquentielle à partir d'essais énergétiques classiques.

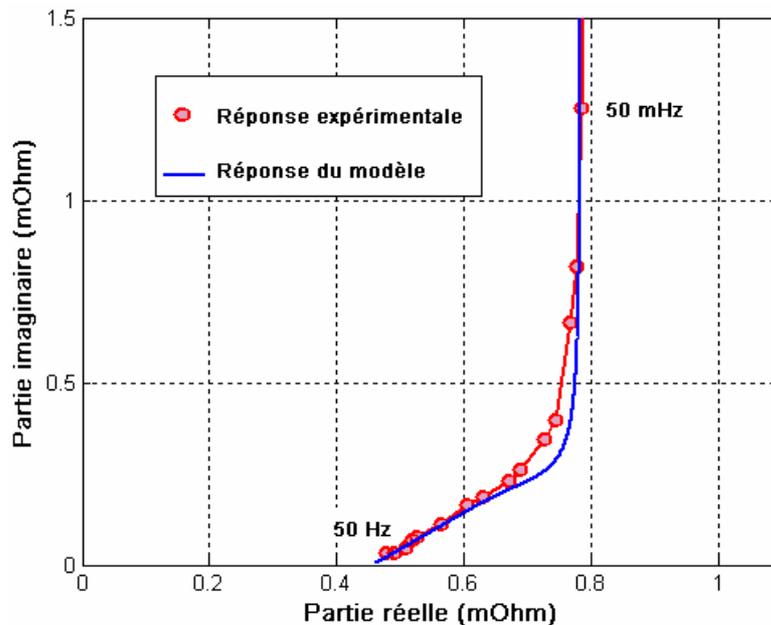


Fig. 2.11.: Réponse fréquentielle d'une ligne de transmission  $R_{BF}=0.784 \text{ m}\Omega$   $C=2700\text{F}$ ,  $R_{HF}=0,47 \text{ m}\Omega$  et  $V_{sc}=1.58\text{V}$

Ces mesures confirment que la réponse fréquentielle d'une ligne de transmission est proche de la réponse expérimentale du supercondensateur dans la gamme fréquentielle mesurée. Ceci permet de prendre cette représentation comme modèle électrique de base pour représenter le comportement des supercondensateurs.

## II.2.2. Transformation du modèle fréquentiel en un modèle circuit :

Afin de simplifier la simulation du modèle précédent, il est possible de transformer le modèle fréquentiel en un modèle temporel en utilisant la fonction inverse de l'impédance harmonique d'une ligne de transmission [C2-12]:

$$Z_{harm}(t) = \frac{1}{C} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 t}{RC}\right) \right) \quad (II-9)$$

Sachant que l'impédance d'un seul circuit Rn-Cn parallèle s'exprime dans le plan temporel de la façon suivante :

$$Z_{RnCn} = \frac{1}{Cn} \exp\left(\frac{-t}{RnCn}\right) \quad (II-10)$$

Cette transformation permet ainsi de représenter sous la forme d'un modèle circuit (figure 2.12.) le modèle fréquentiel de la ligne de transmission [C2-13].

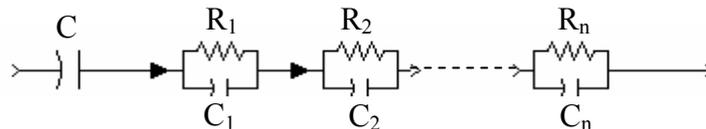


Fig. 2.12.: Représentation de l'impédance d'un supercondensateur basée sur la réponse fréquentielle

Avec :  $R_n = \frac{2R}{n^2 \pi^2}$  et  $C_n = \frac{C}{2}$  (II-11)

La figure 2.13. nous montre une comparaison entre la réponse fréquentielle théorique du modèle fréquentiel de la ligne de transmission et celle du modèle circuit précédent pour différentes valeurs de n. Cette figure montre que plus la valeur de n augmente, plus la réponse de ce modèle circuit se rapproche de celle du modèle fréquentiel.

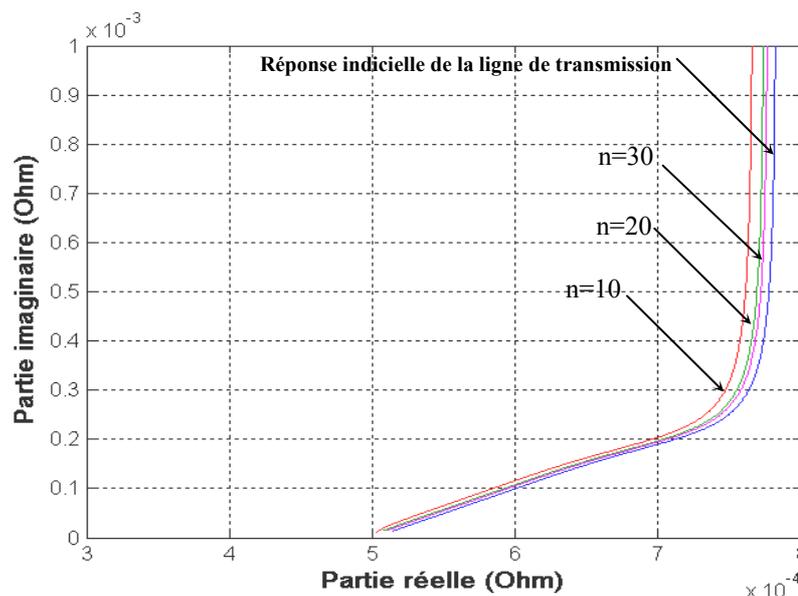


Fig. 2.13.: Diagramme d'impédance du modèle circuit pour différentes valeurs de n

### II.2.2.1. Validation du modèle circuit

La validation du modèle circuit précédent peut être faite sur le plan fréquentiel, mais aussi sur le plan temporel.

L'utilisation de la figure 2.11. ainsi que les formules (II-11) permet de calculer les caractéristiques du modèle fréquentiel :

$$R_n = \frac{6(R_{BF} - R_{HF})}{n^2 \pi^2} = \frac{6(0,784 - 0,47)}{n^2 \pi^2} = \frac{0,19}{n^2} m\Omega$$

$$C_n = \frac{C_{BF}}{2} = 1322,5 F$$

Avec une résistance série :  $r_s = R_{HF} = 0,47 m\Omega$

La figure 2.14. montre la comparaison de la réponse fréquentielle du modèle pour 20 branches avec une réponse fréquentielle mesurée sur le banc de test.

Cette figure illustre d'une part la bonne identification des caractéristiques du modèle à l'aide de ces mesures et d'autre part la validité du modèle circuit utilisé.

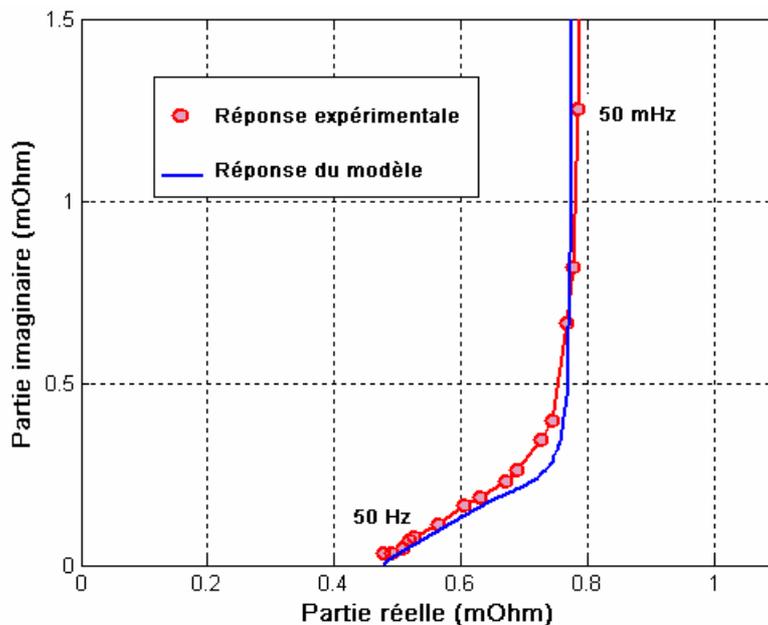


Fig. 2.14.: Comparaison de la réponse du modèle circuit ( $n = 20$ ) avec une réponse expérimentale ( $V_{sc}=1.58V$ )

### II.2.2.2. Avantages et limites du modèle

Le principal avantage de ce modèle est sa validité sur une plage assez large de fréquence. Cet avantage le rend très souple et utilisable pour différents types de cycles d'utilisation des supercondensateurs.

Une limitation de ce modèle concerne la méthode de caractérisation petits signaux réalisée habituellement, qui peut ne pas être représentative du comportement du supercondensateur pour les fortes intensités de courant. Dans notre cas, les mesures

fréquentielles ont été réalisées à l'aide de notre banc d'essai pour un courant de 20A sans l'utilisation d'impédance-mètre.

Des essais réalisés à très faible fréquence montrent les limites de cette approche. En effet, il apparaît des phénomènes de redistribution à l'intérieur du supercondensateur qui ne sont pas représentés par ce modèle. La figure 2.15. illustre l'écart apparaissant pour les très faibles fréquences (inférieure à 50mHz).

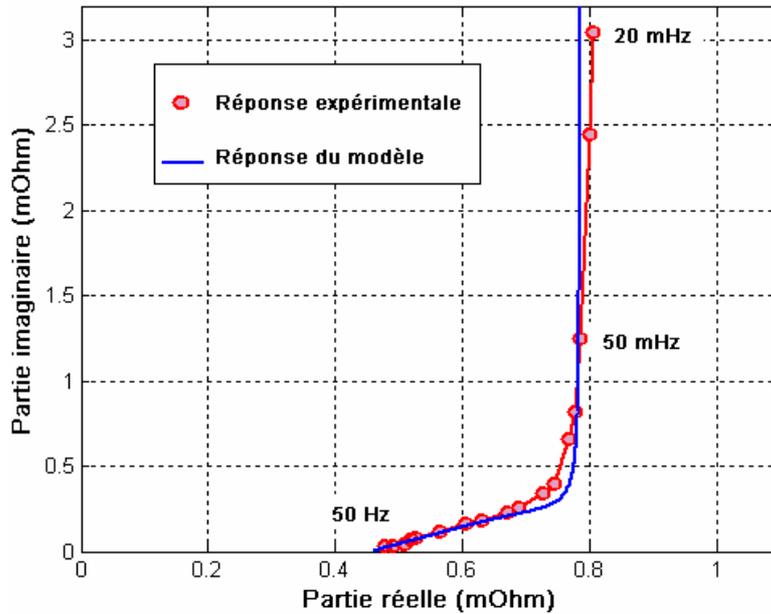


Fig. 2.15.: Limite du modèle fréquentiel pour les très faibles fréquences

L'existence de pores moins accessibles peut justifier le phénomène de redistribution à long terme des supercondensateurs. Ces pores sont représentés par une ou plusieurs branches RC supplémentaires. Chaque branche est caractérisée par une constante de temps qui représente l'accessibilité des pores. De fait, les constantes de temps de ces branches doivent être supérieures à celles qui représentent les phénomènes rapides (transmission des charges). La figure suivante montre la représentation de ce phénomène par des branches RC.

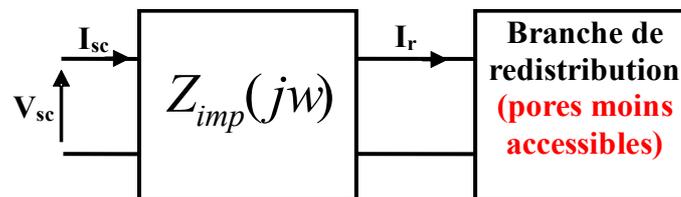


Fig. 2.16.: Utilisation des branches supplémentaires pour représenter la redistribution des charges

Afin de trouver l'impédance équivalente qui regroupe les deux blocs en parallèles, on utilise les formules (II-6) pour les branches qui représentent la phase rapide, et pour représenter la phase de redistribution, on utilise une seule branche RC,  $(R_1 + jZ_{C1})$  avec :

$$Z_{C1} = -\frac{1}{C_1\omega}$$

L'impédance équivalente vaut :

$$[\text{Re}(Z_{imp}(j.\omega)) + j \text{Im}(Z_{imp}(j.\omega))] / [R_1 + jZ_{C1}] \quad (\text{II-12})$$

Après simplification des calculs, l'impédance équivalente peut se mettre sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \text{Re}(Z_{eq}(\omega)) &= \frac{R_1 \left[ \left( \text{Re}(Z_{imp}(j.\omega)) \right)^2 + \left( \text{Im}(Z_{imp}(j.\omega)) \right)^2 \right] + \text{Re}(Z_{imp}(j.\omega)) \left[ R_1^2 + jZ_{C1}^2 \right]}{\left[ \text{Re}(Z_{imp}(j.\omega)) + \text{Im}(Z_{imp}(j.\omega)) \right]^2 + [R_1 + Z_{C1}]^2} \\ \text{Im}(Z_{eq}(\omega)) &= \frac{Z_{C1} \left[ \left( \text{Re}(Z_{imp}(j.\omega)) \right)^2 + \left( \text{Im}(Z_{imp}(j.\omega)) \right)^2 \right] + \text{Im}(Z_{imp}(j.\omega)) \left[ R_1^2 + jZ_{C1}^2 \right]}{\left[ \text{Re}(Z_{imp}(j.\omega)) + \text{Im}(Z_{imp}(j.\omega)) \right]^2 + [R_1 + Z_{C1}]^2} \end{aligned} \quad (\text{II-13})$$

La figure 2.17. montre une comparaison de la réponse du modèle fréquentiel sans la branche qui représente la redistribution (formule (II-6)) avec un modèle qui tient compte de la redistribution (formule (II-13)). La branche de redistribution est caractérisée dans cet exemple par une résistance  $R_1 = 1\Omega$  et une capacité  $C_1 = 100F$ .

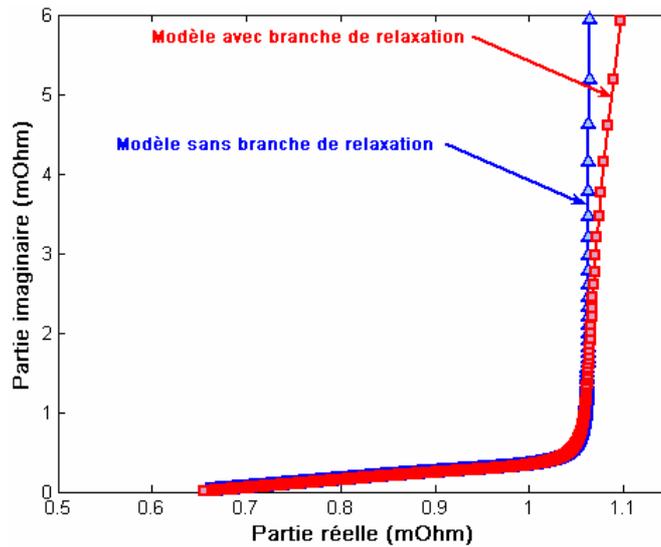


Fig. 2.17.: Influence des branches supplémentaires sur la réponse fréquentielle du supercondensateur

Cette figure montre qu'avec une branche supplémentaire représentant les phénomènes lents, on arrive à agir sur la pente de la caractéristique fréquentielle pour les très faibles fréquences.

### II.2.2.3. Avantages et limites de la caractérisation

L'avantage de la méthode de caractérisation utilisée avec ce modèle est la simplicité et la précision obtenue sur les valeurs des résistances haute et basse fréquences. Cette précision se répercute sur la bonne estimation de la résistance de la ligne de transmission, paramètre important du modèle, notamment pour le calcul des pertes.

Pour ce qui concerne la détermination de la valeur de la capacité de la ligne de transmission, ce modèle autorise une caractérisation découplée de celle des résistances, ce qui évite qu'une erreur sur la mesure d'un paramètre influe sur l'autre.

Par contre, une difficulté d'utilisation de ce modèle, concerne le nombre important d'essais à réaliser pour introduire la non-linéarité de la capacité du supercondensateur. Cette non-linéarité est mise en évidence sur la figure 2.18., où l'auteur a obtenu pour chaque valeur de tension une réponse différente des autres. Une difficulté supplémentaire concerne l'exploitation des mesures qui conduit à une faible précision sur la variation de la capacité. Une faible variation de la fréquence de détermination de  $C_{BF}$  induit une variation de sa valeur.

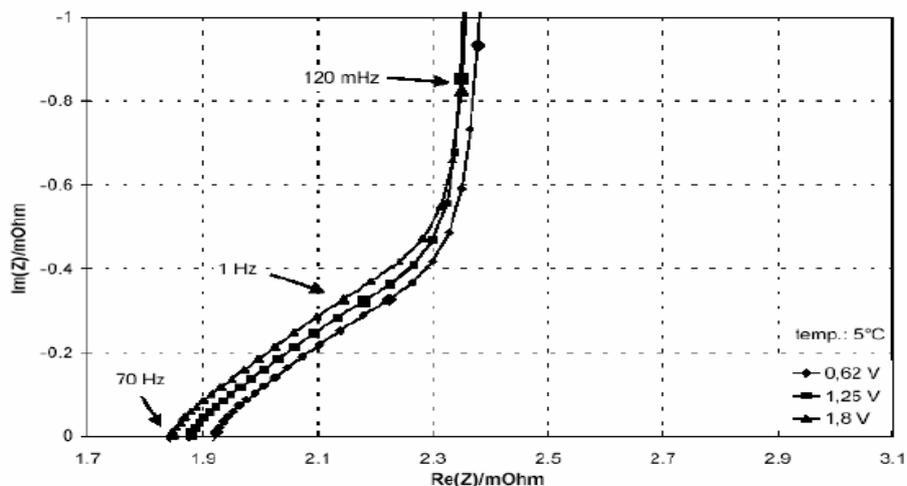


Fig. 2.18.: Diagramme d'impédance expérimentaux du supercondensateur MONTENA 2.5V/1400F [C2-6]

En conclusion, l'approche proposée par Buller est une méthode intéressante de modélisation et caractérisation du composant. Son défaut majeur concerne les moyens de caractérisation à employer. Elle nécessite a priori un matériel particulier (impédance-mètre) ne pouvant être employé en usage classique du composant. D'autre part l'identification du modèle nécessite un nombre important d'essais. Quand on sait que les caractéristiques d'un supercondensateur évoluent avec le temps, ce type d'approche paraît bien adapté à une utilisation « laboratoire », mais éloigné d'une approche facilement exploitable sur des applications industrielles pour une caractérisation on-line.

### II.2.3. Caractérisation avec injection d'un signal riche en fréquence

Afin d'utiliser les atouts de ce modèle dans le cadre d'une utilisation « Génie Electrique », une méthode d'identification fréquentielle originale a été mise en place au cours de nos travaux. Celle-ci ne nécessite plus l'utilisation d'un impédance-mètre. Elle est basée sur l'utilisation du banc de test du laboratoire et l'exploitation de la réponse temporelle du module testé pour des cycles charge/décharge à courant constant. Les durées des phases de charge et de décharge sont choisies presque égales. Le principe de cet essai est présenté sur la figure 2.19.. Cette figure montre le cycle de caractérisation utilisé pour étudier le comportement des supercondensateurs. La méthode de caractérisation consiste à utiliser la

décomposition en série de Fourier du courant injecté et celle de la réponse en tension du module testé.

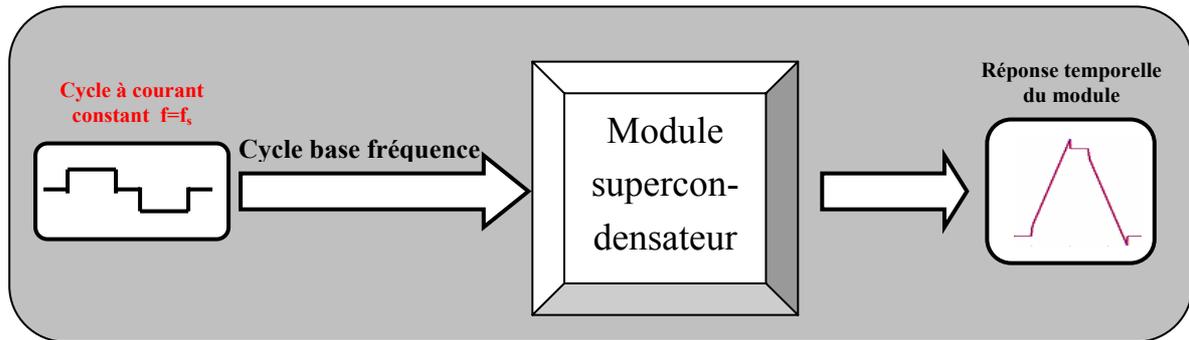


Fig. 2.19.: Utilisation du cyclage pour la caractérisation du supercondensateur

La figure 2.20. montre le type de cycles utilisés pour la caractérisation du module supercondensateur.

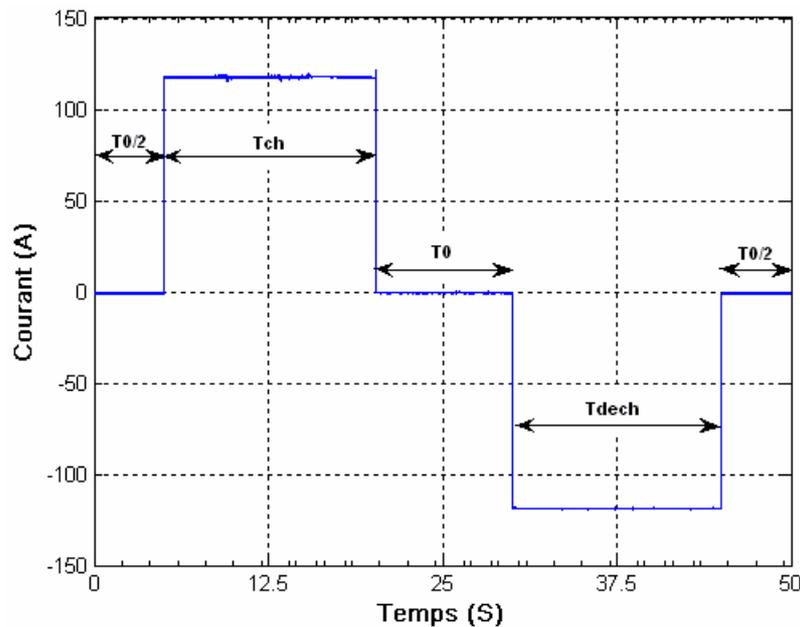


Fig. 2.20.: Type de cycles utilisés pour la caractérisation des supercondensateurs

Le courant injecté dans le module peut être défini de la façon suivante :

$$\begin{cases} i = I & [T_0 / 2, T_{Ch} + T_0 / 2] \\ i = -I & [T_{Ch} + 3.T_0 / 2, T - T_0 / 2] \\ i = 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

La décomposition en série de Fourier de ce signal représentant une fonction impaire se traduit par une somme de termes en sinus à des fréquences multiples de celles liées à la période du cycle, et d'ordre impair du fait de la symétrie de glissement.

La décomposition en série de Fourier du courant de cyclage donne les harmoniques suivantes :

$$i = I_1 \sin(2\pi f_s t) + I_3 \sin(2\pi(3f_s)t) + I_5 \sin(2\pi(5f_s)t) + \dots + I_{2n+1} \sin(2\pi((2n+1)f_s)t) \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$$I_i = \frac{4I}{\pi i} \cos(i\theta_0) \quad \theta_0 = \frac{T_0}{T} \pi \quad (\text{II-16})$$

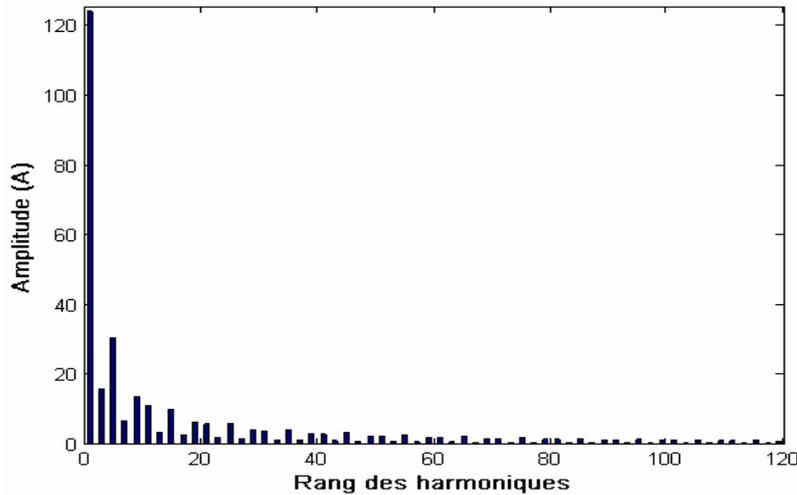


Fig. 2.21.: Amplitude des harmoniques du courant de cyclage

Afin de limiter l'influence des harmoniques de bruit, on pose trois critères pour le choix des harmoniques représentés dans la réponse fréquentielle du supercondensateur :

- On ne représente que les harmoniques impairs
- On ne représente que les harmoniques qui ont une amplitude supérieure à 1A
- On ne représente que les fréquences inférieures à  $200.f_s$  avec  $f_s=1/T$

La décomposition en série de Fourier de la réponse temporelle  $(V(t))$  du supercondensateur permet de trouver la réponse du système pour chaque fréquence élémentaire du signal injecté.

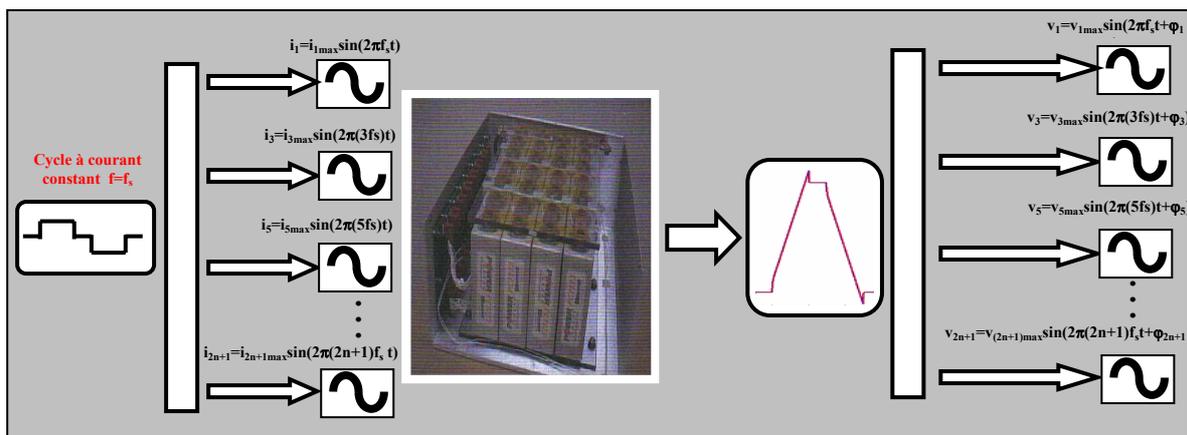


Fig. 2.22.: Principe de décomposition d'un signal riche en fréquence

Donc, pour chaque fréquence élémentaire du signal injecté, on obtient un point sur le plan complexe (plan de Nyquist) représentant le comportement du système à cette

fréquence. La figure 2.23. montre la comparaison de la réponse expérimentale du module caractérisé avec un cycle de période  $T=50s$  ( $f=20mHz$ ) dont les phases de charge/décharge durent 15 secondes pour un courant  $I=120A$ , avec celle du modèle fréquentiel.

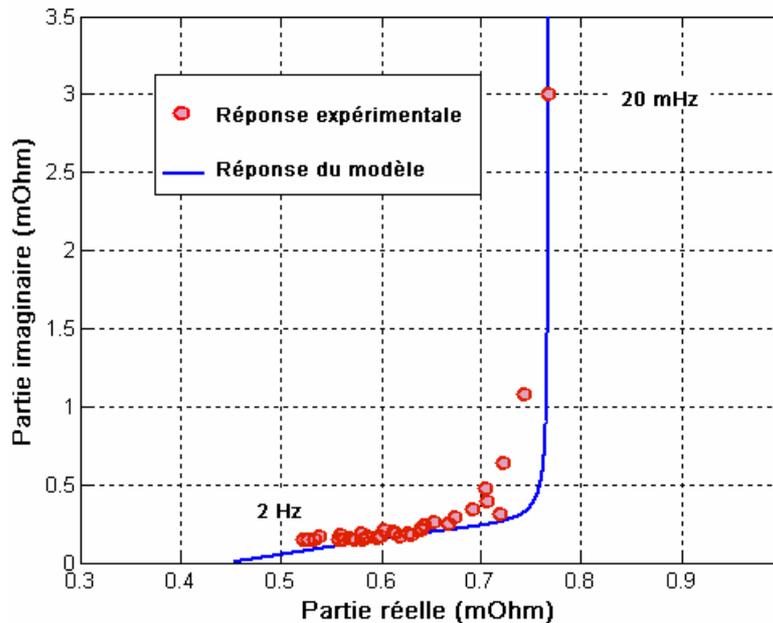


Fig. 2.23.: Comparaison de la réponse du modèle circuit avec une réponse expérimentale pour un cycle charge/décharge

Cette figure montre que la réponse fréquentielle d'un modèle caractérisé avec un cycle charge/décharge est proche de la réponse expérimentale du supercondensateur. On remarque qu'avec le cycle utilisé, la partie haute fréquence (2Hz-50Hz) de la ligne de transmission n'a pas pu être caractérisée. Cette partie de la caractéristique étant nécessaire pour la suite de l'étude (identification de  $R_{HF}$ ), il a été nécessaire de réaliser une seconde série d'essais. Différentes approches sont envisageables :

- Réaliser un essai complémentaire avec une durée de cycle plus courte de façon à étendre la plage HF.
- Utiliser un essai conservant la durée du cycle initial, mais imposant un plus fort courant (augmenter l'amplitude du courant de tous les harmoniques).
- Utiliser le cycle initial en y ajoutant une composante HF.

La dernière méthode a été choisie de façon à rester proche des cycles utilisés tout au long de notre étude.

#### II.2.4. Injection d'un harmonique 50Hz avec le courant de cyclage.

Afin de compléter la réponse fréquentielle du supercondensateur pour les faibles fréquences, on a choisi d'injecter avec le courant de cyclage un courant haute fréquence. La figure 2.24. montre la forme du courant injecté pour des cycles de période 50 secondes et un courant de charge/décharge de 120A. Avec ce courant de cyclage, on injecte un harmonique 50 Hz de 6,5A de courant crête (4,6A efficaces).

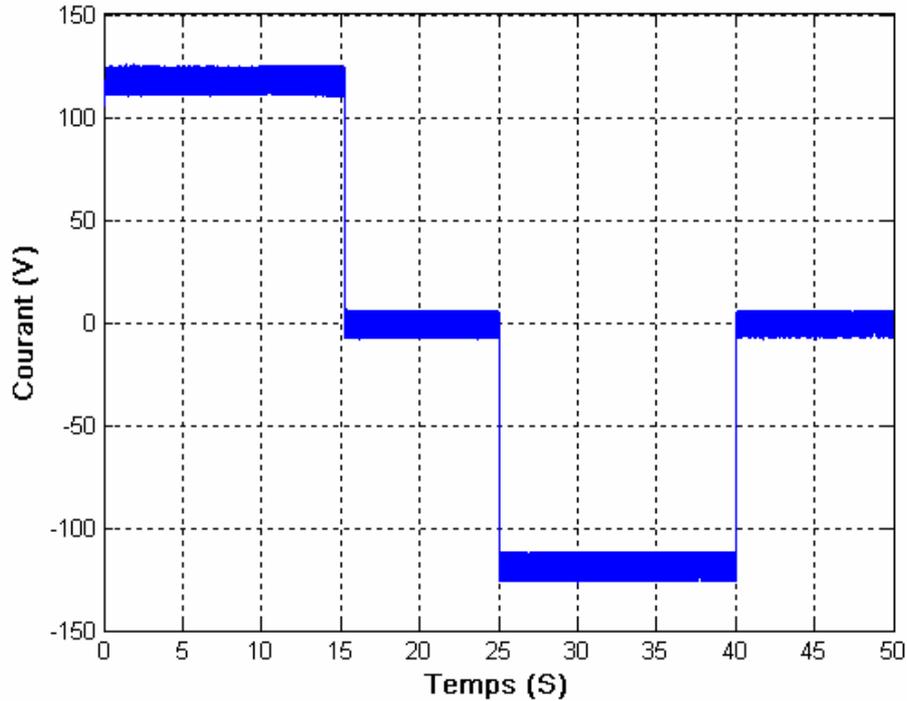


Fig. 2.24.: Courant de cyclage avec injection d'un harmonique haute fréquence ( $f_{HF} = 50Hz$ )

La figure 2.25. montre la réponse fréquentielle d'un élément du module supercondensateur avec l'injection d'un harmonique 50Hz.

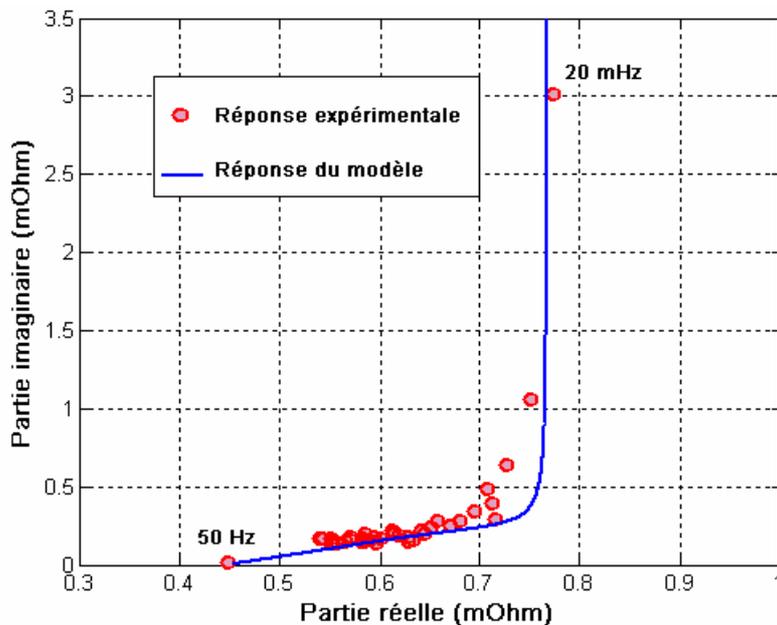


Fig. 2.25.: Comparaison de la réponse du modèle circuit avec une réponse expérimentale pour un cycle charge/décharge avec injection d'un harmonique haute fréquence

Cette figure montre qu'avec l'injection d'un harmonique haute fréquence, on obtient une réponse complète du supercondensateur qui représente le comportement du composant entre 20mHz et 50Hz.

### II.3. Modèle temporel à constantes réparties (Modèle analytique)

C'est une approche couramment utilisée dans le domaine thermique. On utilise le principe de propagation d'onde pour représenter l'évolution de la tension et du courant le long d'une ligne de transmission ; cette dernière est caractérisée par une résistance linéique  $r$  et une capacité linéique  $c$  (milieu homogène) (Figure 2.26.)[C2-14].

Cette approche se justifie physiquement par la notion de déplacement des ions de l'électrolyte dans les pores des électrodes constituant la capacité volumique du supercondensateur. Ce mécanisme n'étant pas instantané, il justifie ce type d'approche modélisant le supercondensateur comme une capacité répartie dans un volume avec des zones plus ou moins accessibles selon les caractéristiques géométriques des pores.

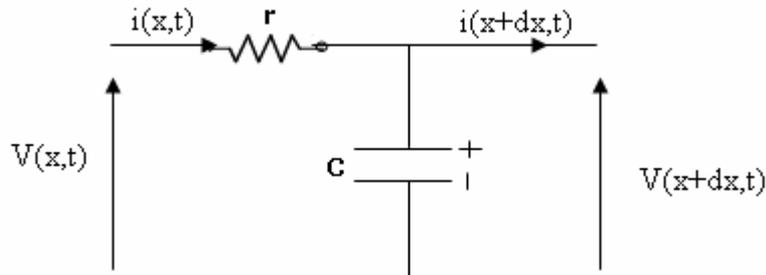


Fig. 2.26.: Réseau de transmission

Cette façon d'aborder le problème est de fait une approche temporelle de la ligne de transmission modélisée de façon fréquentielle dans le paragraphe précédent. Les équations mathématiques de propagation sont les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d^2 v(x,t)}{dx^2} = rc \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \\ \frac{d^2 i(x,t)}{dx^2} = rc \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

$$\begin{bmatrix} v(0,s) \\ i(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(me) & \frac{r}{m} sh(me) \\ \frac{m}{r} sh(me) & ch(me) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(e,s) \\ i(e,s) \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} m^2 = \frac{s}{\alpha} \\ \alpha = \frac{1}{rc} \end{cases}$$

En prenant la condition de Newman homogène, le courant de sortie de ce quadripôle pour  $x=e$  est nul, et en utilisant l'équation (II-18) on trouve :

$$\begin{cases} \bar{V}(0,s) = \frac{r \coth(me)}{m} \bar{i}(0,s) \\ \text{avec} \\ Z_{imp}(s) = \frac{r \coth(me)}{m} \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

En utilisant le développement en série de  $\coth(me)$ , on trouve :

$$Z_{imp}(s) = r\sqrt{\frac{\alpha}{s}} \left( 1 + \sum_{n=1}^{+\infty} \exp\left(-2n e\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \right) \quad (II-20)$$

La transformée inverse de cette fonction donne :

$$Z_{imp}(t) = r\sqrt{\frac{\alpha}{\pi t}} \left( 1 + 2\sum_{n=1}^{+\infty} \exp\left(\frac{-n^2 e^2}{\alpha t}\right) \right) \quad (II-21)$$

Dans notre cas, on suppose que l'on charge toujours à courant constant donc :

$$\begin{cases} \bar{V}(0,s) = \frac{Z_{imp}(s)}{S} I \\ \text{avec:} \\ Z_{ind}(s) = \frac{Z_{imp}(s)}{S} \end{cases} \quad (II-22)$$

La transformée inverse de  $Z_{ind}(s)$  s'écrit:

$$Z_{ind}(t) = \frac{t}{C} \sqrt{\frac{4\tau}{\pi t}} \left( 1 + 2\sum_{n=1}^{+\infty} \text{ierfc}\left(n\sqrt{\frac{\tau}{t}}\right) \right) \quad (II-23)$$

Avec :  $R=r.e =$  Résistance de la ligne de transmission et  $C=c.e =$  Capacité de la ligne de transmission

Où  $\text{ierfc}$  est l'intégrale première de la fonction complémentaire d'erreur  $\text{erfc}$  [C2-14].

D'après la courbe présentée sur la figure 2.27. qui représente  $V_{ind}(t)$  pour un réseau de transmission caractérisé par une résistance totale  $R=0.85m\Omega$  et une capacité totale  $C=2700F$ , on remarque pendant les premiers instants une variation non linéaire de l'impédance, ce qui nous donne la première spécificité des supercondensateurs par rapport aux condensateurs classiques.

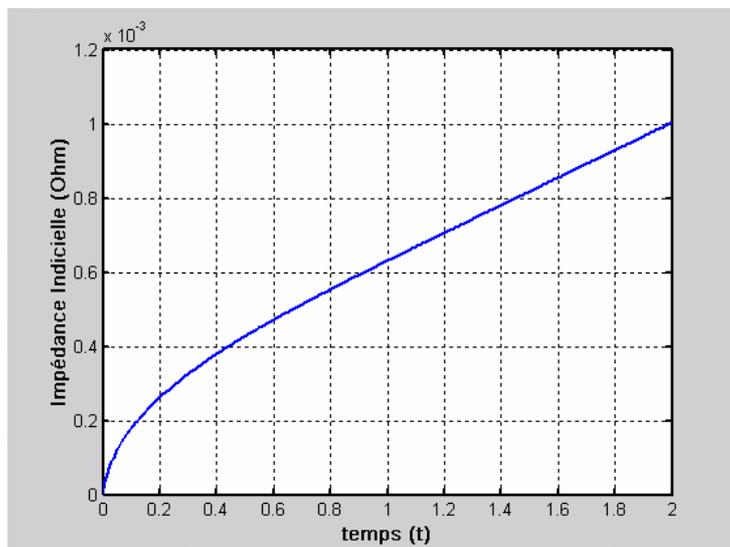


Fig. 2.27.: Impédance inductive d'une ligne de transmission ( $C=2700F, R=0.85m\Omega$ )

### II.3.1. Limites du modèle analytique

Le principe du modèle à constantes réparties est, comme pour le modèle fréquentiel, de représenter les phénomènes internes rapides d'un supercondensateur. Ainsi, il représente la phase de charge avec précision à condition d'être capable d'identifier les paramètres de ce type de modèle.

D'un autre côté, ce modèle ne peut être utilisé que pour la phase de charge, mais il n'est pas exploitable pour la modélisation de la phase dite de redistribution, qui correspond en fait à des phénomènes lents.

## II.4. Modèles à constantes localisées :

Pour arriver à représenter ces phénomènes lents, des modèles à constantes localisées sont utilisés. Ainsi, le supercondensateur est représenté par une représentation finie de composants de type  $R_i - C_i$ . Ces derniers sont définis en choisissant des constantes de temps différentes et adaptées à l'utilisation envisagée; il est alors nécessaire de caractériser ces éléments en identifiant les branches  $R_i - C_i$  utilisées.

Dans ce cas, au lieu de prendre une résistance  $r_i$  et une capacité  $c_i$  linéiques (milieu homogène) comme défini dans la partie précédente, on prend des circuits  $R_i - C_i$  indépendants les uns des autres du point de vue de l'identification grâce aux différences de constantes de temps imposées.

Ce type de modèle a été notamment proposé par L.Zubieta et al. , et ensuite amélioré par F.Belhachemi et al.

Dans les différents cas, le principe est de proposer un schéma équivalent de représentation du composant et une méthode de détermination des paramètres cohérente avec les hypothèses émises sur le modèle proposé.

En effet, dans un cycle classique d'utilisation, il apparaît quatre phases successives : une phase de charge, une de décharge et entre ces deux phases, une phase de repos à courant nul. Ces quatre phases de fonctionnement sont décrites dans le tableau suivant :

	<p><b>Phase 1 (charge avec un créneau de courant):</b> On charge l'élément supercondensateur à courant constant <math>I_{sc}=Cst</math>. Les branches qui représentent la redistribution des charges n'interviennent pas dans cette phase à cause de leur grande constante de temps.</p>
	<p><b>Phase2 (repos à courant nul) :</b> L'élément est au repos (<math>I_{sc} = 0</math>). Les deux capacités <math>C1</math> et <math>C2</math> qui représentent la redistribution n'ont pas le même niveau de tension que celles de la ligne de transmission. Elles vont alors se charger.</p>
	<p><b>Phase3 (décharge avec un créneau de courant) :</b> On décharge l'élément supercondensateur avec un courant négatif constant <math>I_{sc}(négatif)=Cst</math>, les branches de redistribution ne sont pas concernées par cette phase à cause de leur grande constante de temps <math>\tau_1=R_1C_1</math> et <math>\tau_2=R_2C_2</math>.</p>
	<p><b>Phase4 (repos à courant nul) :</b> L'élément est au repos (<math>I_{sc} = 0</math>). Les deux capacités <math>C1</math> et <math>C2</math> n'ont pas le même niveau de tension que celles de la ligne de transmission. Cette fois, ce sont les capacités de la ligne de transmission qui vont se charger grâce aux charges stockées dans les capacités de redistribution.</p>

### II.4.1. Modèle à deux branches [C2-7] :

Ce modèle décrit le comportement du système en faisant une décomposition de la réponse de ce dernier en plusieurs parties ; chaque partie est représentée par une constante de temps différente (Figure 2.28.).

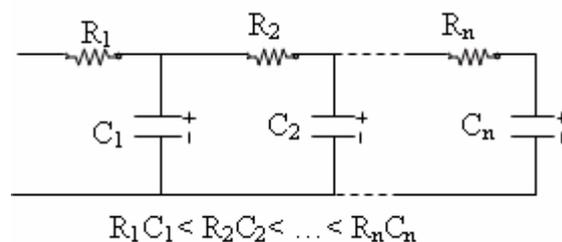


Fig. 2.28.: Modèle comportemental d'une ligne de transmission

L.Zubieta et R.Bonert ont exploité cette idée pour modéliser le supercondensateur. Ils ont décomposé la réponse d'un supercondensateur en deux parties :

- 1- Une partie rapide qui prend en compte la phase de charge (phase rapide). Au lieu de prendre un système de propagation tel qu'il est pris dans le modèle à constantes réparties, il modélise cette phase par une résistance  $R$  et une capacité non linéaire  $C$  (pas de phénomène de propagation des charges).
- 2- Une partie lente qui prend en compte la phase de redistribution des charges durant la phase de repos ( $I=0$ ). Cette phase est modélisée par des branches R-C avec des constantes de temps plus grandes que celle prise pour la phase rapide. La figure 2.29. nous montre le type de modèle circuit de supercondensateur pouvant être utilisé avec l'approche proposée par L.Zubieta et R.Bonert. La caractérisation des paramètres de ce modèle a été réalisée avec la méthode proposée par F.Belhachemi et décrite dans la partie suivante.

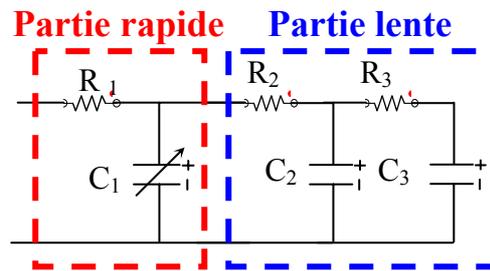


Fig. 2.29.: Modèle de supercondensateur proposé par Zubieta

La figure 2.30. montre une comparaison de la réponse du modèle à deux branches avec la réponse expérimentale pour un essai à courant constant  $I=100A$ . Cette figure montre que par rapport au modèle classique R-C, la réponse de ce modèle à deux branches suit bien la réponse expérimentale après 90 secondes de la fin de la phase de charge. La chute de tension après la phase de charge est bien prise en compte par ce modèle. Par contre, ce modèle ne résout pas le problème des phases transitoires.

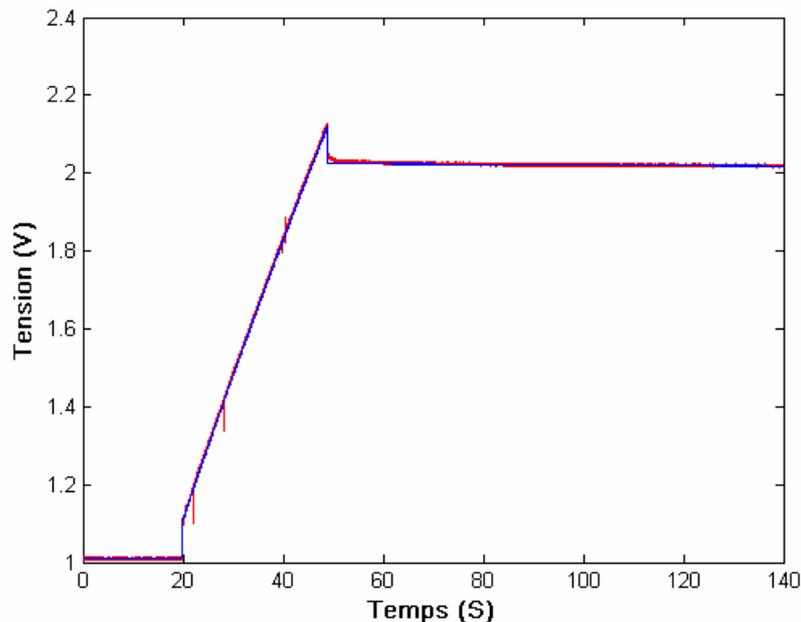


Fig. 2.30.: Comparaison de la réponse du modèle à deux branches avec la réponse expérimentale pour un essai à courant constant  $I=100A$

Afin de montrer les limites de ce modèle on peut tester la réponse de ce modèle pour deux essais de charge complète avec deux courants 10A et 50A.

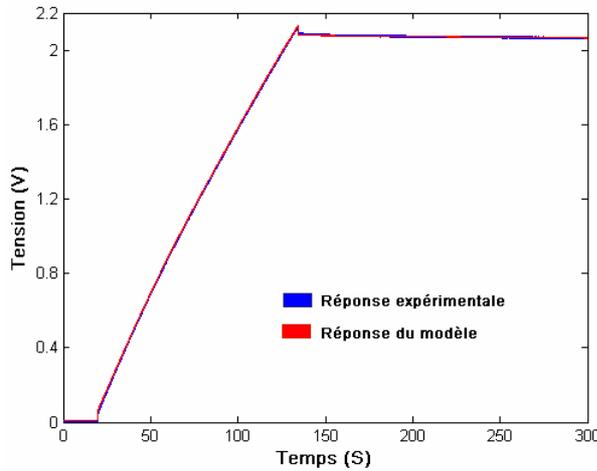


Fig. 2.31.: Essai de charge complète à 50A

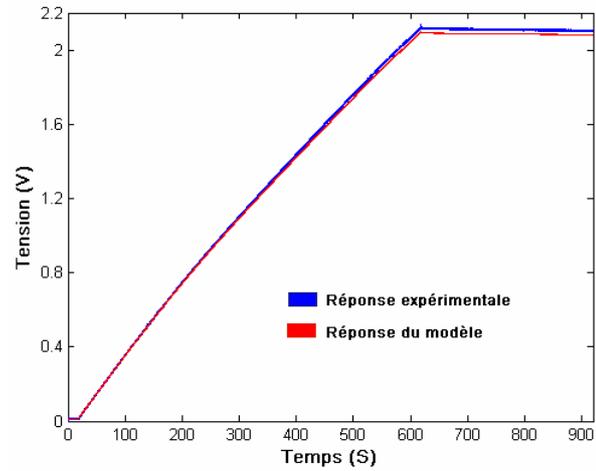


Fig. 2.32: Essai de charge complète à 10A

La figure 2.31. montre que la réponse du modèle suit bien la réponse expérimentale pour le premier essai de charge à 50A. Par contre pour l'essai à 10A, la réponse du même modèle s'éloigne de la réponse expérimentale à la fin de cet essai (Figure 2.32). Ces essais montrent la difficulté d'identification des branches qui représentent la redistribution des charges.

#### II.4.2. Modèle multi-branches [C2-14] :

Ce modèle complète le précédent en incluant les phénomènes de propagation de charges apparaissant sur la tension du composant juste après les variations brutales de courant (courbure de la forme d'onde de tension). Cette méthode utilise un modèle simplifié de la ligne de transmission pour représenter la propagation des charges durant le transitoire (phase rapide) et essaie de prendre mieux en compte le comportement lent des supercondensateurs. Dans ce qui suit, nous proposons une étude détaillée de ce modèle ; en effet, le modèle final que nous utiliserons par la suite utilise une approche similaire à celui-ci mais se différencie par la méthode d'identification des paramètres.

##### II.4.2.1. Modèle circuit issu du modèle temporel analytique de la ligne de transmission :

Au lieu de prendre une résistance et une capacité linéique pour le réseau de transmission tel qu'il est considéré avec le modèle analytique, on utilise une ligne discrétisée en n cellules identiques [C2-15].

$$\begin{cases} R_i = \frac{R}{n} \\ C_i = \frac{C}{n} \end{cases} \quad (II-24)$$

Où :

R : résistance de la ligne de transmission

C : capacité de la ligne de transmission

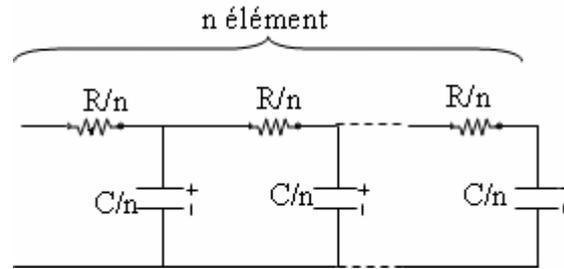


Fig. 2.33.: Modèle simplifié de la ligne de transmission

La figure 2.34. montre la variation temporelle de l'impédance indicielle du modèle simplifié d'une ligne de transmission pour différentes valeurs de  $n$  (le nombre d'éléments utilisés). Ces réponses sont comparées à la réponse analytique d'une ligne de transmission (formule (II-23)). Avec ces résultats, on vérifie que le modèle circuit se rapproche de la réponse du modèle analytique quand on augmente le nombre  $n$  de branches.

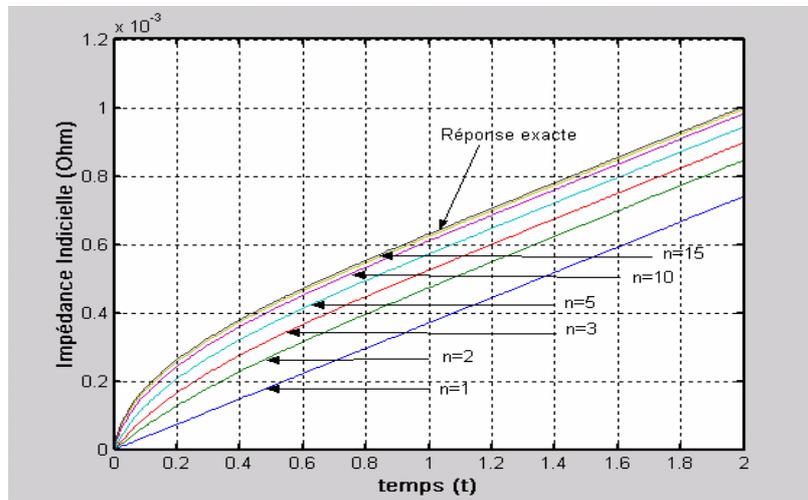


Fig. 2.34.: Simulation du modèle circuit d'une ligne de transmission ( $C=2700F, R=0.85m\Omega$ )

Afin de représenter les phénomènes lents, des réseaux RC avec des constantes de temps plus élevées que celles prises pour la phase de charge sont ajoutés. Par contre, le nombre de cellules choisies pour ces branches complémentaires dépend du temps pour lequel le modèle doit être valide. Par rapport à nos conditions d'utilisation (banc de cyclage), la fréquence des cycles utilisés pour la caractérisation dépasse les 5mHz, ce qui fait qu'un modèle valide pour environ 200 secondes et modélisé par deux cellules de redistribution est utilisé.

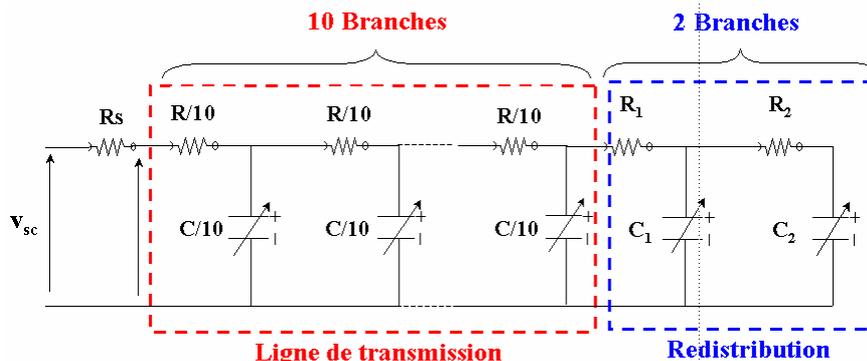


Fig. 2.35.: Schéma du modèle multi-branches

### II.4.2.2. Identification des paramètres du modèle

#### A. Paramètres de la ligne de transmission :

##### ➤ Variation de la capacité de la ligne de transmission :

La capacité de la ligne de transmission est identifiée en effectuant un essai de charge complet de 0V à 2V avec un faible courant (figure 2.36.). Pour chaque valeur de la tension ( $V_i$ ), on mesure la pente de la réponse temporelle. Afin de trouver la valeur de la capacité pour cette tension, on utilise la formule suivante :

$$C(V_i) = \frac{I}{\text{pente}(V(t))|_{V=V_i}} \quad (\text{II-25})$$

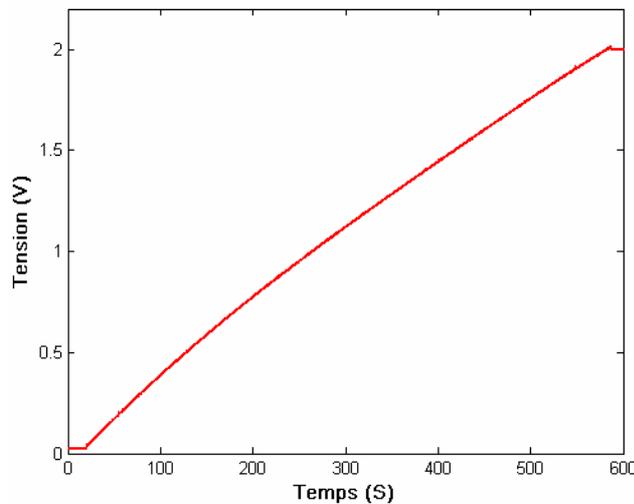


Fig. 2.36.: Essai de charge complète du supercondensateur

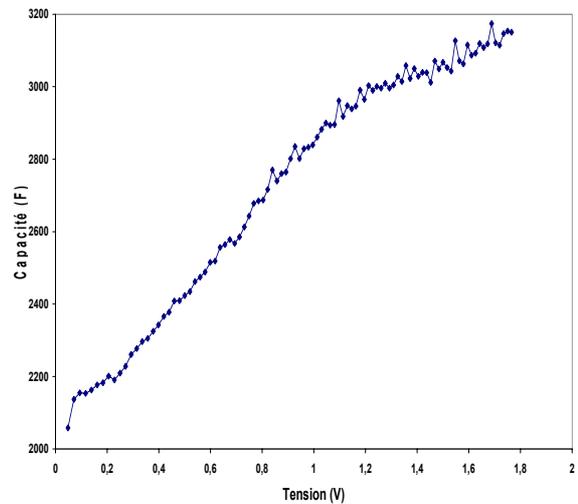


Fig. 2.37: Variation de la capacité en fonction de la tension

D'après ces résultats on peut constater que la capacité augmente avec la tension de l'élément supercondensateur et que sa valeur sature pour des tensions proches de la tension maximale.

##### ➤ Variation de la résistance de la ligne de transmission :

Pour calculer la résistance de la ligne de transmission ( $R$ ), on utilise la relation théorique de l'impédance inductive, car le modèle simplifié de la ligne de transmission est une simplification du modèle analytique:

$$Z_{ind}(t) = \frac{t}{C} \sqrt{\frac{4\tau}{\pi t}} \left( 1 + 2\sqrt{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \text{ierfc} \left( n\sqrt{\frac{\tau}{t}} \right) \right) \quad (\text{II-26})$$

$$\text{Avec : } \lim_{t \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \text{ierfc} \left( n\sqrt{\frac{\tau}{t}} \right) = 0 \quad (\text{II-27})$$

Donc :

$$Z_{ind}(t) = \sqrt{\frac{4R}{\pi C}} \sqrt{t} \quad (\text{II-28})$$

La réponse en tension s'écrit alors :

$$V(t) = R_s I + \sqrt{\frac{4R}{\pi C}} \sqrt{t} \quad (\text{II-29})$$

La pente de la caractéristique  $V = f(\sqrt{t})$  permet de calculer la valeur de la résistance de transmission.

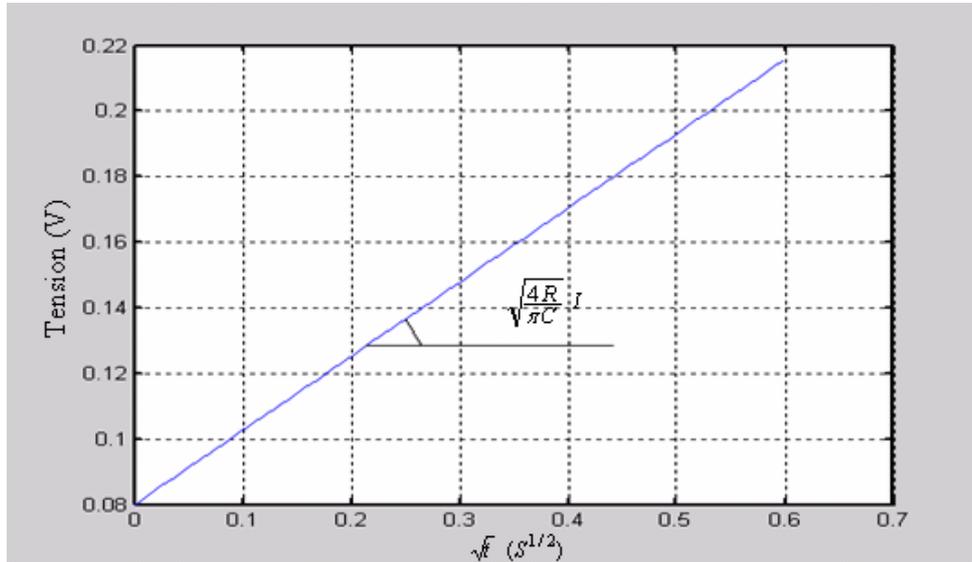


Fig. 2.38.: Identification de la résistance totale de la ligne de transmission

$$\text{pente}(V = f(\sqrt{t})) = \frac{\Delta V}{\Delta \sqrt{t}} = \sqrt{\frac{4R}{\pi C}} \Rightarrow R = \left( \frac{\Delta V}{\Delta \sqrt{t}} \right)^2 \frac{\pi C}{4} \quad (\text{II-30})$$

### B. Paramètres des branches complémentaires

Les branches complémentaires représentant la redistribution des charges sont caractérisées par des constantes de temps relativement plus grandes que celle de la ligne de transmission. Deux branches supplémentaires sont ici utilisées ( $\tau_1 = R_1 C_1$  et  $\tau_2 = R_2 C_2$  avec  $\tau_1 \ll \tau_2$ ), ce qui permet de représenter le comportement d'un supercondensateur pendant 200s.

Pour calculer les paramètres de la première branche ( $R_1, C_1$ ), on suppose logiquement que la branche la plus lente ( $R_2 C_2$ ) intervient peu sur des durées courtes, compte tenu des constantes de temps respectives utilisées.  $R_2 C_2$  est donc négligée au cours de cette identification.

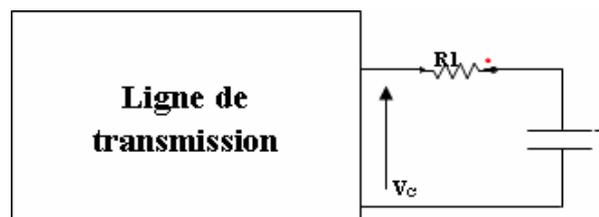


Fig. 2.39.: Identification des paramètres de la première branche de redistribution

Afin de trouver les paramètres des deux branches qui représentent la redistribution, deux essais de charge partielle sont effectués. La durée de charge est plus courte pour l'identification de R1C1 que pour celle de R2C2 ; ce choix est justifié par la constante de temps plus élevée pour ce dernier cas ; il faut plus de temps pour l'identifier (figure 2.40.). Pour identifier chaque branche, on suppose que la redistribution est terminée à l'instant d'identification. La capacité C1 est considérée complètement chargée à l'instant t1 ( $V_C=V_{C1}=V_1$ ), de même pour la capacité C2 à l'instant t2 ( $V_C=V_{C1}=V_{C2}=V_2$ ).

➤ **Identification de la première branche de redistribution R1C1**

**Identification de C1:**

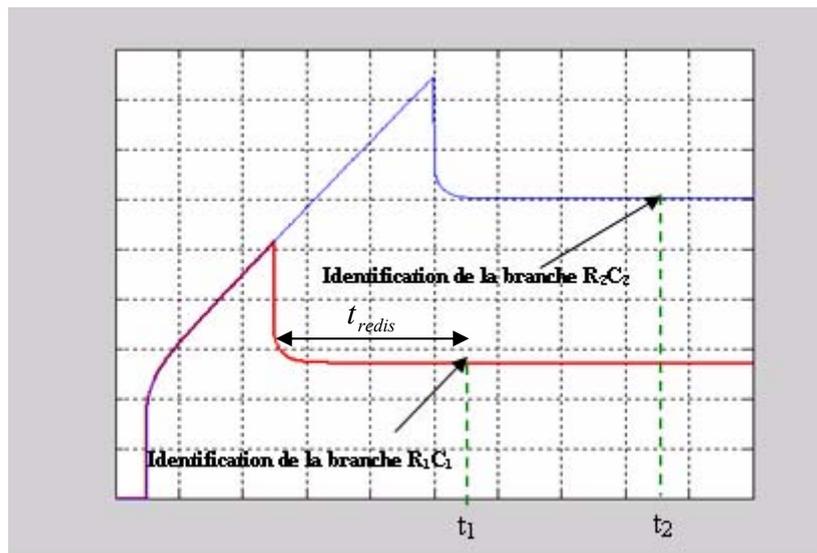


Fig. 2.40.: Identification des Branches R1C1 et R2C2

La charge stockée par le supercondensateur est  $Q=I \Delta t$

En utilisant l'hypothèse de conservation de la charge :

$$Q = \int_0^{V_1} C(v) \cdot dv + \int_0^{V_1} C_1(v) \cdot dv \tag{II-31}$$

$$\text{Donc } Q = C_m \cdot V_1 + C_{1m} \cdot V_1 \tag{II-32}$$

Avec  $C_m$  : est la valeur moyenne de  $C(v)$  sur l'intervalle de tension  $[0, V_1]$   
 $C_{1m}$  : est la valeur moyenne de  $C_1(v)$  sur l'intervalle de tension  $[0, V_1]$

A partir de cette équation, on obtient pour  $C_{1m}$  :

$$C_{1m} = \frac{Q}{V_1} - C_m \tag{II-33}$$

En utilisant cette fonction, on trouve une relation  $C_1(v)$  en fonction de  $C(v)$  :

$$C_1(v) = \frac{C_{1m}}{C_m} \cdot C(v) \tag{II-34}$$

**Identification de R1 :**

La durée de la phase de redistribution est :  $t_{redis} = 5 \cdot \tau_1 = 5 \cdot R_1 \cdot C_{1m}$

D'où la détermination de R1 :  $R_1 = \frac{t_{redis}}{C_{1m}}$  (II-35)

➤ **Identification de la deuxième branche de redistribution R2C2 :**

Les paramètres de la deuxième branche de redistribution sont identifiés de la même façon que la première, mais avec une durée de charge et de redistribution plus longue (Figure 2.40.). Pour cette identification on peut supposer que la redistribution s'effectue entre les deux branches de redistribution pour simplifier le calcul de R2.

**II.4.2.3. Modèle global du module testé :**

Dans notre cas, nous avons caractérisé un module de 24 éléments. Aussi, on définit un modèle moyen des éléments supercondensateurs en divisant toutes les réponses résultants des essais de caractérisation par 24. On obtient alors la réponse moyenne d'un élément du module testé.

Les procédures d'identification appliquées sur le module testé, constitué de 24 éléments supercondensateurs (EPCOS/B49300/2700 F) ont conduit aux valeurs suivantes avec de plus  $R_s = 0.6 \text{ m}\Omega$ .

Branches → Caractéristiques ↓	Ligne de transmission C (F), R (mΩ)	Branche 1 de redistribution C <sub>1</sub> (F), R <sub>1</sub> (mΩ)	Branche 2 de redistribution C <sub>2</sub> (F), R <sub>2</sub> (mΩ)
Capacité (F)	$-250 v^2 + 1115,1 v + 2010$	$-10,67 v^2 + 47,59 v + 85,79$	$-3,67 v^2 + 16,39 v + 29,54$
Résistance	1,1mΩ	100mΩ	1 Ω

Tab. 2.1-variation des différentes capacités du modèle multi-branches

**Validation expérimentale du modèle et de sa caractérisation**

Les résultats de la simulation du modèle multi-branches pour une charge partielle à 100A (figures 2.41.), témoignent d'une identification correcte des paramètres pour ce type d'essai.

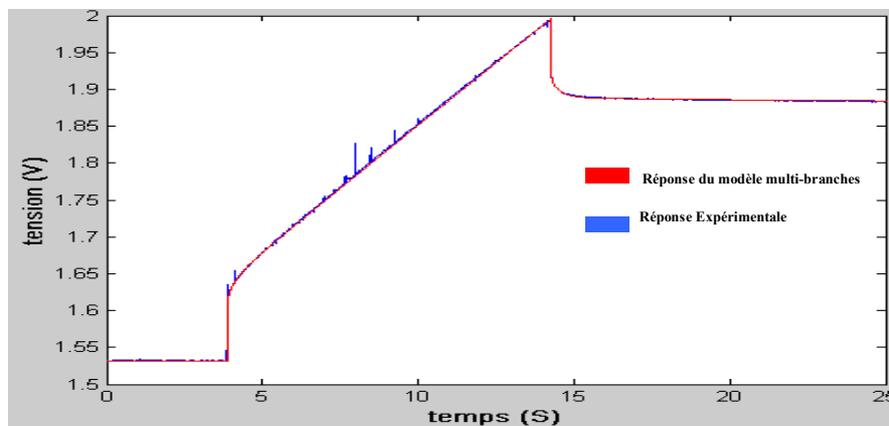


Fig. 2.41.: Simulation du modèle multi-branches pour une charge partielle (I=100A)

#### **II.4.2.4. Avantages et limites du modèle et de sa caractérisation**

Ce modèle est basé sur la décomposition du comportement du supercondensateur en deux phases découplées (phase rapide/phase lente), et la supposition que chaque phase n'influe pas sur l'autre. Cette hypothèse n'est malheureusement pas exploitable du fait qu'on modifie les conditions d'utilisation du composant (courant, durée des cycles). En plus, les méthodes de caractérisation utilisées pour identifier la résistance de transmission font également appel à l'approximation d'une formule complexe. Comme la valeur de cette résistance est très faible, cette approximation influe fortement sur la valeur de la résistance calculée.

D'autre part l'identification des capacités des branches de redistribution est basée sur une soustraction de deux grandeurs mesurées afin de trouver des faibles valeurs de capacité (formule (II-33)). Une faible erreur sur ces deux grandeurs engendre une erreur importante sur les valeurs des capacités. Enfin, l'identification de la résistance série ( $r_s$ ) par la méthode temporelle (mesure de la chute ohmique) dépend de la bande passante du système d'acquisition.

De façon globale, on remarque que pour l'identification des paramètres de ce modèle, il existe un lien entre certains paramètres ( $R=f(C)$ ,  $C1=f(C)$ ...). Ce lien conduit à une accumulation d'erreurs de caractérisation.

### **II.5. Méthode proposée pour l'identification d'une ligne de transmission**

Comme on l'a montré dans la partie (I.2), le modèle fréquentiel est basé sur la comparaison de la réponse fréquentielle d'un supercondensateur avec la réponse fréquentielle d'une ligne de transmission. *Le modèle circuit issu du modèle fréquentiel est obtenu par une mise en série de circuits R-C parallèles et caractérisé à l'aide d'essais de type fréquentiel.*

De même, le modèle temporel présenté est basé sur la comparaison de la réponse indicielle d'un supercondensateur avec le modèle à constantes réparties d'une ligne de transmission. *Le modèle circuit issu de ce modèle est représenté par une mise en parallèle de circuit R-C série et caractérisé par des essais de type temporel.*

*Le modèle utilisé par la suite est le modèle circuit issu du modèle temporel de la ligne de transmission. La méthode de caractérisation proposée consiste à utiliser d'une part la réponse fréquentielle du supercondensateur pour identifier la résistance de transmission et la résistance série, et d'autre part d'utiliser la réponse temporelle du supercondensateur pour identifier la capacité du modèle.*

Le but de cette procédure est d'éviter le cumul des erreurs de caractérisation. La nouvelle démarche doit permettre de profiter des avantages du modèle circuit issu du modèle temporel de la ligne de transmission (non-linéarité de la capacité, variation des paramètres en fonction de la température) et de l'utilisation de la réponse fréquentielle pour obtenir une valeur plus précise de la résistance série et de celle de la ligne de transmission. *Cette méthode de caractérisation permet aussi d'avoir un modèle utilisant moins de*

paramètres, avec une bonne réponse temporelle. En effet, les branches de redistribution des charges utilisées dans le modèle de F.Belhachemi deviennent en partie inutiles, car elles sont directement prises en compte par la ligne de transmission du fait de sa caractérisation.

### II.5.1. Lien entre les modèles circuits issus des approches fréquentielles et temporelles :

Les deux approches fréquentielle et temporelle permettent de définir le lien entre les paramètres des modèles circuits obtenus par ces deux méthodes. En effet, les paramètres communs à ces deux représentations sont les paramètres (R, C) de la ligne de transmission dont la représentation est faite avec des circuits équivalents différents.

Les caractéristiques du modèle obtenu à partir de la méthode fréquentielle sont données en fonction des caractéristiques de la ligne de transmission R-C:

$$R_n = \frac{2R}{n\pi} \quad \text{et} \quad C_n = \frac{C}{2}$$

L'utilisation de la réponse fréquentielle (figure 2.42.) permet de trouver les paramètres de la ligne de transmission :

$$R = 3 \cdot (R_{BF} - R_{HF}), \quad C = C_{BF} \quad \text{et} \quad r_s = R_{HF} \quad (\text{II-36})$$

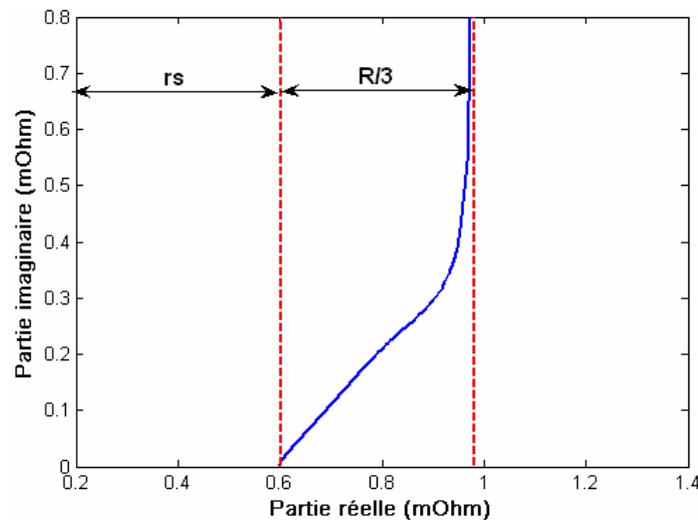


Fig. 2.42.: Utilisation de la réponse fréquentielle pour calculer la résistance série et la résistance de transmission

Le modèle circuit issu de l'approche temporelle peut être alors défini avec les valeurs de R et C déterminées avec l'approche fréquentielle:

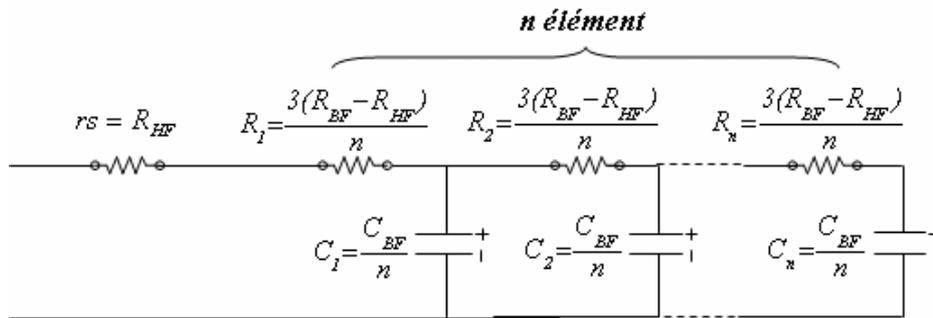
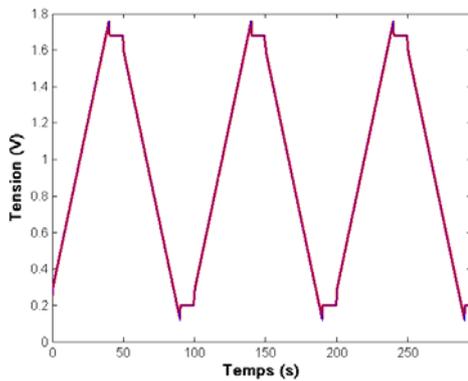
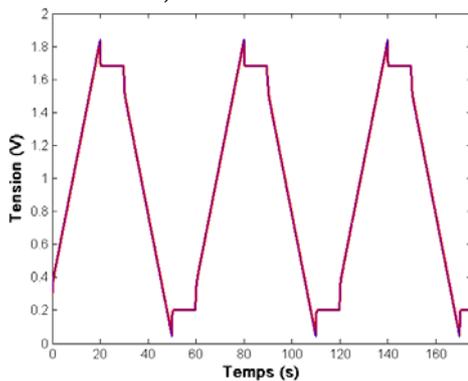
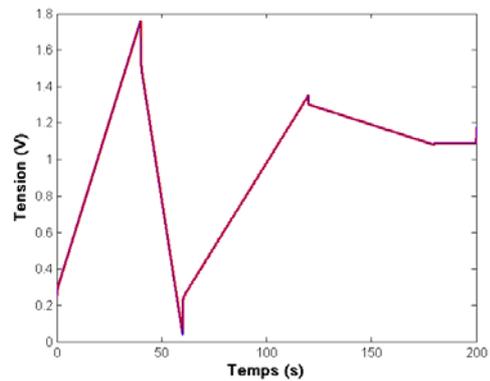


Fig. 2.43. : Paramétrage fréquentiel de la ligne de transmission

Les figures 2.44. et 2.45 montrent une comparaison entre la réponse d'un modèle fréquentiel caractérisé par  $R_{BF} = 0,00077\Omega$ ,  $C_{BF} = 2700F$  et  $R_{HF} = 0,0005$  avec un nombre de branches  $n=15$ , et la réponse du modèle simplifié de la ligne de transmission caractérisé par  $R=3.(R_{BF}-R_{HF})=0,0008\Omega$ ,  $C=C_{BF}=2700F$  et  $rs=R_{HF}=0,0005\Omega$  avec un nombre de branches  $n=10$ . On remarque que dans notre cas on a choisi un nombre de branches différent pour les deux modèles, car l'influence du nombre de branches ( $n$ ) sur l'erreur du modèle n'est pas le même pour les deux cas.



a) Courant I=50A



b) Courant I=100A

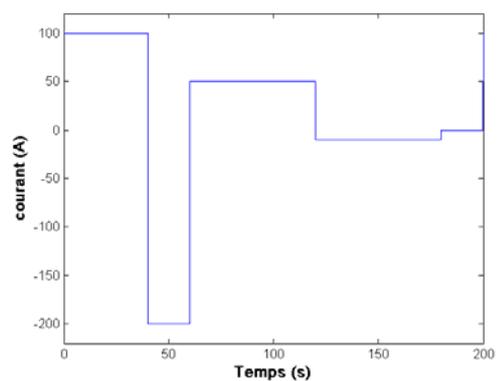


Fig. 2.44.: Réponse d'un supercondensateur pour des cycles charge/décharge

Fig. 2.45: Réponse d'un supercondensateur pour des cycles à différents niveaux de courant

D'après ces figures on vérifie qu'un modèle simplifié de la ligne de transmission avec une caractérisation basée sur la réponse fréquentielle donne la même réponse qu'un modèle issu de l'approche fréquentielle. Ces figures illustrent le fait que les deux modèles circuits issus des deux approches sont équivalents.

Comme on l’a déjà expliqué dans le paragraphe II.2.2.3., il est délicat d’introduire la non-linéarité de la capacité avec l’utilisation de la caractérisation fréquentielle. De ce fait, il est préférable d’identifier cette capacité à l’aide de la réponse temporelle obtenue sur la figure 2.37 et introduisant directement la non-linéarité de la capacité en fonction de la tension dans un essai à courant constant.

Le tableau suivant nous montre les paramètres du modèle circuit (figure 2.43.) utilisés avec la nouvelle méthode de caractérisation de la ligne de transmission, ainsi que la méthode d’identification de chacun de ses paramètres. C’est ce type de modélisation et d’identification qui est utilisé dans la suite des travaux.

Paramètre	Valeur	Méthode d’identification
rs : résistance série	$R_{HF}$	Réponse fréquentielle
R : résistance de transmission	$3(R_{BF}-R_{HF})$	Réponse fréquentielle
C : capacité de transmission	$C=f(v)$ (fig . 2.37)	Réponse temporelle (essai de charge complet avec un courant faible)

Tab. 2.2-caractérisation du modèle simplifié de la ligne de transmission

L’utilisation de la figure 2.25. permet de trouver la valeur de la résistance de transmission et de la résistance série, issus de notre module.

$$r_s = R_{HF} = 0,45 \text{ m}\Omega \quad (f= 50\text{Hz})$$

$$R = 3(R_{BF} - R_{HF}) = 0,958 \text{ m}\Omega \quad (R_{BF} \text{ mesurée pour } f= 20\text{mHz})$$

La figure 2.37 nous donne la variation de la capacité C en fonction de la tension :

$$C = -250,5 V_{sc}^2 + 1115 V_{sc} + 2010 \tag{II-37}$$

La figure suivante montre une comparaison de la réponse du modèle développé avec une réponse expérimentale d’un élément du module pour un essai de charge complète à 10A.

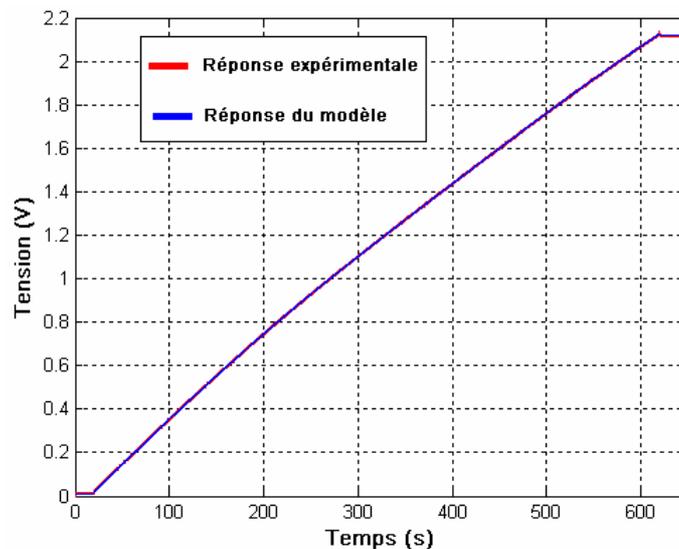


Fig. 2.46.: Charge complète à 10A du module supercondensateur

Cette figure montre une bonne caractérisation du modèle du fait que la réponse du modèle suit bien la réponse expérimentale. Afin de tester le modèle de différentes manières, deux essais de charge complète ont été réalisés, à 50A et 100A (figures 2.47. et 2.48).

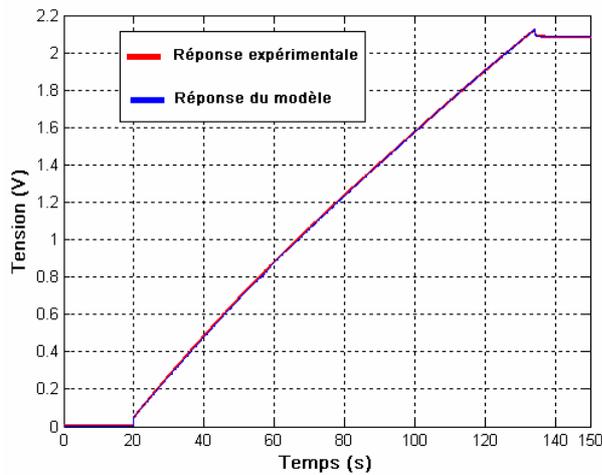


Fig. 2.47.: Charge complète à 50A du module supercondensateur

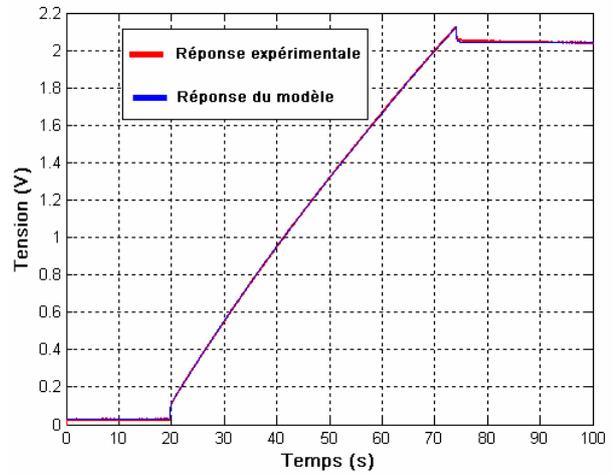


Fig. 2.48: Charge complète à 100A du module supercondensateur

### II.5.2. Limites du modèle utilisé

La seule limite de ce modèle est la représentation des phénomènes qui apparaissent à long terme. La figure 2.49. montre une divergence de la réponse du modèle par rapport à la réponse expérimentale 25 secondes après la fin de la phase de charge. Cet écart est cohérent avec l'identification utilisée, puisque le  $R_{BF}$  est mesuré pour  $f=20\text{mHz}$  ( $T=50\text{s}$ ).

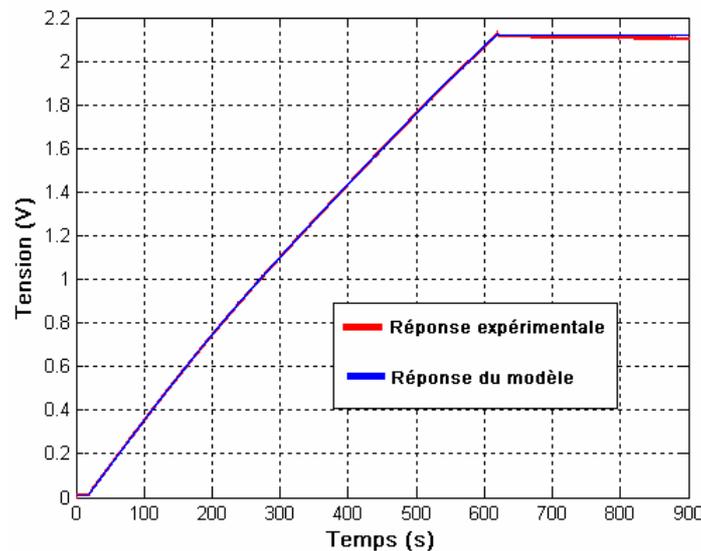


Fig. 2.49.: Charge complète à 10A du module supercondensateur

## II.6. Approche énergétique des modèles [C2-16]

Dans les parties précédentes, nous avons abordé les principaux modèles de supercondensateurs. Deux principaux types de modèles sont couramment utilisés pour simuler leur comportement:

- les modèles de type RC (ex : modèle constructeur)
- les modèles de type ligne de transmission

Dans cette partie, nous allons aborder ce problème avec une vision plus énergétique. Nous allons dans un premier temps revenir sur le modèle de type RC. Nous voulons identifier un modèle de type R-C du supercondensateur en prenant en compte le comportement énergétique du composant. Ce modèle pourrait servir d'alternative au modèle constructeur, puisqu'il doit avoir pour atout sa simplicité et la rigueur d'identification de ses paramètres.

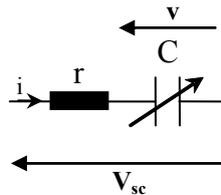


Fig. 2.50.: Modèle énergétique simplifié

La représentation proposée est celle d'un modèle R-C utilisant une capacité variable. Deux approches sont en fait possibles pour identifier ces paramètres :

**Identification issue du modèle de ligne de transmission :** l'intérêt dans ce cas est d'avoir une meilleure réponse temporelle du supercondensateur en utilisant les caractéristiques du modèle circuit de la ligne de transmission. La simplification des formules énergétiques de ce dernier permet de passer à un modèle plus simple avec moins d'éléments.

**Caractérisation énergétique :** dans ce cas, on se sert d'essais de charge/décharge et on réalise un bilan énergétique du supercondensateur avec la quantification de l'énergie stockée pour chaque tension ainsi que ses pertes énergétiques.

Afin de ne pas confondre entre les deux types d'identification, on va noter  $R_{eq}$  et  $C_{eq}$  pour une caractérisation type ligne de transmission et  $R_E$ ,  $C_E$  pour une caractérisation énergétique.

Dans un second temps, nous étudions l'influence du nombre de branches sur le comportement énergétique du modèle de la ligne de transmission défini précédemment. On propose ainsi une approche énergétique qui permet de choisir le nombre de branches du modèle en fonction de la précision voulue sur le rendement énergétique du composant. Ainsi, on ne se contente pas de valider ce modèle par sa bonne réponse temporelle, on demande aussi au modèle de bien estimer les pertes du composant et l'énergie stockée.

## II.6.1. Modèle énergétique simplifié $R_{eq}$ - $C_{eq}$ extrait de la ligne de transmission

### II.6.1.1. Caractérisation temporelle

La caractérisation dans ce cas est basée sur les équations temporelles du supercondensateur :

$$\begin{cases} V_{sc} = r i + V_C \\ i = C \frac{dV_C}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-38})$$

On note  $R_{eq}$  et  $C_{eq}$  les paramètres issus de cette approche d'identification.

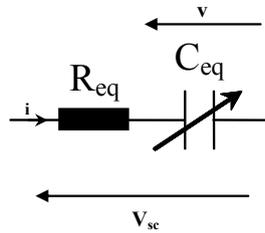


Fig. 2.51.: modèle énergétique simplifié

### II.6.1.1.1. Utilisation des caractéristiques du modèle simplifié de la ligne de transmission pour calculer les caractéristiques du modèle énergétique simplifié

Le but de cette partie est de trouver le lien entre la méthode d'identification de la ligne de transmission proposée précédemment et la caractérisation du modèle énergétique simplifié.

Le modèle circuit de la ligne de transmission est caractérisé par la résistance de transmission (R), la capacité de transmission(C), la résistance série (rs) ainsi que le nombre de branches (n) (Figure 2.33.). La figure 2.52. montre la variation du courant qui traverse chaque capacité ( $C_i$ ) pour un essai de charge avec un courant  $I=100A$ . Dans cet exemple le nombre de branches est égal à 10.

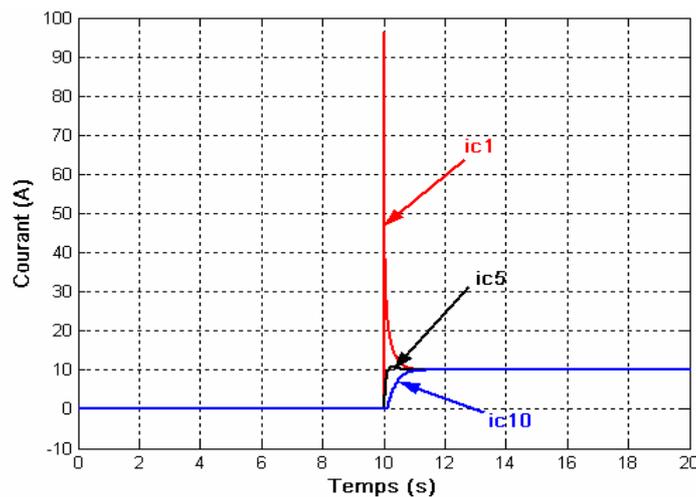


Fig. 2.52.: Variation du courant des capacités élémentaire d'un modèle amélioré de la ligne de transmission pour un essai de charge à 100A

Cette figure montre qu'après un régime transitoire de 1s, le courant qui traverse chaque branche se stabilise à une valeur  $i_{C_i} = \frac{I}{n} = \frac{100A}{10} = 10A$ . Cette remarque nous donne la

possibilité de remplacer pendant les phases statiques, les capacités des branches par une seule capacité instantanée  $C_{eq}$  qui représente l'énergie stockée par la somme des capacités  $C_i$ . Cette approche néglige naturellement les phases transitoires apparaissant lors des variations de courant.

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i = C(v) \quad (II-39)$$

En considérant que  $i_{C1} = i_{C2} = i_{C3} \dots = i_{Cn}$ , on peut trouver le courant qui traverse chaque résistance de transmission  $R_i$ .

$$\begin{aligned} i_{R1} &= I \\ i_{R2} &= I - i_{Ci} \\ i_{R3} &= I - 2 \cdot i_{Ci} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ i_{Rn} &= i_{Ci} \end{aligned} \quad (II-40)$$

Sachant que  $i_{Ci} = \frac{I}{n}$ , les formules (II-40) peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} i_{R1} &= I \\ i_{R2} &= I \left(1 - \frac{1}{n}\right) \\ i_{R3} &= I \left(1 - \frac{2}{n}\right) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ i_{Rn} &= \frac{I}{n} \end{aligned} \quad (II-41)$$

Afin de remplacer les résistances de la ligne de transmission par une seule résistance équivalente  $R_{eq}$ , il faut que cette résistance équivalente représente les pertes Joule de toutes les résistances de transmission  $R_i$  et de la résistance série  $r_s$  pendant la phase statique.

$$P_j = R_{eq} I^2 = r_s \cdot I^2 + \sum_{i=1}^n R_i \cdot i_{Ri}^2 \quad \text{Avec : } R_i = \frac{R}{n} \quad (II-42)$$

En utilisant les formules (II-41)-(II-42), la somme des pertes pour toutes les résistances  $R_i$  peut être écrite sous la forme suivante :

$$P_j = r_s \cdot I^2 + \sum_{i=1}^n R_i \cdot i_{Ri}^2 = \left[ r_s + \frac{R}{n} \left[ 1^2 + \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 + \left(1 - \frac{2}{n}\right)^2 + \left(1 - \frac{3}{n}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{n}\right)^2 \right] \right] \cdot I^2 \quad (\text{II-43})$$

$$P_j = R_{eq} \cdot I^2$$

De cette formule on peut extraire l'expression de la résistance équivalente  $R_{eq}$  :

$$\begin{aligned} R_{eq} &= r_s + \frac{R}{n} \left[ 1^2 + \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 + \left(1 - \frac{2}{n}\right)^2 + \left(1 - \frac{3}{n}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{n}\right)^2 \right] = \\ &= r_s + \frac{R}{n^3} \left[ n^2 + (n-1)^2 + (n-2)^2 + (n-3)^2 + \dots + 1^2 \right] \end{aligned} \quad (\text{II-44})$$

$$R_{eq} = r_s + \frac{R}{n^3} \sum_{i=1}^{i=n} i^2 = r_s + \frac{R(2n+1)(n+1)}{6.n^2} = r_s + R_{trans}(n) \quad (\text{II-45})$$

$R_{trans}(n)$ : Représente les pertes équivalentes dues aux résistances de transmission.

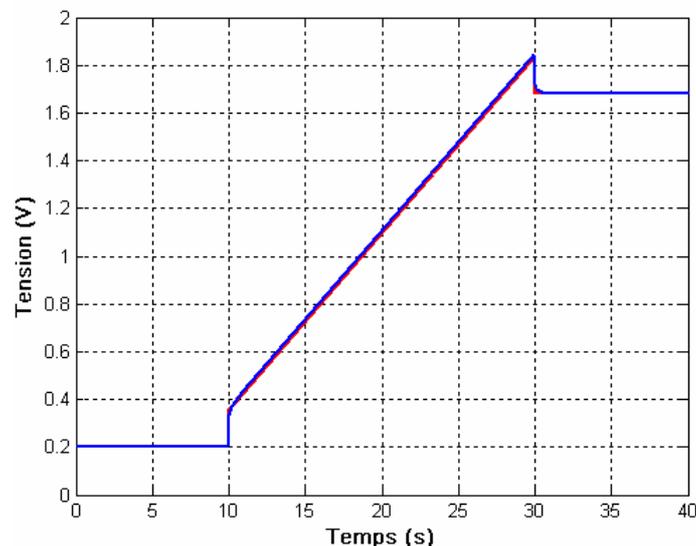
Afin d'avoir une réponse qui tende vers celle d'un modèle de ligne de transmission, on doit calculer la résistance équivalente quand  $n$  tend vers l'infini :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_{eq} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[ r_s + \frac{R}{n^3} \sum_{i=1}^{i=n} i^2 = \frac{R(2n+1)(n+1)}{6.n^2} \right] = r_s + \frac{R}{3} \quad (\text{II-46})$$

Cette valeur représente la résistance basse fréquence du modèle fréquentiel  $R_{BF} = r_s + \frac{R}{3}$ .

On en déduit logiquement que le modèle  $R_{eq}$ - $C_{eq}$  peut être assimilé au point de fonctionnement basse fréquence du modèle fréquentiel.

La figure 2.53. montre une comparaison entre la réponse temporelle d'un modèle énergétique simplifié et celle du modèle simplifié de la ligne de transmission. Le modèle énergétique est caractérisé par une résistance équivalente  $R_{eq} = \frac{R}{3} + r_s$  et une capacité équivalente  $C_{eq} = C(v)$ .



**Fig. 2.53.: Comparaison de la réponse d'un modèle  $R_{eq} C_{eq}$  avec celle du modèle simplifié de la ligne de transmission (n=10)**

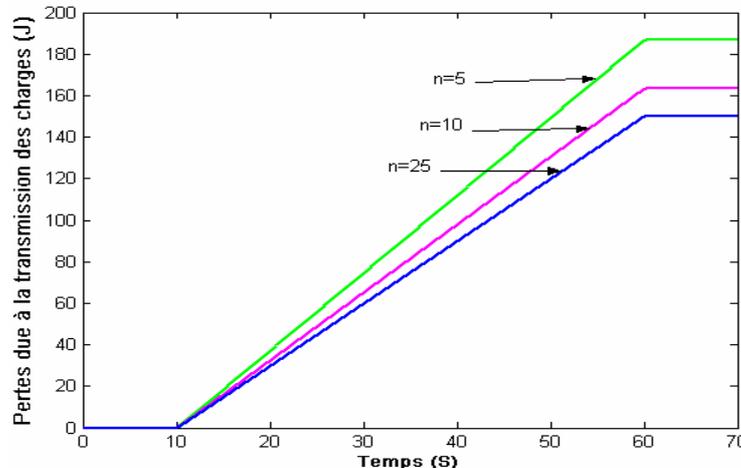
Cette figure montre que la réponse temporelle du modèle énergétique suit bien la réponse du modèle simplifié d'une ligne de transmission. Le modèle représente bien le comportement temporel et énergétique du supercondensateur, hors phase transitoire.

La partie suivante va montrer tout l'intérêt de ce modèle lorsqu'on souhaite utiliser un modèle circuit comprenant peu d'éléments. En effet, le modèle circuit de la ligne de transmission n'est réellement fiable que pour un nombre de branches (n) suffisant. Dans le cas contraire, des erreurs importantes peuvent apparaître.

### II.6.1.1.2. Influence du nombre de branches sur le comportement énergétique

Le passage du modèle analytique de la ligne de transmission vers un modèle simplifié est basé sur la considération que le nombre de branches de ce dernier tend vers l'infini. Par contre la simulation de ce modèle nous oblige à imposer un nombre fini de branches. Dans cette partie on étudie les écarts apparaissant sur les pertes en fonction du nombre de branches afin d'en déduire une loi analytique.

Afin de valider l'expression simplifiée de la résistance de transmission  $R_{trans}(n)$  (Formule (II-45)), on simule l'évolution des pertes dues à cette résistance avec le modèle de la ligne de transmission pour trois valeurs du nombre de branches (n).



**Fig. 2.54.: Variation des pertes dues à la transmission des charges pour un essai de charge à 100A et une durée  $T_c=50s$ ,  $R=0,85 m\Omega$**

La principale remarque que l'on peut extraire de cette simulation est qu'après 50 secondes de charge il y a un écart de 25% sur les pertes entre les modèles 5 et 25 branches. Cette figure montre aussi que la variation des pertes dues à la ligne de transmission est linéaire, ce qui prouve que la puissance instantanée ( $P_{trans}(t)$ ) est constante. Si on considère que le courant de charge est constant ( $I=Cst$ ), la résistance qui représente la transmission des charges peut s'exprimer de la façon suivante :

$$R_{trans}(n) = E_{trans}(n) / (Tc * I^2) \quad (II-47)$$

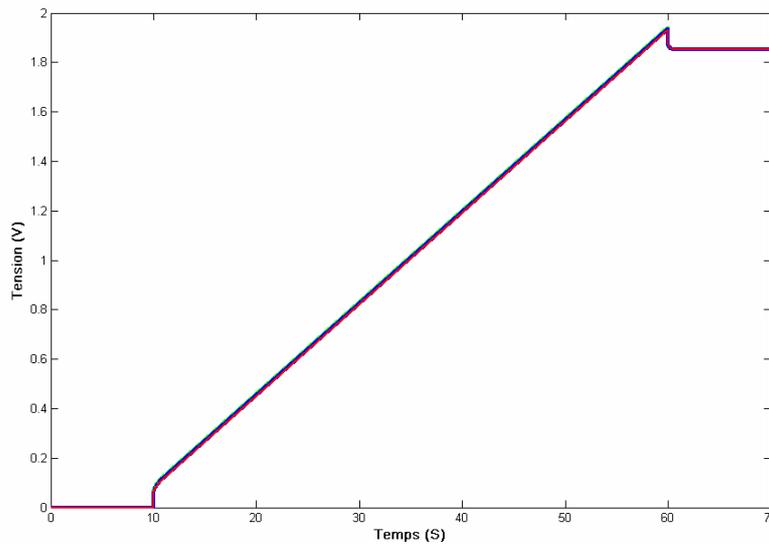
Avec :  $Tc$  : La durée de la charge.

$E_{trans}$  : Les pertes dues à la transmission des charges.

A l'opposé, le nombre de branches affecte peu la réponse temporelle (Figure 2.55.).

Ces deux aspects prouvent qu'un modèle de supercondensateurs doit être validé tant sur le plan temporel que sur le plan énergétique pour être fiable et crédible.

On va ainsi montrer l'influence du nombre de branches sur le calcul du rendement d'un supercondensateur et déterminer le nombre de branches nécessaires au modèle.



**Fig. 2.55.: Réponse du modèle amélioré du supercondensateur pour différentes valeurs du nombre de branches (n=5, 10, 25)**

La figure 2.56. présente une comparaison de la résistance qui représente la transmission calculée avec la formule (II-45) avec celle obtenue avec la simulation de notre modèle amélioré (formule (II-47)), pour une variation du nombre de branches.

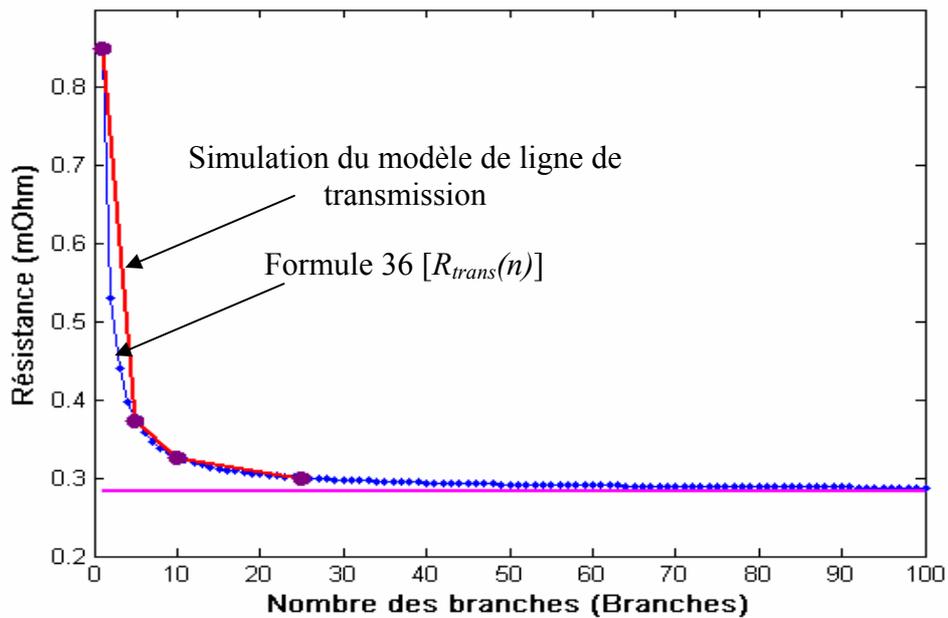


Fig. 2.56.: Variation de la résistance de transmission en fonction du nombre de branches

Cette figure montre que la formule (II-45) représente bien les pertes dues à la résistance de transmission et que cette résistance tend vers  $R/3$  quand le nombre de branches tend vers l'infini. Ces résultats permettent de représenter l'erreur commise sur les pertes du modèle discrétisé de la ligne de transmission par rapport aux pertes pour un nombre infini de branches (Figure 2.57.). En effet, la résistance équivalente de la ligne de transmission varie entre  $R$  ( $n=1$ ) et  $R/3$  ( $n \rightarrow \infty$ ) ce qui induit naturellement de gros écarts sur les pertes en régime établi.

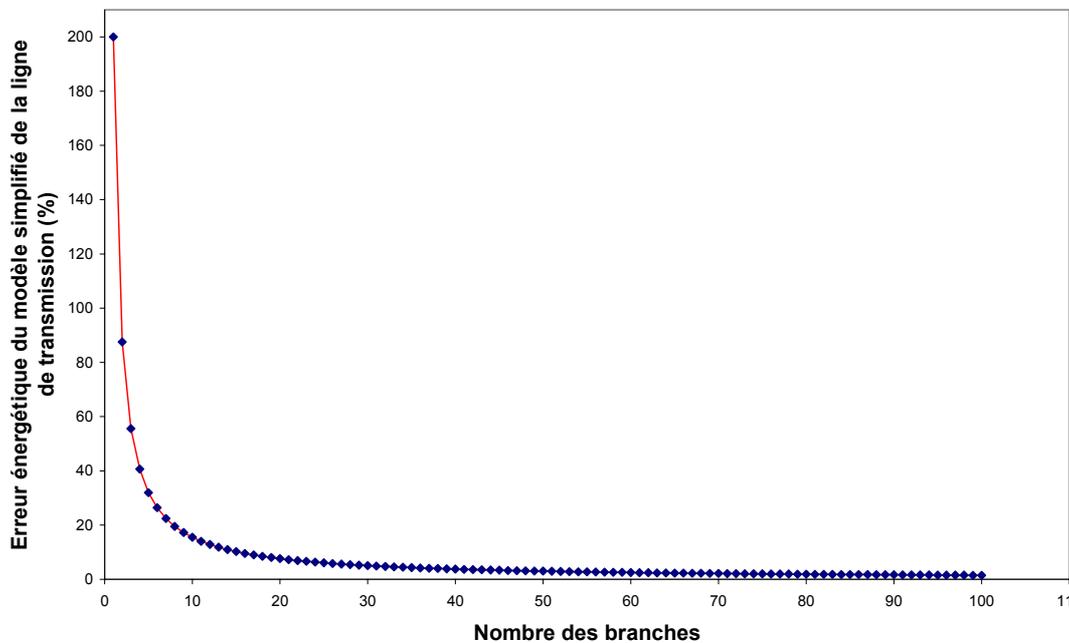


Fig. 2.57.: Erreur sur la résistance de transmission en fonction du nombre des branches

Les résultats présentés dans la figure 2.57. montrent que l'erreur commise sur les pertes peut atteindre 200% pour  $n=1$ , tend vers zéro pour un nombre infini de branches. En utilisant

la formule (II-45), on peut trouver une formule de l'erreur de transmission en fonction du nombre de branches :

$$\varepsilon_{trans} = \frac{R_{trans}(n) - R_{trans}(\infty)}{R_{trans}(\infty)} = \frac{(2n+1)(n+1)}{2.n^2} - 1 \quad (II-48)$$

Pour trouver l'influence du nombre de branches sur le calcul du rendement, on considère que le supercondensateur consomme une énergie  $E_c$ , et que les pertes dues à la résistance de transmission des charges valent  $E_{trans}$  :

$$E_t = E_{rs} + E_{trans} \quad (II-49)$$

Avec :

$E_t$  : pertes totales

$E_{rs}$  : pertes dues à la résistance série.

$E_{trans}$  : pertes dues à la résistance de transmission

Afin de trouver une relation entre les pertes totales et les pertes de transmission, on va utiliser une formule en puissance équivalente à la formule (II-49).

$$P_t = P_{rs} + P_{trans} = rs I^2 + \frac{R}{3} I^2 \quad (II-50)$$

En divisant et multipliant cette expression par les pertes de transmission on trouve :

$$P_t = \frac{3rs + R}{R} P_{trans} = K P_{trans} \Rightarrow E_t = K E_{trans} \quad (II-51)$$

$$D'où E_{rs} = (K - 1) E_{trans} \quad (II-52)$$

Avec :  $K$  : rapport entre la puissance (énergie) perdue totale et la puissance (énergie) perdue dans la résistance de transmission.

Le rendement du supercondensateur peut être donné par la formule suivante :

$$\eta = \frac{E_c - E_{rs} - E_{trans}}{E_c} \quad (II-53)$$

Avec l'utilisation de la formule (II-51), le rendement peut s'écrire comme le suivant :

$$\eta = \frac{E_c - K E_{trans}}{E_c} \quad (II-54)$$

Ce qui donne l'expression des pertes de transmission :

$$E_{trans} = \frac{E_c (1 - \eta)}{K} \quad (II-55)$$

Afin de déterminer l'influence d'une erreur de calcul des pertes de transmission sur la valeur du rendement, on va considérer une erreur de  $\varepsilon_{trans}$  sur les pertes de transmission. Cette erreur dépend du nombre de branches.

Les pertes de transmission  $E_{trans}(n)$  obtenues avec un modèle à  $n$  branches peuvent s'écrire en fonction de cette erreur :

$$E_{trans}(n) = \frac{E_c(1-\eta)(1+\varepsilon_{trans})}{K} = \frac{E_c(1-\eta)(2n+1)(n+1)}{2Kn^2} \quad (II-56)$$

En remplaçant cette nouvelle valeur des pertes de transmission dans l'équation (II-56), la nouvelle valeur du rendement peut être écrite sous la forme suivante :

$$\eta'(n) = \frac{E_c - \frac{E_c(K-1)(1-\eta)}{K} - \frac{E_c(1-\eta)(2n+1)(n+1)}{2Kn^2}}{E_c}$$

$$\eta'(n) = 1 + \frac{(\eta-1)}{K} \left[ (K-1) + \frac{(2n+1)(n+1)}{2n^2} \right] \quad (II-57)$$

Cette formule nous donne une relation directe entre le rendement avec une erreur sur la valeur des pertes de transmission en fonction de la valeur initiale du rendement sans erreur et le nombre de branches pour un rapport  $K$  ( $\eta' = f(\eta, n, K)$ ). Dans notre cas le rapport  $K$  varie entre 2 et 4. La figure 2.58. présente l'évolution du rendement en fonction du nombre de branches pour différentes valeurs de rendement réel et pour  $K = 2$ .

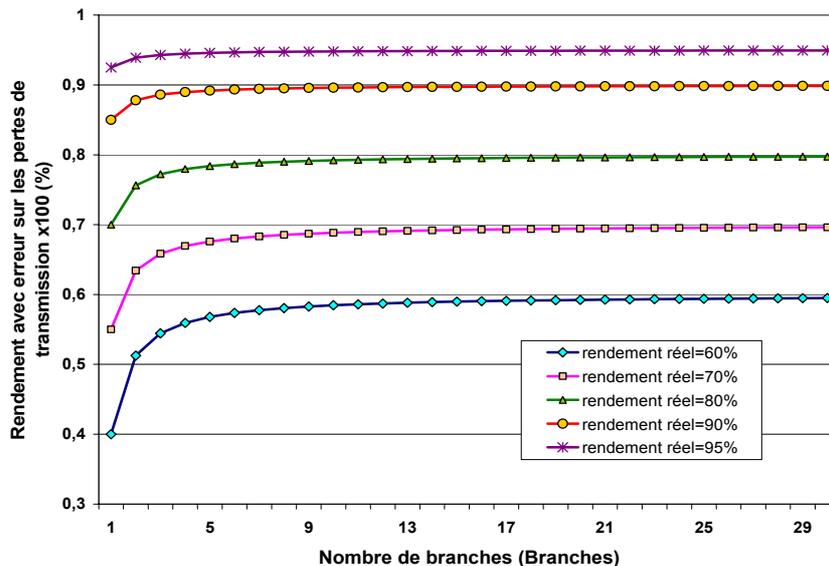


Fig. 2.58.: Erreur sur le rendement en fonction du nombre de branches

Le rendement avec erreur sur les pertes de transmission se rapproche bien de la valeur réelle du rendement quand on augmente le nombre de branches. L'erreur sur la valeur de rendement peut atteindre les 45% pour un rendement réel de 60% et avec une seule branche. L'influence de la variation du nombre de branches est moins importante pour des rendements réels élevés.

Durant toute notre étude on a choisi une ligne de transmission avec 10 branches. La figure 2.59. montre la variation de l'erreur sur le rendement en fonction du rendement réel

pour une ligne de transmission avec 10 branches et pour les deux valeurs extrêmes de  $K$  ( $K = 2$  et  $K = 4$ ).

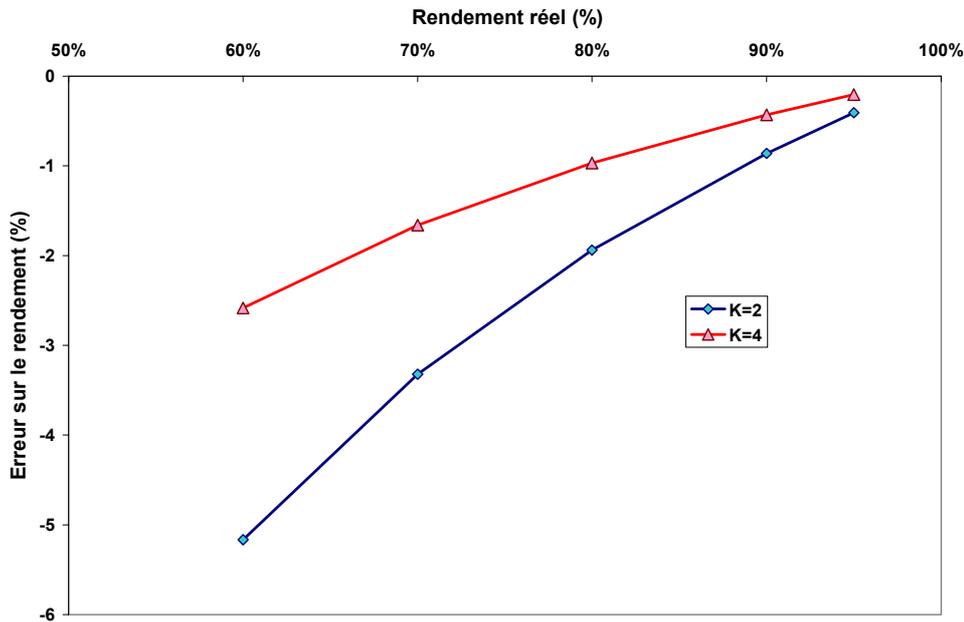


Fig. 2.59. : Erreur sur le rendement en fonction du rendement réel pour une ligne de transmission avec 10 branches

Cette partie a mis en évidence le compromis à faire selon la complexité de modèle utilisé et la précision voulue. Un modèle à base de ligne de transmission doit comporter au moins une dizaine de branches pour être fiable. La volonté d'utilisation d'un modèle circuit à faible nombre d'éléments (RC) doit nécessairement être faite avec une approche de type énergétique au niveau de l'identification des paramètres.

### II.6.1.2. Caractérisation énergétique [C2-17]

La caractérisation énergétique est basée sur l'utilisation du bilan énergétique du supercondensateur sur un cycle charge/décharge avec notre banc de test [C2-9]:

$$E_{stockée} = E_{consommée} - E_{Pertes} \quad (II-58)$$

Cette vision permet de connaître d'un côté la capacité de stockage en énergie et les pertes du système. La séparation de ces deux énergies (stockée et perdue) facilite la modélisation du supercondensateur sous forme d'un circuit électrique. Les pertes sont représentées par une résistance ( $R_E$ ) et l'énergie stockée sera identifiée par une capacité énergétique de stockage ( $C_E$ ).

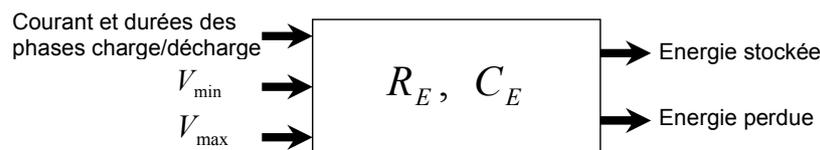


Fig. 2.60.: caractéristiques énergétiques du modèle énergétique simplifié

### II.6.1.2.1. Résistance énergétique

La résistance énergétique représente les pertes durant un cycle charge/décharge à courant constant. L'utilisation de ce type de cycle nous donne la possibilité d'avoir le même état énergétique à la fin du cycle que celui qui a existé avant le cycle. La différence entre l'énergie stockée (phase de charge) et celle restituée (phase de décharge) représente l'énergie perdue. Cette dernière est calculée en intégrant la puissance à l'entrée du supercondensateur durant tout le cycle.

$$Pertes = \int_{Cycle} V_{sc} i dt = \int_{Cycle} R_E i^2 dt \quad (II-59)$$

En utilisant l'égalité précédente, on peut déduire la valeur de la résistance énergétique :

$$R_E = \frac{\int_{Cycle} V_{sc} i dt}{\int_{Cycle} i^2 dt} \quad (II-60)$$

### II.6.1.2.2. Capacité énergétique

On définit la capacité énergétique  $C_E$  par la relation :

$$E_{Stockée}(t) = C_E \frac{v^2}{2} \quad (II-61)$$

$C_E$  est un paramètre qui doit permettre de déterminer aisément l'énergie stockée, sachant que cette relation n'est pas applicable à la capacité instantanée puisqu'elle dépend de  $v$ .

La valeur de la capacité énergétique peut être calculée en utilisant un essai de charge complète à faible courant. La réponse temporelle doit commencer à tension nulle, car cette capacité donne l'image de l'énergie stockée par rapport à l'état vide du supercondensateur.

L'utilisation de la formule (II-61) permet de calculer la valeur de la capacité énergétique :

$$C_E(v) = \frac{2 E_{Stockée}(v)}{v^2} \quad \text{avec } v = (V_{sc} - R_E i^2) \quad (II-62)$$

L'énergie stockée est calculée en faisant le bilan énergétique pour chaque tension  $v$ .

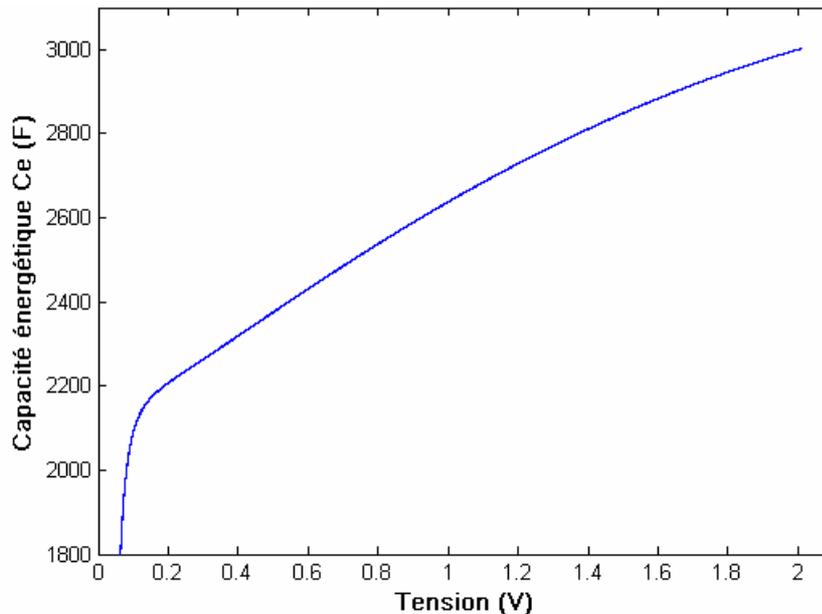
$$E_{stockée}(v) = E_{consommée}(v) - E_{Pertes}(v) \quad (II-63)$$

Avec :

$$E_{\text{Consommée}}(v) = \int_0^V i v dv \quad (\text{II-64})$$

$$E_{\text{pertes}}(v) = \int_0^V R_E i^2 dv \quad (\text{II-65})$$

La figure 2.61. montre l'évolution de la capacité énergétique en fonction de la tension. Cette capacité est calculée en utilisant un essai de charge complète avec un courant charge/décharge de 10A (figure 2.7.).



**Fig. 2.61.: Evolution de la capacité énergétique en fonction de la tension**

Cette figure montre une augmentation de la capacité énergétique en fonction de la tension. On remarque une variation brusque de la capacité pour les faibles tensions ( $v < 0,2V$ ) qui est due à la phase de propagation des charges.

### **II.6.1.3. Relation entre les deux modèles énergétiques proposés**

Les deux modèles présentés proposent la même approche énergétique mais diffèrent par leur identification de paramètres. Il existe naturellement un lien entre ces deux modèles.

#### **II.6.1.3.1. Relation entre la résistance équivalente $R_{eq}$ et la résistance énergétique $R_E$**

Le calcul de résistance équivalente dans le cas d'une caractérisation temporelle est fait en considérant que la résistance qui représente les pertes est constante et en utilisant la formule de la puissance perdue  $Pj = R_{eq} I^2$ . C'est le même principe que l'on retrouve avec le calcul de la résistance énergétique, mais cette fois avec une formule énergétique  $Pertes = \int_{\text{Cycle}} R_E i^2 dt$ .

Comme le cyclage est fait avec un courant constant, les deux formules donnent la même valeur de la résistance  $R_{eq} = R_E$ .

### II.6.1.3.2. Relation entre la capacité instantanée ( $C_{eq}$ ) et la capacité énergétique ( $C_E$ )

La figure 2.37 présentée dans la partie II.4.2.2. de la thèse nous montre la non-linéarité de la capacité instantanée pour le module étudié. Cette caractéristique peut être représentée par un polynôme de deuxième degré (figure 2.62.) :

$$C_{eq} = -250,5V_{sc}^2 + 1115V_{sc} + 2010 \quad (II-66)$$

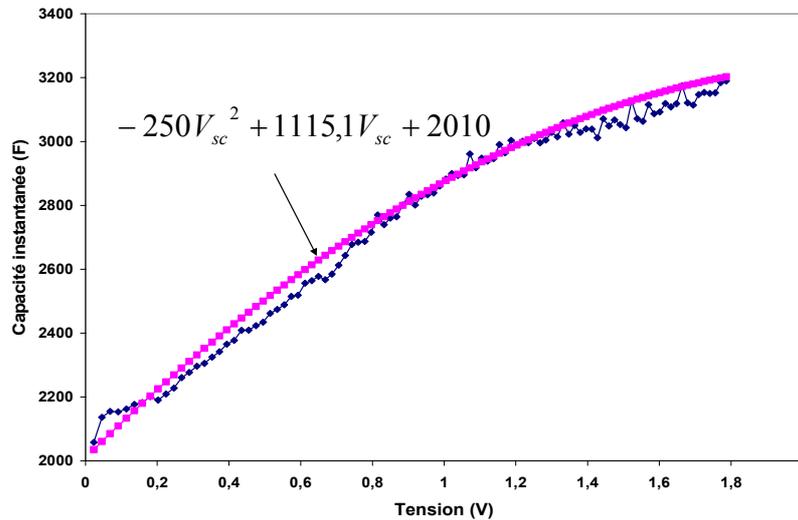


Fig. 2.62. : Variation de la capacité d'un supercondensateur en fonction de la tension

Le calcul de cette capacité est basé sur l'expression suivante:

$$i(t) = C_{eq} \frac{dV_{sc}}{dt} \quad (II-67)$$

Pour une petite variation de la tension et avec un courant constant, la capacité instantanée peut être présentée sous la forme suivante :

$$C_{eq} = I \Delta t / \Delta V_{sc} \quad (II-68)$$

De l'autre coté, on a la capacité énergétique qui définit, pour chaque tension, la relation entre l'énergie stockée et le carré de la tension :

$$E(t) = C_E \frac{V_{sc}^2}{2} \quad (II-69)$$

La valeur de la capacité énergétique peut être calculée en utilisant la formule de la capacité instantanée (Formule (II-67)). En multipliant cette dernière par  $V_{sc}$  et en intégrant les deux termes de l'égalité, on obtient :

$$E = \int i V_{sc} dt = \frac{2 \int C_i V_{sc} dV_{sc}}{V_{sc}^2} \frac{V_{sc}^2}{2} \quad (II-70)$$

La comparaison de cette expression avec la formule (II-67) nous donne l'expression de la capacité énergétique:

$$C_E = \frac{2 \int C_i V_{sc} dV_{sc}}{V_{sc}^2} \quad (II-71)$$

$$\text{Donc : } C_E = \frac{-250,5}{2} V_{sc}^2 + \frac{2 \times 1115,1}{3} V_{sc} + 2010 \quad (II-72)$$

La figure 2.63. montre une comparaison entre la capacité énergétique calculée avec la formule (II-72) et celle basée sur les relevés expérimentaux (Formule (II-62)). La courbe trouvée avec la formule (II-72) suit bien la courbe expérimentale sauf dans le régime transitoire où on constate un écart qui est dû au régime transitoire.

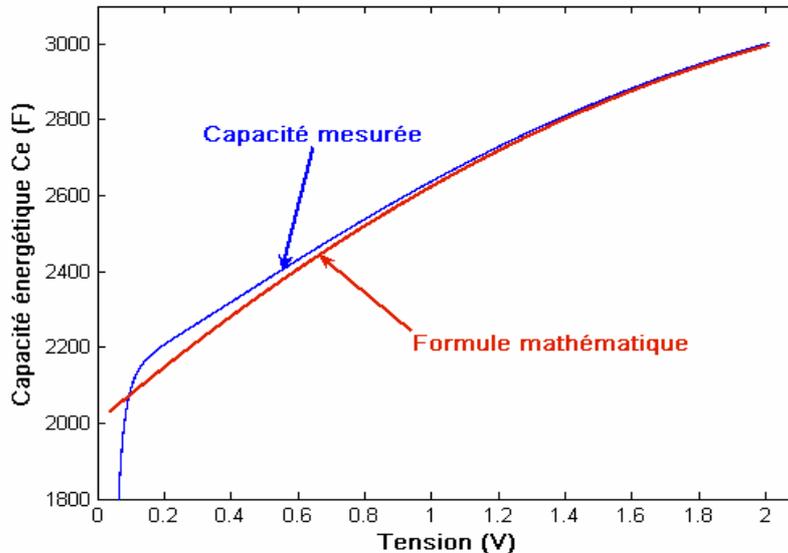


Fig. 2.63.: Comparaison des résultats des deux méthodes pour le calcul de la capacité de stockage

## II.6.2. Bilan sur les différents types de capacités appliqués aux supercondensateurs

La figure 2.64. présente une comparaison entre les deux capacités (capacité instantanée et la capacité énergétique) du module étudié en fonction de la tension. On constate une différence notable entre les valeurs de la capacité instantanée et celle de la capacité énergétique, deux paramètres liés au stockage fréquemment utilisés par les utilisateurs de supercondensateurs. On remarque aussi que la capacité instantanée est plus importante que la capacité énergétique. Cette comparaison montre bien que la capacité instantanée ne peut être utilisée pour déterminer l'énergie stockée en utilisant l'expression usuelle de l'énergie ( $CV^2/2$ ). L'utilisation de cette capacité provoque une surestimation de l'énergie stockée. Par contre, l'utilisation de  $C_E$  pour une utilisation temporelle conduit à une erreur sur la forme d'onde temporelle du circuit.

En effet, quand on représente la capacité instantanée comme un polynôme du second degré :

$$C_{eq} = a.V_{sc}^2 + b.V_{sc} + c \quad (II-73)$$

Le lien apparaissant entre les différentes approches est le suivant :

$$C_E = \frac{a}{2} \cdot V_{sc}^2 + \frac{2 \cdot b}{3} \cdot V_{sc} + c \quad (\text{II-74})$$

Les coefficients affectés à  $V_{sc}$  et  $V_{sc}^2$  se distinguent selon la définition utilisée. Dans notre cas, la capacité instantanée est plus importante que les autres.

Lorsqu'on observe par exemple la détermination de  $C$  dans le modèle constructeur Maxwell, sa valeur est obtenue via une méthode de type  $C_{eq}$ , ce qui tend alors à surestimer l'énergie stockée.

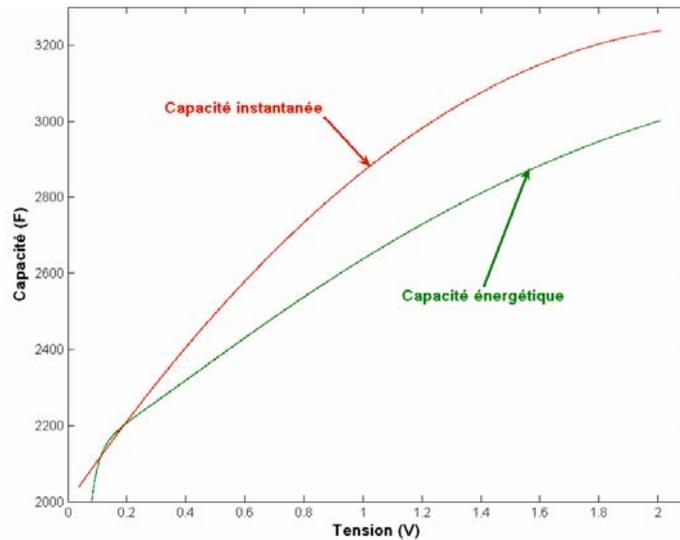


Fig. 2.64.: Comparaison des deux capacités qui caractérisent le supercondensateur

La figure 2.65. montre l'erreur commise sur l'énergie stockée lorsqu'on utilise la capacité instantanée  $C_{eq}$  à la place de  $C_E$  dans la formule (II-69). Cette figure montre que l'erreur peut atteindre environ 10%.

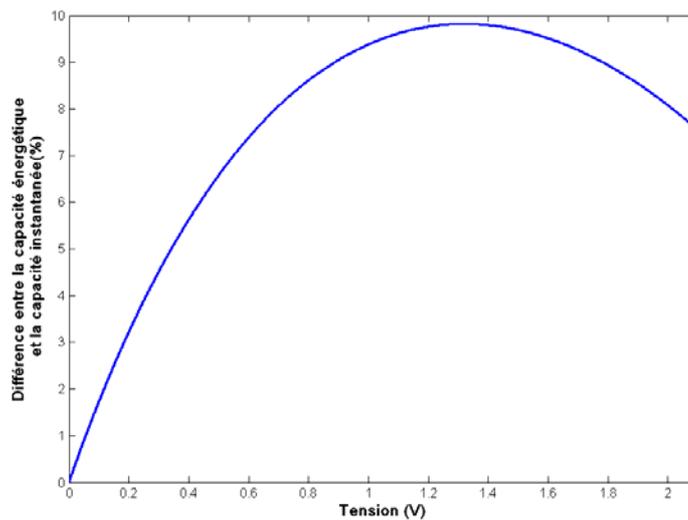


Fig. 2.65.: Différence entre la capacité instantanée et la capacité énergétique

Cette étude nous a montré la différence entre les deux types de capacité qui caractérisent le supercondensateur :

**Capacité instantanée :** utilisée pour simuler la réponse temporelle du supercondensateur. Le calcul de cette capacité est basé sur la formule (II-67).

**Capacité énergétique :** utilisée pour calculer l'énergie stockée à une tension connue du supercondensateur. Le calcul de cette capacité est basé sur la formule (II-69).

### II.6.3. Validation du modèle énergétique simplifié pour des essais à puissance constante (Diagramme de Ragone)

#### II.6.3.1. Essai avec des puissances constantes

Le diagramme de Ragone permet de définir les domaines d'utilisation de chaque composant de stockage dans le plan énergie-puissance. Afin de tracer le diagramme de Ragone pour un composant de stockage, on considère que ce dernier est connecté à une charge consommant une puissance constante [C2-17]. Il faut alors contrôler le courant de décharge suivant l'évolution de la tension du module. Le courant injecté est  $\left(-\frac{P}{V_{SC}}\right)$ , avec  $V_{SC}$  tension du module supercondensateur. La figure 2.66. présente l'évolution du courant et de la tension du module testé pour un essai à puissance constante  $P=3kW$ . La tension initiale du module est de 48V.

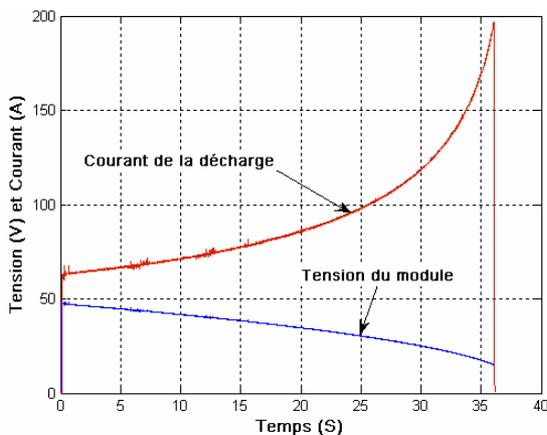


Fig. 2.66.: Essai à puissance constante  $P=3kW$

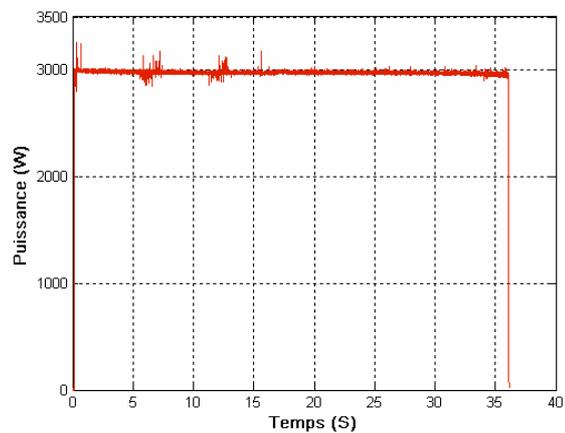


Fig. 2.67: Evolution de la puissance pour un essai à puissance constante  $P=3kW$

La puissance demandée ne doit pas dépasser la puissance maximale admissible par le module  $P_{max} = I_{max} \cdot V_{SC\_max} = 19,2kW$  avec :  $I_{max} = 400A$ ,  $V_{sc\_max} = 48V$ .

Il y a deux conditions d'arrêt pour l'essai à puissance constante :

- ✓ La tension ne passe pas au dessous d'une valeur minimale ( $V_{min}$ ). Cette limite représente la tension à partir de laquelle l'énergie restante est négligeable. Dans notre cas on a choisi :  $V_{min} = 15V$ .
- ✓ Le courant de décharge ne dépasse pas le courant maximal admissible par le module  $I_{max} = 400A$

Dans ces essais, c'est la condition sur la tension minimale qui doit fixer l'arrêt de la décharge. La puissance est maintenue constante avec une petite diminution de la puissance à la fin de l'essai. Cet écart est lié au contrôle du convertisseur. La durée maximale d'une décharge à 3kW mesurée dans cet essai est de 36 secondes, soit 108kJ d'énergie fournie par le module.

Pour connaître la durée de décharge à différents niveaux de puissance, on a effectué des essais à puissance constante entre 500W et 6kW. La figure 2.68. montre l'évolution de la durée de chaque essai en fonction de la puissance imposée.

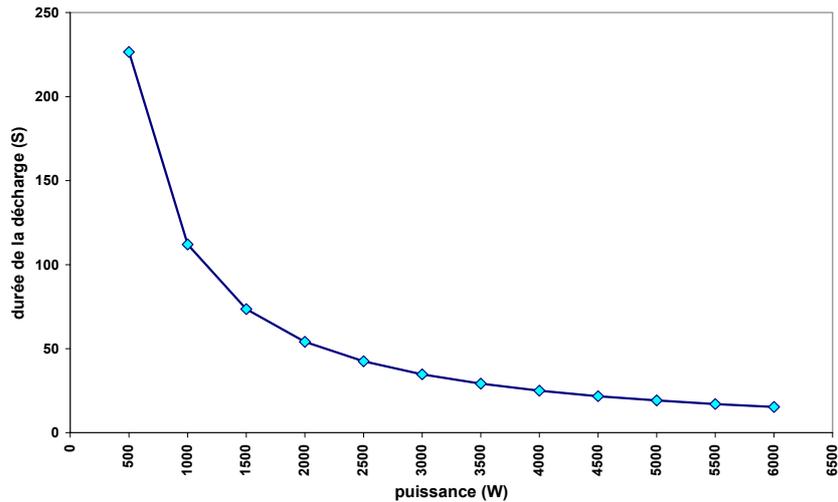


Fig. 2.68.: Evolution de la durée de décharge en fonction de la puissance demandée

La figure 2.68. montre que la durée de décharge varie entre 227 secondes pour une puissance de 500W, jusqu'à 15,3 secondes pour 6kW. La multiplication de la durée de chaque essai par la puissance demandée permet de déterminer l'énergie fournie par le module. La figure 2.69. présente la variation de l'énergie fournie par le module en fonction de la puissance demandée (diagramme de Ragone).

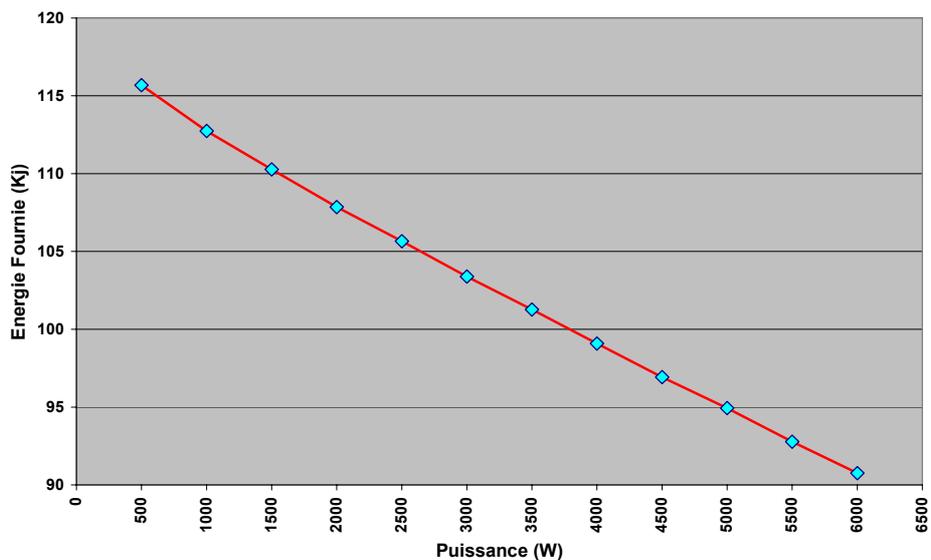


Fig. 2.69.: Evolution de l'énergie fournie en fonction de la puissance demandée

La figure 2.69. montre une diminution de l'énergie fournie par le module d'environ 25% avec l'augmentation de la puissance imposée. La puissance maximale testée est de 6kW car au-delà on atteint la saturation en courant au cours de la décharge.

### II.6.3.1.1. Utilisation du modèle énergétique simplifié pour tracer le diagramme de Ragone

Dans cette partie le modèle énergétique simplifié (paragraphe II.6.1.) est utilisé et comparé aux mesures. On note la puissance  $P = V_{SC} \cdot i$ , avec  $V_{SC}$  tension aux bornes du module,  $i$  le courant qui traverse ce dernier.

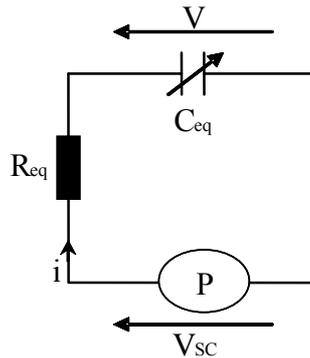


Fig. 2.70.: Modèle utilisé pour le tracé du diagramme de Ragone

A l'instant  $t=0$ , l'énergie stockée dans le module est  $E_0$ . Cette énergie correspond à la tension maximale du module (48V). On note  $t_\infty$  le temps au bout duquel le module ne peut plus fournir la puissance demandée. Si la puissance demandée est constante, alors :

$$i = \frac{P}{V_{SC}} \quad (\text{II-75})$$

$$E(P) = P \cdot t_\infty \quad (\text{II-76})$$

La courbe  $E(P)$  est appelée diagramme de Ragone.

En appliquant le théorème des mailles sur le circuit de la figure 2.70., on trouve l'équation suivante :

$$V = R_{eq} i + V_{SC} \quad (\text{II-77})$$

L'utilisation de la formule II-75 permet d'écrire cette équation sous la forme suivante :

$$V = R_{eq} \frac{P}{V_{SC}} + V_{SC} \quad (\text{II-78})$$

En utilisant l'équation (II-38) donnée dans la partie (II.6.1.1.) de la thèse, on peut mettre la formule II-78 sous la forme suivante :

$$i = \frac{P}{V_{SC}} = C_{eq} \left[ 1 - \frac{R_{eq} P}{V_{SC}^2} \right] \frac{dV_{SC}}{dt} \quad (\text{II-79})$$

D'où

$$dt = \frac{C_{eq}}{2p} \left[ 1 - \frac{R_{eq} P}{V_{SC}^2} \right] d(V_{SC}^2) \quad (II-80)$$

En utilisant la formule (81) qui donne l'expression de la capacité instantanée en fonction de la tension  $v$ , ainsi que la formule II-78, la capacité peut s'exprimer en fonction de  $V_{SC}$  comme suit :

$$C_i = A.V_{SC}^2 + B.V_{SC} + \frac{A.R_{eq}^2.P^2}{V_{SC}^2} + \frac{B.R_{eq}.P}{V_{SC}} + 2.A.R_{eq}.P + C \quad (II-81)$$

En remplaçant  $C_i$  par sa formule dans l'équation différentielle II-80, cette équation peut s'écrire comme suit :

$$dt = \frac{1}{p} \left[ A.V_{SC}^3 + B.V_{SC}^2 + (2.A.R_{eq}.P + C)V_{SC} + \frac{A.R_{eq}^2.P^2}{V_{SC}} + B.R_{eq}.P \right] dV_{SC} - \frac{R_{eq} P}{V_{SC}^2} d(V_{SC}^2) \quad (II-82)$$

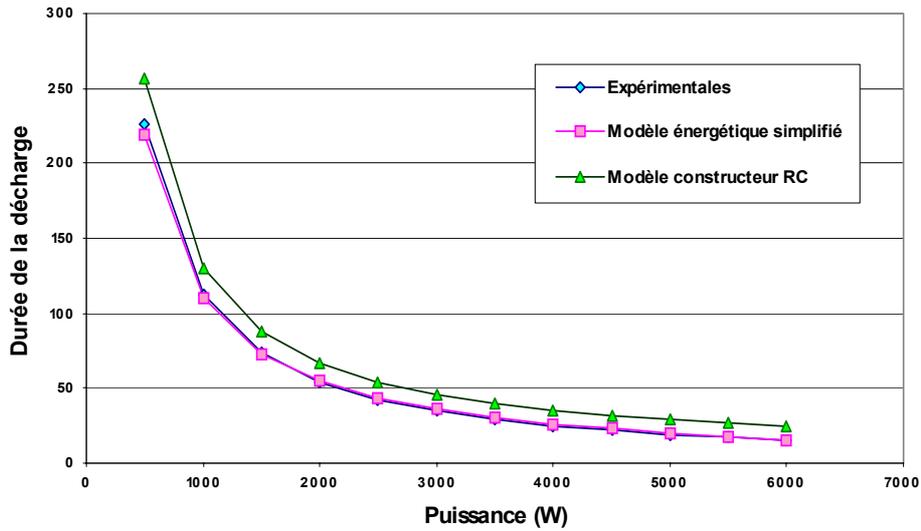
En intégrant les deux côtés entre  $V_0$  et  $V_{SC}$  :

$$\left\{ \begin{aligned} t(V_{SC}) &= \frac{1}{p} \left[ \frac{A}{4} (V_{SC}^4 - V_0^4) + \frac{B}{3} (V_{SC}^3 - V_0^3) + \frac{(2.A.R_{eq}.P + C)}{2} (V_{SC}^2 - V_0^2) \right] + K \\ K &= \frac{1}{p} B.R_{eq}.P (V_{SC} - V_0) + A.R_{eq}^2.P^2 \ln \left( \frac{V_{SC}}{V_0} \right) + \frac{R_{eq} P}{V_{SC}^2} \ln \left( \frac{V_0^2}{V_{SC}^2} \right) \end{aligned} \right. \quad (II-83)$$

La figure 2.71. présente l'évolution de la durée de décharge en fonction de la puissance pour  $V_{SC} = 15V$  dans les essais et avec les deux modèles :

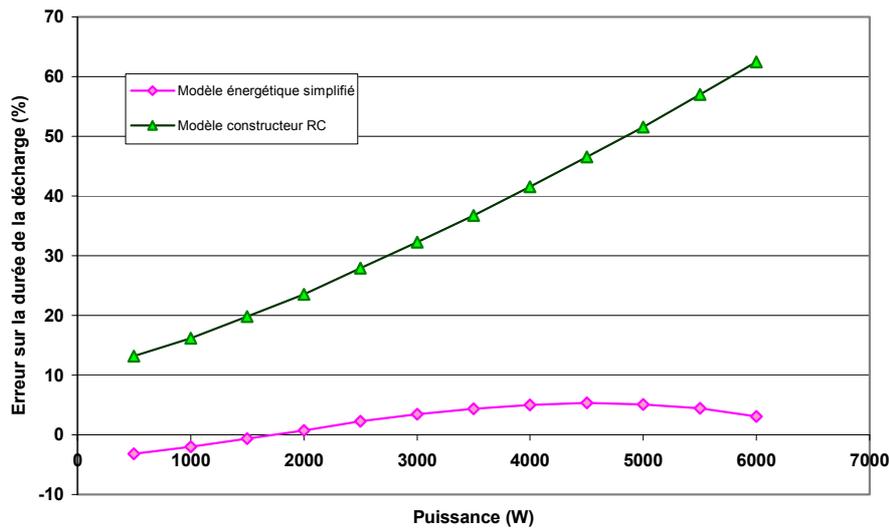
- ✓ **Modèle énergétique simplifié** : avec ce modèle on utilise, pour les coefficients qui représentent la variation de la capacité en fonction de la tension  $v$ , les valeurs tirées de la formule II-66 ( $A = -250,5$   $B = 1115,1$   $C = 2010$ ) et  $R_{eq} = 0,7692$  mΩ.
- ✓ **Modèle constructeur (modèle Rc-Cc)** : avec ce modèle on utilise une capacité constante ( $A = 0$   $B = 0$   $C = C_c = 2791,2F$ ) et  $R_{eq} = R_c = 1,1m\Omega$ .

Les résultats présentés dans la figure 2.71. afin de faire une comparaison entre les valeurs expérimentales et celles calculées en utilisant les deux modèles.



**Fig. 2.71.: Comparaison du comportement énergétique pour deux modèles (modèle énergétique simplifié et modèle constructeur)**

La figure 2.71. révèle une très bonne estimation de la durée de décharge à partir du modèle énergétique, ce qui n'est pas le cas avec l'utilisation du modèle constructeur qui provoque une erreur qui peut aller jusqu'à 63% par rapport aux mesures (figure 2.72.).



**Fig. 2.72.: Erreur énergétique des deux modèles (modèle énergétique simplifié et modèle constructeur)**

Les durées présentées dans la figure 2.72. concernent une seule tension finale ( $V_{SC} = 15V$ ). Afin de connaître l'influence de cette tension finale  $V_{SC}$ , on a présenté l'évolution de la durée de décharge en fonction de cette tension pour différentes tensions finales (Figure 2.73.)

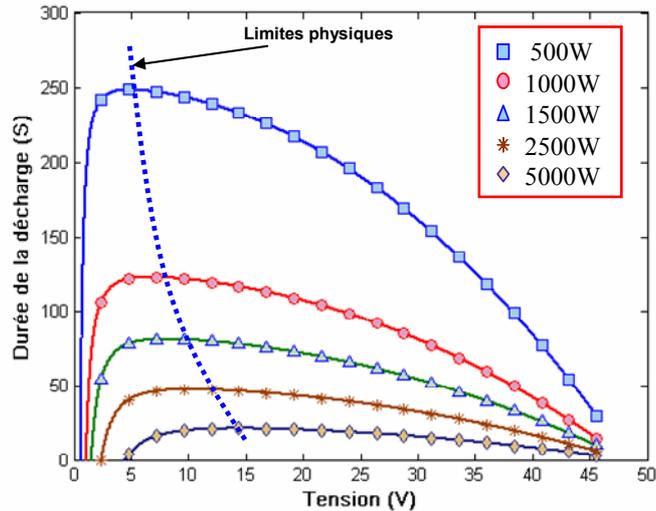


Fig. 2.73. : Evolution de la durée de décharge en fonction de la tension limite  $V_{sc}$

Cette figure montre que pour chaque puissance la durée de la décharge augmente en diminuant la tension finale. Cette durée atteint un maximum qui constitue la limite physique de décharge du module : le supercondensateur ne peut plus fournir d'énergie. Cette limite se détermine en trouvant la tension pour laquelle la dérivée de  $t(V_{sc})$  s'annule. Avec les valeurs des tensions limites, on peut trouver la durée maximale pour chaque puissance (Figure 2.74.).

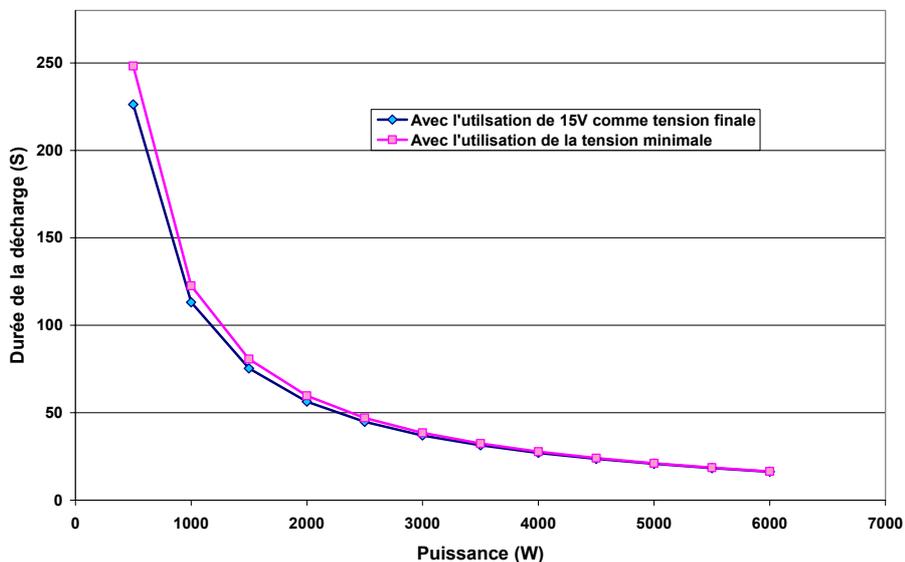


Fig. 2.74.: Evolution de la durée maximale en fonction de la puissance

Cette figure montre qu'il existe un écart entre la durée de décharge pour une tension finale de 15V et celle calculée pour une durée maximale. Elle se réduit avec l'augmentation de la puissance demandée quand la tension maximale pour ces essais approche 15V. Avec ces durées maximales, on peut trouver l'énergie disponible en fonction de la puissance demandée (Figure 2.75.).

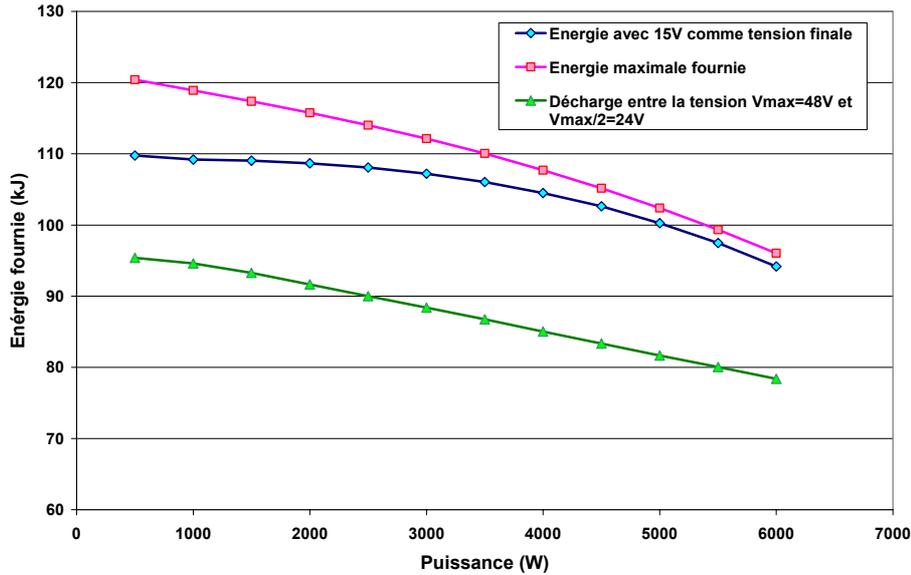


Fig. 2.75.: Evolution de l'énergie maximale fournie en fonction de la puissance demandée

La figure 2.75. montre la décroissance de l'énergie fournie en fonction de la puissance demandée. L'énergie disponible subit une chute d'environ 20% sur la plage de puissance testée.

On remarque aussi que l'énergie fournie pour un essai de décharge entre la tension maximale du module (48V) et la moitié de cette tension (24V) (courbe en vert) représente 80% de l'énergie totale qu'on peut extraire (courbe en rouge).

## II.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté les principaux modèles présents dans la littérature scientifique au sujet des supercondensateurs. Ces modèles, qu'ils soient fréquentiels ou temporels, cherchent à représenter le comportement du composant en fonction de certains paramètres (fréquence, tension, température...).

Cette étude nous a permis de définir les avantages et les limites de chaque modèle. Ces limites peuvent concerner le principe de base du modèle ou les méthodes de caractérisation utilisées. Dans le tableau 2.3, on présente une synthèse des résultats de ce chapitre comparant les trois principaux modèles présents dans la littérature.

D'après les résultats, la principale difficulté rencontrée à la lecture des divers travaux sur ce sujet concerne les méthodes d'identification des paramètres de ces modèles qui s'avèrent « équivalent » entre eux, tout en ayant des approches très différentes en terme de caractérisation. Pour cela, on a cherché et trouvé un lien direct entre les modèles à constante répartie de type « ligne de transmission », basés sur une représentation volumique des charges dans les supercondensateurs avec des branches en parallèle, et le modèle purement fréquentiel qui est basé sur une représentation avec des circuits en série. Ce passage nous a permis d'extraire de chaque approche ses avantages pour aboutir à une méthode d'identification mixte avec une approche fréquentielle pour les résistances et une approche temporelle pour la capacité.

Ainsi, cette synthèse permet de définir un modèle type « ligne de transmission » valide pour une plage de fréquence dépendant des conditions d'identification. Comme on s'intéresse au comportement énergétique du supercondensateur, les phénomènes de redistribution et les fuites internes de longue durée n'ont pas été pris en compte. Le modèle proposé repose sur une méthode originale de caractérisation basée uniquement sur l'utilisation de cycles réels pour l'identification fréquentielle et temporelle des caractéristiques. L'avantage de cette approche est qu'elle est facilement exploitable dans le cas d'applications industrielles avec une caractérisation « on-line ».

Enfin, l'erreur énergétique du modèle de la ligne de transmission dépend du nombre de branches utilisées. En effet, l'utilisation de ce modèle donne une réponse temporelle plus exacte, mais nécessite l'utilisation d'un nombre de branches élevé pour obtenir une bonne approche énergétique sur les phases statiques. A partir de ce modèle « dynamique », une approche énergétique nous a permis de montrer que dans des conditions d'utilisation à courant quasi constant, un modèle de type Req-Ceq s'avère très performant pour approcher le comportement électrique et énergétique du supercondensateur.

Modèle	Méthode de caractérisation	Limite de l'approche		Avantage de l'approche
		Limites du modèle	Limites de la caractérisation	
<b>Modèle constructeur</b> ( $R_C-C_C$ )	Caractérisation temporelle (essai de charge complète)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modèle faible fréquence et statique</li> </ul>	Ne tient pas compte de la variation de la capacité et la variation de la fréquence	Modèle très simple et facilement caractérisé
<b>Modèle fréquentiel</b> ( $R_{DF}, R_{HF}$ et $C_{DF}$ )	Caractérisation fréquentielle (utilisation d'un impédancemètre)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modèle petits signaux</li> <li>Mal adapté à la représentation des phénomènes physiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Demande un appareil supplémentaire de mesure (impédancemètre)</li> <li>Demande beaucoup d'essais à cause de la variation de la capacité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Très grande précision sur la caractérisation des résistances (<math>r_s=R_{HF}</math> et <math>R=3(R_{BF}-R_{HF})</math>)</li> </ul>
<b>Modèle ligne à constante localisée</b> ( $r_s, R, C, R_1, C_1, R_2, C_2 \dots$ )	Caractérisation temporelle (différents essais de charge)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hypothèse de découplage des phases (phase rapide/phase lente).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>l'identification d'un paramètre fait appel à un autre paramètre du modèle (<math>R=f(C), C=f(R)</math>.... Ce lien conduit à une accumulation d'erreurs de caractérisation.</li> <li>l'identification de la résistance série (<math>r_s</math>) dépend de la bande passante du système d'acquisition.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caractérisation simple de la capacité avec un seul essai de charge complète</li> </ul>
<b>Modèle amélioré de la ligne de transmission</b> ( $r_s, R, C$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caractérisation fréquentielle (<math>r_s</math> et <math>R</math>)</li> <li>Caractérisation temporelle (<math>C(v)</math>) (il ne demande qu'un seul cycle à faible courant)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bande passante limitée par les fréquences liées à <math>R_{HF}</math> et <math>R_{BF}</math> (redistribution lente et fuites internes non prises en compte)</li> </ul>	-----	<p>Il rassemble les avantages des deux modèles précédents :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Grande précision sur la caractérisation des résistances (<math>r_s=R_{HF}</math> et <math>R=3(R_{BF}-R_{HF})</math>)</li> <li>Caractérisation simple de la capacité avec un seul essai de charge complète</li> </ul>
<b>Modèle énergétique simplifié</b> ( $R_{eq}$ et $C_{eq}$ )	Caractérisation ( $R_{eq}, C_{eq}$ ) basée sur les caractéristiques du modèle amélioré de la ligne de transmission .	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modèle adapté aux basses fréquences et simulation des systèmes électriques.</li> </ul>	-----	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modèle simple</li> <li>Représente le comportement temporel et énergétique du supercondensateur.</li> </ul>

Tab.2.3-Tableau récapitulatif des modèles



## Figures du chapitre 2

Fig. 2.1 : Schéma de base du comportement des supercondensateurs .....	27
Fig. 2.2: Méthode de caractérisation utilisée par MAXWELL .....	29
Fig. 2.3: Comparaison du modèle RC d'un supercondensateur avec la réponse expérimentale .....	30
Fig. 2.4: Comparaison de la réponse d'un modèle $R_c C_c$ avec une réponse expérimentale d'un élément pour un essai de charge à courant constant ( $I=10A$ ).....	31
Fig. 2.5: Utilisation d'un modèle caractérisé avec un essai à ( $I=10A$ ) pour un essai à $I=100A$ .....	31
Fig. 2.6: Variation de la résistance $R_c$ pour différentes durées de la charge .....	32
Fig. 2.7: Essai de charge complète du supercondensateur .....	32
Fig. 2.8: Principe de la caractérisation fréquentielle d'un supercondensateur .....	33
Fig. 2.9: Schéma de base du modèle fréquentiel.....	33
Fig. 2.10: Comparaison d'une réponse expérimentale avec une réponse donnée par une ligne de transmission [C2-11].....	34
Fig. 2.11: Réponse fréquentielle d'une ligne de transmission $R_{BF}=0.784\text{ m}\Omega$ $C=2700F$ , $R_{HF}=0,47\text{ m}\Omega$ et $V_{sc}=1.58V$ .....	35
Fig. 2.12: Représentation de l'impédance d'un supercondensateur .....	36
basée sur la réponse fréquentielle .....	36
Fig. 2.13: Diagramme d'impédance du modèle circuit pour différentes valeurs de $n$ .....	36
Fig. 2.14: Comparaison de la réponse du modèle circuit ( $n = 20$ ) avec une réponse expérimentale ( $V_{sc}=1.58V$ )...37	
Fig. 2.15: Limite du modèle fréquentiel pour les très faibles fréquences.....	38
Fig. 2.16: Utilisation des branches supplémentaires pour représenter la redistribution des charges.....	38
Fig. 2.17: Influence des branches supplémentaires sur la réponse fréquentielle du supercondensateur .....	39
Fig. 2.18: Diagramme d'impédance expérimentaux du supercondensateur MONTENA 2.5V/1400F [C2-6] .....	40
Fig. 2.19: Utilisation du cyclage pour la caractérisation du supercondensateur .....	41
Fig. 2.20: Type de cycles utilisés pour la caractérisation des supercondensateurs .....	41
Fig. 2.21: Amplitude des harmoniques du courant de cyclage.....	42
Fig. 2.22: Principe de décomposition d'un signal riche en fréquence.....	42
Fig. 2.23: Comparaison de la réponse du modèle circuit avec une réponse expérimentale pour un cycle charge/décharge.....	43
Fig. 2.24: Courant de cyclage avec injection d'un harmonique haute fréquence ( $f_{HF} = 50Hz$ ) .....	44
Fig. 2.25: Comparaison de la réponse du modèle circuit avec une réponse expérimentale pour un cycle charge/décharge avec injection d'un harmonique haute fréquence .....	44
Fig. 2.26: Réseau de transmission.....	45
Fig. 2.27: Impédance inductive d'une ligne de transmission( $C=2700F$ , $R=0.85m\Omega$ ).....	46
Fig. 2.28: Modèle comportemental d'une ligne de transmission .....	48
Fig. 2.29: Modèle de supercondensateur proposé par Zubieta .....	49
Fig. 2.30: Comparaison de la réponse du modèle à deux branches avec la réponse expérimentale pour un essai à courant constant $I=100A$ .....	49
Fig. 2.31: Essai de charge complète à 50A .....	50

Fig. 2.32: Essai de charge complète à 10A .....	50
Fig. 2.33: Modèle simplifié de la ligne de transmission.....	51
Fig. 2.34: Simulation du modèle circuit d'une ligne de transmission (C=2700F,R=0.85mΩ).....	51
Fig. 2.35: Schéma du modèle multi-branches .....	51
Fig. 2.36: Essai de charge complète du supercondensateur .....	52
Fig. 2.37: Variation de la capacité en fonction de la tension.....	52
Fig. 2.38: Identification de la résistance totale de la ligne de transmission .....	53
Fig. 2.39: Identification des paramètres de la première branche de redistribution.....	53
Fig. 2.40: Identification des Branches R1C1 et R2C2 .....	54
Fig. 2.41: Simulation du modèle multi-branches pour une charge partielle (I=100A).....	55
Fig. 2.42: Utilisation de la réponse fréquentielle pour calculer la résistance série et la résistance de transmission .....	57
Fig. 2.43 : Paramétrage fréquentiel de la ligne de transmission.....	58
Fig. 2.44: Réponse d'un supercondensateur pour des cycles charge/décharge .....	58
Fig. 2.45: Réponse d'un supercondensateur pour des cycles à différents niveaux de courant .....	58
Fig. 2.46: Charge complète à 10A du module supercondensateur .....	59
Fig. 2.47: Charge complète à 50A du module supercondensateur .....	60
Fig. 2.48: Charge complète à 100A du module supercondensateur .....	60
Fig. 2.49: Charge complète à 10A du module supercondensateur .....	60
Fig. 2.50: Modèle énergétique simplifié .....	61
Fig. 2.51: modèle énergétique simplifié.....	62
Fig. 2.52: Variation du courant des capacités élémentaire d'un modèle amélioré de la ligne de transmission pour un essai de charge à 100A.....	62
Fig. 2.53: Comparaison de la réponse d'un modèle $R_{eq} C_{eq}$ avec celle du modèle simplifié de la ligne de transmission (n=10).....	65
Fig. 2.54: Variation des pertes dues à la transmission des charges pour un essai de charge à 100A et une durée $T_c=50s$ , $R=0,85 m\Omega$ .....	65
Fig. 2.55: Réponse du modèle amélioré du supercondensateur pour différentes valeurs du nombre de branches (n=5, 10, 25).....	66
Fig. 2.56: Variation de la résistance de transmission en fonction du nombre de branches .....	67
Fig. 2.57: Erreur sur la résistance de transmission en fonction du nombre des branches .....	67
Fig. 2.58: Erreur sur le rendement en fonction du nombre de branches.....	69
Fig. 2.59 : Erreur sur le rendement en fonction du rendement réel pour une ligne de transmission avec 10 branches .....	70
Fig. 2.60: caractéristiques énergétiques du modèle énergétique simplifié .....	70
Fig. 2.61: Evolution de la capacité énergétique en fonction de la tension .....	72
Fig. 2.62 : Variation de la capacité d'un supercondensateur en fonction de la tension.....	73
Fig. 2.63: Comparaison des résultats des deux méthodes pour le calcul de la capacité de stockage .....	74
Fig. 2.64: Comparaison des deux capacités qui caractérise le supercondensateur .....	75
Fig. 2.65: Différence entre la capacité instantanée et la capacité énergétique .....	75
Fig. 2.66: Essai à puissance constante $P=3kW$ .....	76
Fig. 2.67: Evolution de la puissance pour un essai à puissance constante $P=3kW$ .....	76

Fig. 2.68: Evolution de la durée de décharge en fonction de la puissance demandée.....	77
Fig. 2.69: Evolution de l'énergie fournie en fonction de la puissance demandée .....	77
Fig. 2.70: Modèle utilisé pour le tracé du diagramme de Ragone.....	78
Fig. 2.71: Comparaison du comportement énergétique pour deux modèles (modèle énergétique simplifié et modèle constructeur).....	80
Fig. 2.72: Erreur énergétique des deux modèles (modèle énergétique simplifié et modèle constructeur) .....	80
Fig. 2.73 : Evolution de la durée de décharge en fonction de la tension limite $V_{sc}$ .....	81
Fig. 2.74: Evolution de la durée maximale en fonction de la puissance .....	81
Fig. 2.75: Evolution de l'énergie maximale fournie en fonction de la puissance demandée .....	82

## *Bibliographie du chapitre 2*

### [C2-1]

P. AZAÏS, "Recherche des causes du vieillissement de supercondensateurs a electrolyte organique a base de carbones actives," thèse doctorat, Université d'Orléans, novembre 2003.

### [C2-2]

M. Malloukia, F. Tran-Vana, C. Sarrazina, P. Simonc, A. Ded, C. Chevrot, J.F. Fauvarqueb, "Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Polypyrrole hybrid nanocomposite materials for supercapacitors," ESSCAP'2004, Belfort, France.

### [C2-3]

C. Portet, P.L. Taberna, P. Simon, "Al current collector surface treatment and Carbon Nanotubes influences on Carbon / Carbon supercapacitors performances," ESSCAP'2004, Belfort, France.

### [C2-4]

T. Cottineau, M. Toupin, T. Delahaye, T. Brousse et D. Bélanger, "Nanostructured transition metal oxides for aqueous hybrid electrochemical supercapacitors," ESSCAP'2004, Belfort, France.

### [C2-5]

H. Malmberg, M. Bursell, P. Björnbom, et A. Lundblad, "Development and characterization of Ni-C Supercapacitor," ESSCAP'2004, Belfort, France.

### [C2-6]

J.C. Lassègues « Laboratoire de physico-chimie moléculaire de l'université de Bordeaux1 (France) », "Supercondensateurs," Techniques de l'ingénieur, D3 334.

### [C2-7]

L. Zubieta, R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors (DLCs) for power electronics applications," IEEE-IAS'98, October 1998, Saint-Louis, pp. 1149-1154.

### [C2-8]

Maxwell technology, "Representative Test Procedure for Customer Evaluations (APPLICATION NOTE)," www.Maxwell.com, Mars 2002.

### [C2-9]

Maxwell technology, "Boostcap Ultracapacitor Module Operating Manual," www.Maxwell.com, Janvier 2003.

### [C2-10]

S. Buller, E. Karden, D. Kok, R.W. De Doncker, "Simulation of supercapacitors in highly dynamic applications," ESV, 2001, Berlin, Germany.

**[C2-11]**

S. Buller, E. Karden, D. Kok, and R. W. De Doncker, "Modeling the Dynamic Behavior of Supercapacitors Using Impedance Spectroscopy," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 38, no. 6, November/December 2002

**[C2-12]**

D. Candusso, "Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique," thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, Novembre 2004.

**[C2-3]**

A. Hammar, J. Chabas, R. Lallemand, G. Coquery, G. rojat, P. Venet, "Impedance spectroscopy characterization of supercapacitors for railway environment," EPF2004, Berlin, Germany.

**[C2-14]**

F. Belhachemi, S. Raël, B. Davat, "A physical based model of power electric double-layer supercapacitors," IEEE-IAS'2000, Rome, Italie.

**[C2-15]**

W. Lajnef, J.-M. Vinassa, S. Azzopardi, O. Briat, E. Woïrgard, C. Zardini, J.L. Aucouturier, "Ultracapacitors Modeling Improvement Using an Experimental Characterization Based on Step and Frequency Responses," PESC'2004, Aschen, Allemagne.

**[C2-16]**

N. Rizoug, P. Bartholomeüs, P. Le Moigne, B. Vulturescu, "Electrical and thermal behaviour of a supercapacitor module: on-line characterization," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C2-17]**

N. Rizoug, "Caractérisation d'un module supercondensateur pour des contraintes électriques de type traction," JCGE'2005, Montpellier, France.

**[C2-18]**

R. Saisset, "Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire," thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, Avril 2004.

**[C2-19]**

J. Lachaize, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction," thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, septembre 2004.

**[C2-20]**

J.C. Lassègues « Laboratoire de physico-chimie moléculaire de l'université de Bordeaux1 (France) », "Supercondensateurs," Techniques de l'ingénieur, D3 334.



## *Chapitre 3 :*

*Etude expérimentale d'un  
module de  
supercondensateurs*



# Table des matières



## Chapitre 3 : Etude expérimentale d'un module de supercondensateurs

<b>III.1. LE BANC DE TEST .....</b>	<b>92</b>
III.1.1. LES MODULES SUPERCONDENSATEURS .....	93
III.1.2. LE CONVERTISSEUR.....	94
III.1.3. DESCRIPTION DES ENTREES-SORTIES DU SYSTEME D'ACQUISITION .....	97
III.1.3.1. <i>L'acquisition de données</i> .....	97
III.1.3.2. <i>Communication entre la centrale et le matériel</i> .....	99
III.1.4. PRINCIPE DU CYCLAGE .....	100
<b>III.2. FONCTIONNEMENT DU BANC EN CYCLAGE .....</b>	<b>101</b>
III.2.1. INITIALISATION DU MATERIEL ET DE LA TENSION DES DEUX MODULES .....	102
III.2.2. CYCLAGE ET ACQUISITIONS.....	102
III.2.3. GESTION DE L'ALIMENTATION AUXILIAIRE .....	103
III.2.4. SCRUTATION .....	103
III.2.5. GESTION DES DEFAUTS.....	103
III.2.6. CONTROLE DE LA TEMPERATURE DES ELEMENTS .....	104
III.2.7. FONCTIONNEMENT GLOBAL DU PROGRAMME : EXEMPLE DE CYCLE .....	105
<b>III.3. LIMITES DU BANC ET MODELE .....</b>	<b>107</b>
III.3.1. LES PERTES DU BANC .....	107
III.3.2. PHASES DE FONCTIONNEMENT POUR LA CHARGE DU MODULE TESTE .....	108
III.3.3. PREDETERMINATION DES DUREES LIMITES DE CHARGE .....	109
III.3.3.1. <i>Phase 1 (calcul de <math>t_1</math>)</i> .....	110
III.3.3.2. <i>Phase 2 (calcul de <math>t_2</math>)</i> .....	110
III.3.4. MODELE DU BANC .....	111
III.3.5. AMELIORATION DES PERFORMANCES DE CYCLAGE DU BANC .....	112
<b>III.4. RENDEMENT DES SUPERCONDENSATEURS .....</b>	<b>113</b>
III.4.1. COMPARAISON DE L'EXPERIMENTATION ET DU MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE. ....	115
<b>III.5. PRINCIPE DE CARACTERISATION ET CYCLAGE DU MODULE .....</b>	<b>115</b>
III.5.1. CYCLE UTILISE POUR LE VIEILLISSEMENT.....	116
III.5.2. CYCLE UTILISE POUR LA CARACTERISATION .....	117
III.5.3. REPONSE THERMIQUE DU MODULE SUPERCONDENSATEUR.....	118
III.5.3.1. <i>Réponse thermique pour des cycles de vieillissement</i> .....	118
III.5.3.2. <i>Réponse thermique des cycles de caractérisation</i> .....	119
<b>III.6. RESULTATS EXPERIMENTAUX DE CARACTERISATION .....</b>	<b>120</b>
III.6.1. DEMARCHE .....	120
III.6.2. CARACTERISATION A L'AIDE DU MODELE SIMPLIFIE DE LA LIGNE DE TRANSMISSION.....	121
III.6.2.1. <i>Caractérisation des résistances du modèle à l'aide de la caractérisation fréquentielle</i> .....	121
III.6.2.1.1. Evolution de la résistance série en fonction de la température .....	122

III.6.2.1.1.	Evolution de la résistance de transmission en fonction de la température ...	123
III.6.2.2.	<i>Caractérisation des capacités du modèle à l'aide de la caractérisation temporelle</i> ....	124
III.6.2.2.1.	Evolution de la capacité en fonction de la tension.....	124
III.6.2.2.2.	Evolution de la capacité en fonction de la température .....	125
III.6.3.	CARACTERISATION DU MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE.....	126
III.6.3.1.	<i>Evolution de la résistance</i> .....	126
III.6.3.1.1.	Caractérisation fréquentielle de la résistance équivalente ( $R_{eq}$ ).....	126
III.6.3.1.2.	Caractérisation temporelle de la résistance équivalente ( $R_{eq}$ ).....	127
III.6.3.1.3.	Caractérisation de la résistance énergétique ( $R_E$ ).....	128
III.6.3.1.4.	Comparaison des trois méthodes .....	129
III.6.3.2.	<i>Evolution de la capacité</i> .....	130
III.6.3.2.1.	Caractérisation de la capacité équivalente ( $C_{eq}$ ).....	130
III.6.3.2.2.	Caractérisation de la capacité énergétique ( $C_E$ ) .....	130
III.6.3.2.2.1.	Evolution de la capacité en fonction de la tension.....	130
III.6.3.2.2.2.	Evolution de la capacité en fonction de la température .....	131
III.6.3.2.3.	Comparaison des deux méthodes.....	132
III.6.4.	COMPARAISON DES RESULTATS DE CARACTERISATION OBTENUS AVEC LES DEUX TYPES DE CYCLES.	133
III.6.4.1.	<i>Comparaison des résistances obtenues par la caractérisation fréquentielle</i> .....	133
III.6.4.2.	<i>Comparaison des capacités équivalentes</i> .....	134
<b>III.7.</b>	<b>ETUDE DU VIEILLISSEMENT.....</b>	<b>134</b>
III.7.1.	METHODES UTILISEES POUR L'ETUDE DU VIEILLISSEMENT .....	134
III.7.1.1.	<i>Utilisation des mêmes cycles pour le vieillissement et la caractérisation.</i> .....	135
III.7.1.2.	<i>Utilisation de cycles différents pour le vieillissement et la caractérisation</i> .....	135
III.7.2.	EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES .....	136
III.7.2.1.	<i>Evolution de la résistance équivalente</i> .....	136
III.7.2.2.	<i>Evolution de la résistance série</i> .....	137
III.7.2.3.	<i>Evolution de la capacité équivalente</i> .....	138
<b>III.8.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>139</b>



# Chapitre 3

## Etude Expérimentale D'un Module De Supercondensateurs

Le deuxième chapitre était dédié à la synthèse des modèles de supercondensateurs et à la mise en place de méthodes de caractérisation de ces modèles. Ce troisième chapitre a pour objet de présenter les travaux et résultats expérimentaux déjà réalisés sur 200000 cycles à l'aide du banc d'essais développé au L2EP.

Dans la première partie du chapitre, la structure générale du banc d'essai est décrite. Le fonctionnement des différentes parties de ce banc est détaillé ainsi que le principe de supervision de l'ensemble (convertisseur, gestion de l'énergie, système d'acquisition, etc...). Ensuite, la méthode de cyclage des supercondensateurs permettant d'étudier leur vieillissement est définie. Ce cyclage doit permettre de reproduire les conditions d'utilisation similaires à celles des applications de type traction électrique. Ce cyclage a également pour but de suivre l'évolution de certaines caractéristiques du module de supercondensateurs tout au long de sa durée de vie par des méthodes directes de caractérisation.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée aux résultats expérimentaux obtenus sur le banc de test. Une étude de caractérisation de certains éléments supercondensateurs du module est présentée afin de définir la dépendance des paramètres des deux modèles (modèle simplifié de la ligne de transmission et modèle énergétique simplifié), définis dans le chapitre précédent, en fonction de la température. Enfin les résultats obtenus par cyclage mettent en évidence l'effet du vieillissement progressif des composants.

### III.1. Le banc de test

Le banc de test développé au laboratoire [C3-1] permet de tester durant une longue période le comportement d'un module de supercondensateurs dans des conditions électriques semblables à celles des applications industrielles (traction électrique, stockage d'énergie, UPS, etc...). Cette étude est faite afin d'évaluer l'intérêt de ces dispositifs et analyser les problèmes technologiques qui peuvent apparaître lors de l'utilisation de ce type de composants dans des applications à fortes contraintes en puissance.

Ce banc peut être utilisé pour effectuer des cycles permettant la charge et la décharge de plusieurs kW, 24h/24h et 7jours/7jours, afin d'obtenir l'évolution des caractéristiques du module tout au long de sa vie.

Les figures 3.1. et 3.2. présentent respectivement le synoptique de fonctionnement ainsi qu'une photographie du banc d'essai développé au L2EP. Son principe de fonctionnement est basé sur une méthode classique d'essais en puissance : la méthode dite « d'opposition ». Deux modules de supercondensateurs s'échangent de l'énergie au cours de phases de cyclage. Le courant du module testé (SC1) est contrôlé afin d'imposer un cycle de charge-décharge désiré. L'autre module, le module tampon (SC2), sert de tampon d'énergie afin d'alimenter correctement le module testé. Par ailleurs, le module tampon reçoit du réseau, par le biais d'une alimentation auxiliaire, l'énergie correspondant aux pertes apparaissant sur un cycle de fonctionnement, de façon à pouvoir fonctionner en régime établi. Ainsi, l'état du module testé est le même au début de chaque cycle. De ce fait, le banc ne consomme que ses pertes, qui ne seront d'ailleurs pas négligeables compte tenu des niveaux de tensions et de puissances appliqués.

Cette partie a pour objet de présenter les principaux éléments du banc et leur principe de fonctionnement. Cette présentation décrit tout d'abord la partie puissance et gestion de celle-ci, puis la partie acquisitions, mesures et gestion des cycles. Un modèle du banc est également présenté. Ce dernier est utile à la préparation des essais et à la vérification de la faisabilité des cycles.

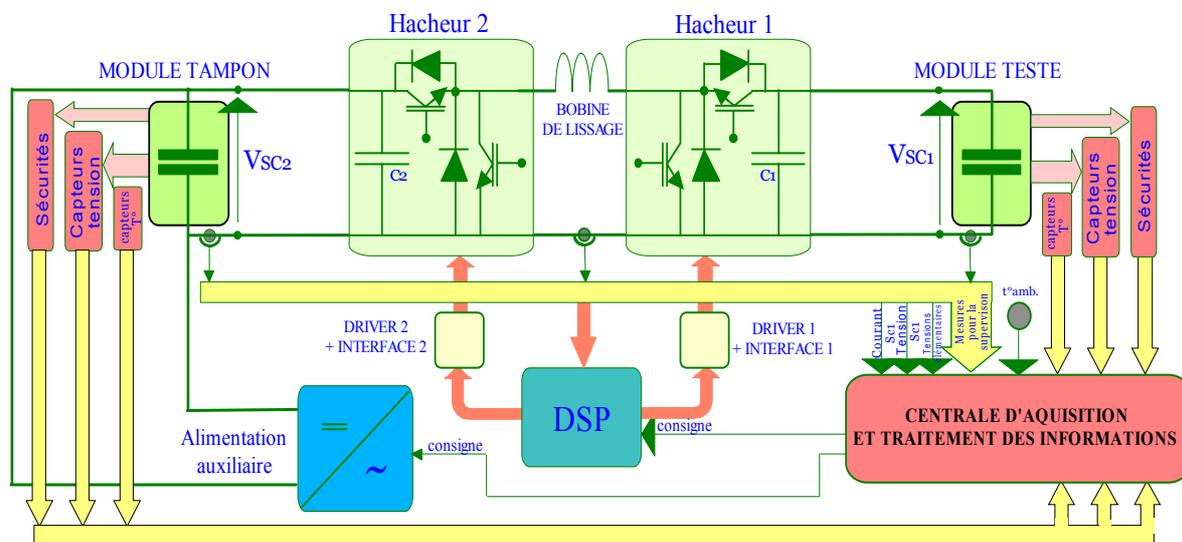


Fig. 3.1.: Synoptique du banc de caractérisation de modules de supercondensateurs.

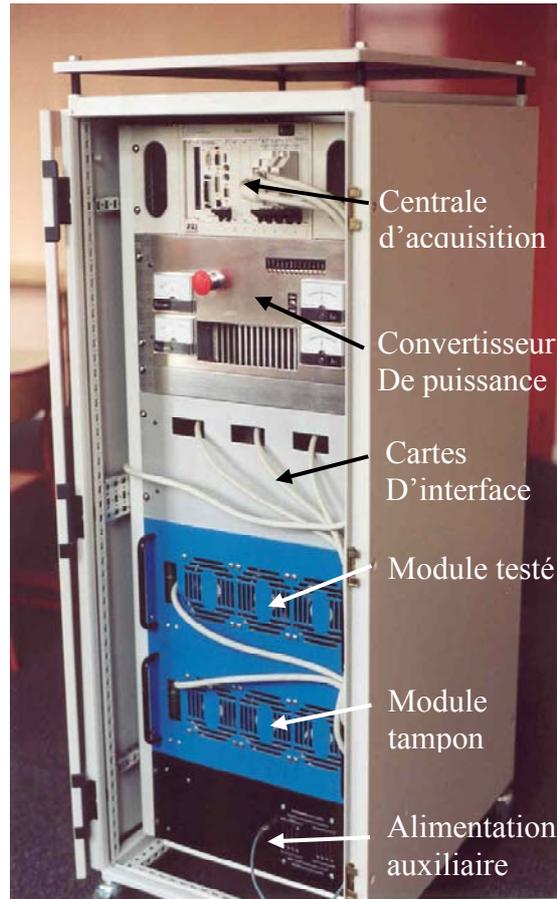


Fig. 3.2. : Banc de caractérisation

### III.1.1. Les modules supercondensateurs

Les deux modules de supercondensateurs (96F/56V) utilisés sur le banc étaient à l'origine composés de 28 éléments de 2700 Farads de type PC7223 de marque MAXWELL. Afin d'élargir la capacité de cyclage du banc, le nombre d'éléments du « module testé » ou SC1 a été réduit à 24 éléments. Désormais le module testé a comme caractéristiques 112F /48V. Il est chargé et déchargé avec un profil de courant défini dans la partie cyclage. Ses grandeurs électriques sont captées et stockées périodiquement par la centrale d'acquisition. Le second module nommé « module tampon » ou SC2 est composé de 28 éléments et sert, comme son nom l'indique, de tampon d'énergie pour la charge et la décharge du module testé.

La partie sécurité des modules a été complètement revue afin de protéger en surtension mais également en température chaque élément des modules. Grâce aux cartes de sécurité associées aux modules, il est également possible de localiser l'élément en défaut.

En ce qui concerne le système d'équilibrage destiné à limiter les déséquilibres de tension des supercondensateurs associés en série dans le module, celui-ci a été remplacé par de simples résistances sur le module tampon et supprimé sur le module testé. Cette démarche nous permet d'évaluer la capacité d'équilibrage naturel des supercondensateurs lorsqu'ils sont associés en série et la dispersion de tension apparaissant au cours du cyclage. Cette étude est présentée dans le prochain chapitre.

Une ventilation forcée a également été ajoutée aux modules afin de pouvoir appliquer des cycles plus contraignants et de limiter leur montée en température. Le courant maximum supporté par ces modules est de 400A (donnée constructeur).



Fig. 3.3. : Module supercondensateur (96F, 56V, 400A)

### III.1.2. Le convertisseur

Le transit d'énergie est contrôlé par un convertisseur statique (figure 3.4.). Les tensions des supercondensateurs étant fortement variables, le convertisseur doit être abaisseur/élevateur. De plus, compte tenu de la nature « tension » des supercondensateurs, il a été choisi au niveau de la structure de conversion de renforcer leur nature en ajoutant des condensateurs en entrée et sortie du convertisseur. Il a ainsi été nécessaire d'intercaler une inductance entre deux hacheurs réversibles en courant (figure 3.5.) permettant d'assurer l'alternance des sources. De ce fait, les filtres d'entrée et de sortie associés aux supercondensateurs présentent de faibles pertes (condensateurs). En effet, la structure duale aurait nécessité la présence de deux inductances et créé des pertes importantes au vu des contraintes électriques basse tension et fort courant des supercondensateurs.

Le contrôle du convertisseur est assuré par un DSP (ADMC 401) spécialisé dans les applications d'électronique de puissance et les systèmes de commande. La fréquence de découpage pour le contrôle des IGBT est de 10Khz.

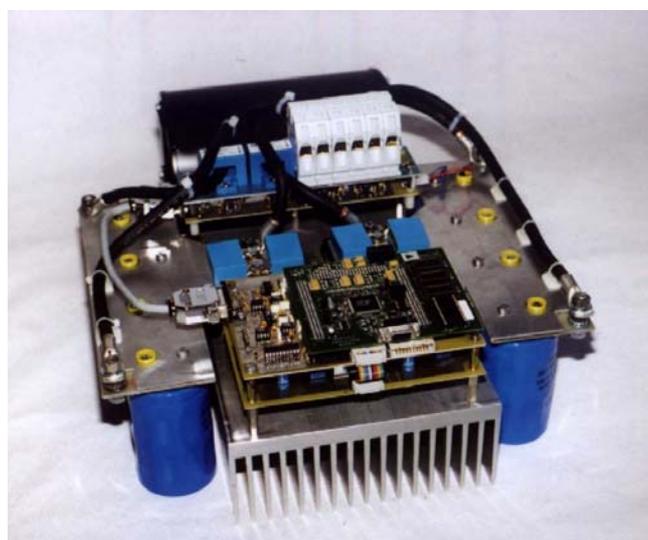


Fig. 3.4. : Le convertisseur d'échange d'énergie (60V/400A)

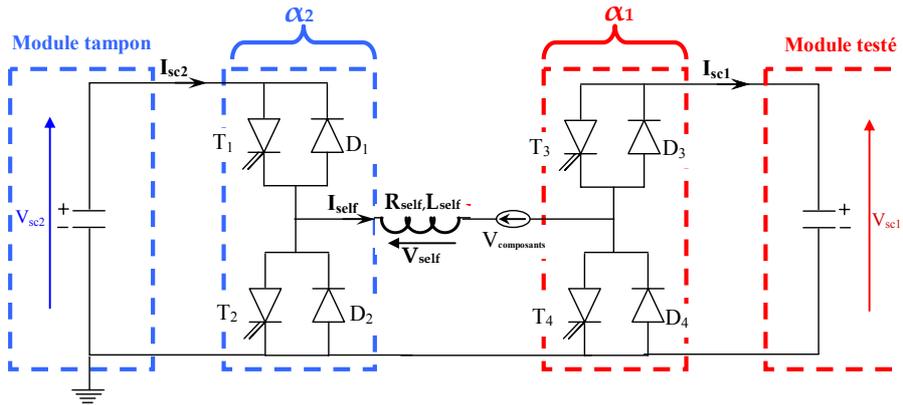


Fig. 3.5. : Hacheur quatre quadrants

Le convertisseur change de mode de fonctionnement (élevateur/abaisseur) suivant la différence de tension entre le module tampon et le module testé. Les lois de commande simplifiées du convertisseur sont les suivantes :

$$I_{self} = \frac{I_{sc1}}{\alpha_1} = \frac{I_{sc2}}{\alpha_2} \quad (III-1)$$

$$V_{self} = V_{sc2} \cdot \alpha_2 - V_{sc1} \cdot \alpha_1 \quad (III-2)$$

Avec :  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  les rapports cycliques des deux bras

Pour limiter les pertes du montage, le convertisseur est commandé de telle sorte que l'un des rapports cycliques soit saturé ( $\alpha_1=1$  ou  $\alpha_2=1$ ) à chaque période de modulation. Ce principe de contrôle permet de réduire les pertes par commutation. Le tableau 3.1 donne les différentes séquences de fonctionnement possibles.

Le principe de commande du dispositif est présenté sur la figure 3.6. .

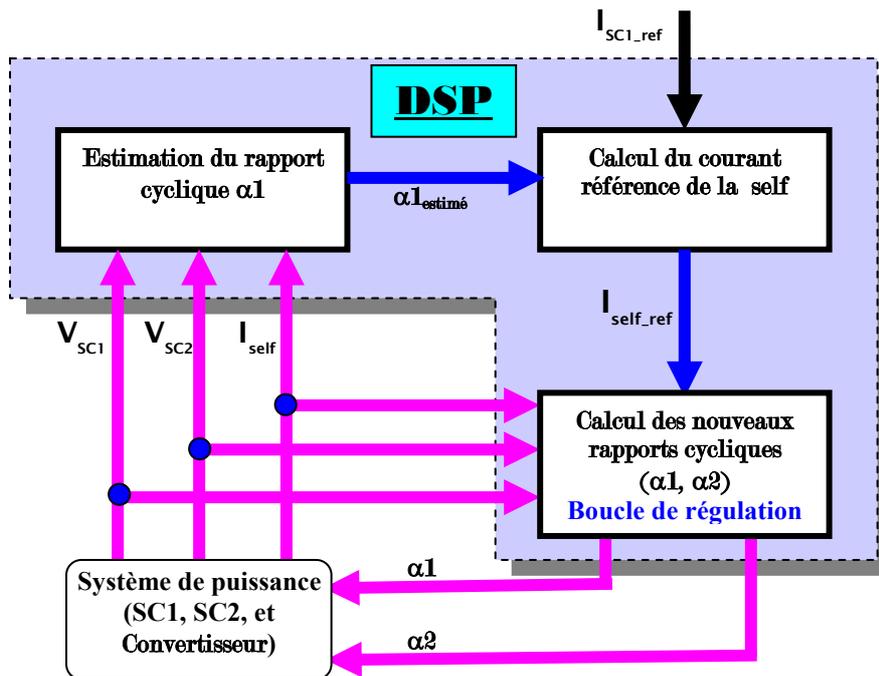
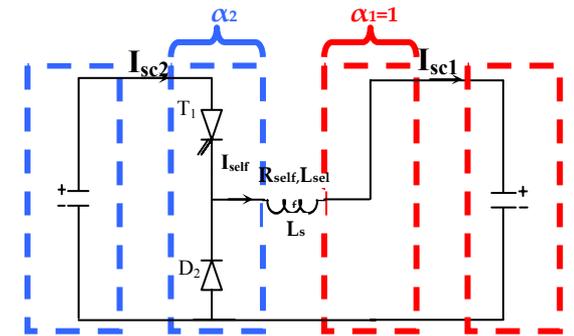
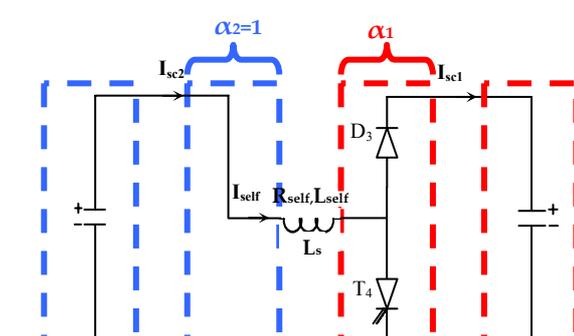
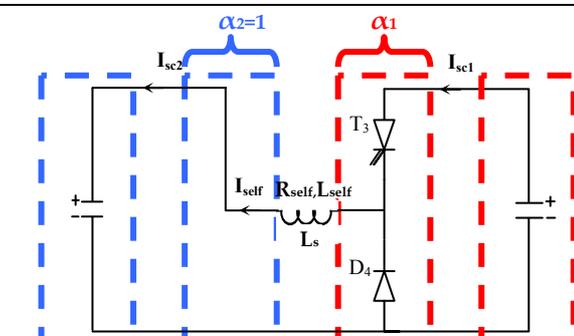
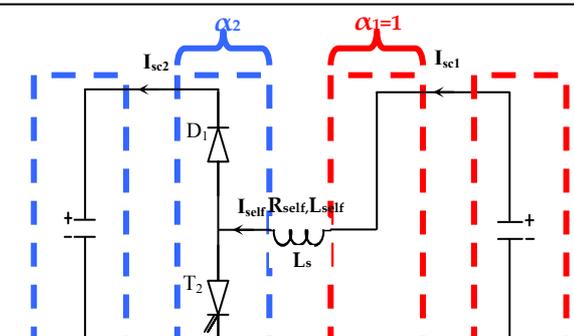


Fig. 3.6. : Principe de commande du convertisseur

<p>Début de la charge de SC1. SC2 est complètement chargé. Dans ce cas <math>I_{SC1} = I_{self} = Cst</math>, <math>\alpha_1 = 1</math> et <math>\alpha_2 = \frac{V_{SC1} + V_{self}}{V_{SC2}}</math>. Comme <math>V_{SC1}</math> augmente et <math>V_{SC2}</math> diminue, <math>\alpha_2</math> va augmenter jusqu'à atteindre 1. A cet instant <math>V_{SC2} = V_{SC1} + V_{self}</math>, le hacheur 2 fonctionne en dévolteur «BUCK» (diminution de la tension et augmentation du courant dans le sens de charge)</p>	 <p><b>1</b> Buck (hacheur série)</p>
<p>La charge du module SC1 par SC2 continue. Dans ce cas <math>I_{SC2} = I_{self}</math>, <math>\alpha_2 = 1</math>, et <math>\alpha_1 = \frac{V_{SC2} - V_{self}}{V_{SC1}}</math>. Comme <math>V_{SC1}</math> augmente et <math>V_{SC2}</math> diminue, <math>\alpha_1</math> va diminuer jusqu'à la fin de la charge. Le hacheur 1 fonctionne en survolteur « BOOST » (augmentation de la tension et diminution du courant dans le sens de charge). Ceci a pour conséquence de faire en sorte que le courant dans la self croît jusqu'à atteindre une phase de limitation au courant maximum. Cette étape se termine lorsque les pertes tendent à devenir supérieures à la puissance extractible de SC2. Cette dernière phase doit être évitée car la puissance transitiée n'est que pure perte</p>	 <p><b>2</b> Boost (Hacheur parallèle)</p>
<p>Début de la décharge de SC1. SC2 est déchargé. Dans ce cas <math>I_{SC2} = I_{self}</math>, <math>\alpha_2=1</math> et <math>\alpha_1 = \frac{V_{sc2} - V_{self}}{V_{sc1}}</math>. Comme <math>V_{SC1}</math> diminue et <math>V_{SC2}</math> augmente, <math>\alpha_1</math> va augmenter jusqu'à atteindre 1. A cet instant <math>V_{SC2} = V_{SC1} + V_{self}</math>, le hacheur 1 fonctionne en dévolteur «BUCK».</p>	 <p><b>3</b> Buck (hacheur série)</p>
<p>La décharge du module SC1 dans SC2 continue, dans ce cas <math>I_{SC1} = I_{self} = Cst</math>, <math>\alpha_1=1</math> et <math>\alpha_2 = \frac{V_{SC1} + V_{self}}{V_{SC2}}</math>. Comme <math>V_{SC1}</math> diminue et <math>V_{SC2}</math> augmente, <math>\alpha_2</math> va diminuer, le hacheur 2 fonctionne en dévolteur «BUCK». Cette étape peut se terminer par l'annulation du courant lorsque les chutes de tension sont supérieures à la tension aux bornes du Module SC1.</p>	 <p><b>4</b> Boost (Hacheur parallèle)</p>

Tab. 3.1- Séquences de fonctionnement possibles du convertisseur

Le principe de contrôle du convertisseur est le suivant :

- une consigne extérieure de courant du module testé ( $I_{sc1\_ref}$ ) est imposée par la centrale d'acquisition qui gère le processus global.
- cette référence permet d'estimer le courant référence de l'inductance ( $I_{self\_ref}$ ) par estimation du rapport cyclique du premier bras ( $\alpha_1$ ) et prenant en compte les chutes de tension du convertisseur.

$$I_{self\_ref} = \frac{I_{sc1\_ref}}{\alpha_{estimé}}$$

- la régulation du courant de la self (figure 3.7.) permet de trouver les deux rapports cycliques de référence ( $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ ) que le convertisseur doit imposer (figure 3.7.).

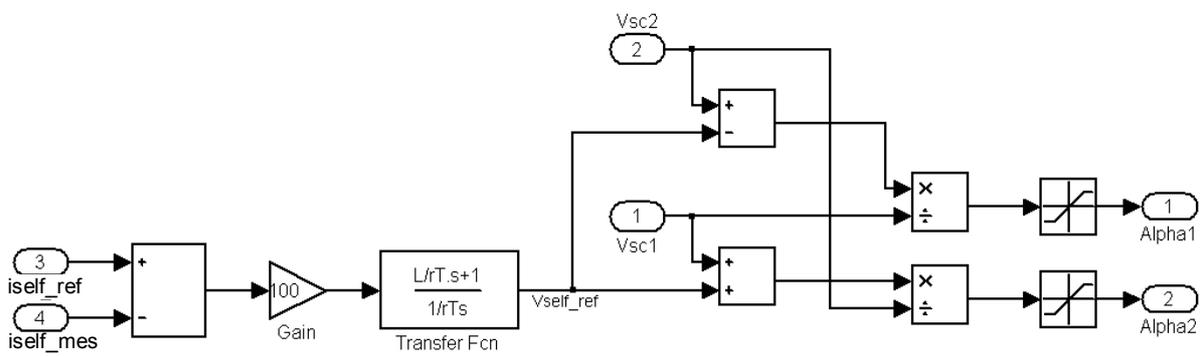


Fig. 3.7. : Boucle de régulation du courant de la self

D'un point de vue précision et temps de réponse, le courant d'offset est de l'ordre de 0.5A. L'erreur totale est inférieure à 1.5% pour un courant de référence de 100A. La constante de temps du système asservi est d'environ 5ms. Cela donne donc une bande passante de l'ordre de 35Hz.

### III.1.3. Description des entrées-sorties du système d'acquisition

Le dispositif développé dispose d'une centrale d'acquisition utilisant différentes cartes d'entrées-sorties. Nous allons tout d'abord présenter les entrées analogiques des différentes cartes, et voir quels sont les moyens de mesure affectés au banc. Nous expliquerons ensuite comment s'opère la communication entre les différents éléments du banc et quelles sont les ressources matérielles utilisées.

#### III.1.3.1. L'acquisition de données

La centrale d'acquisition supervise l'ensemble du banc de test (génération des profils de cyclage, acquisition et stockage des données, gestion des sécurités et initialisation du banc). Au total, il est possible d'accéder à plus de 120 données analogiques et numériques. Ce sont des données électriques (tensions et courants pour l'ensemble du banc ainsi que les tensions des 52 éléments des 2 modules de supercondensateurs), thermiques (températures réparties dans le module) et des informations sur l'état du banc (défauts divers). Dans un souci de flexibilité, le logiciel LABVIEW a été retenu. Quatre cartes National Instruments assurent l'acquisition des données. Ces cartes sont connectées sur un châssis PXI. Le détail des acquisitions à effectuer est donné sur le synoptique suivant :

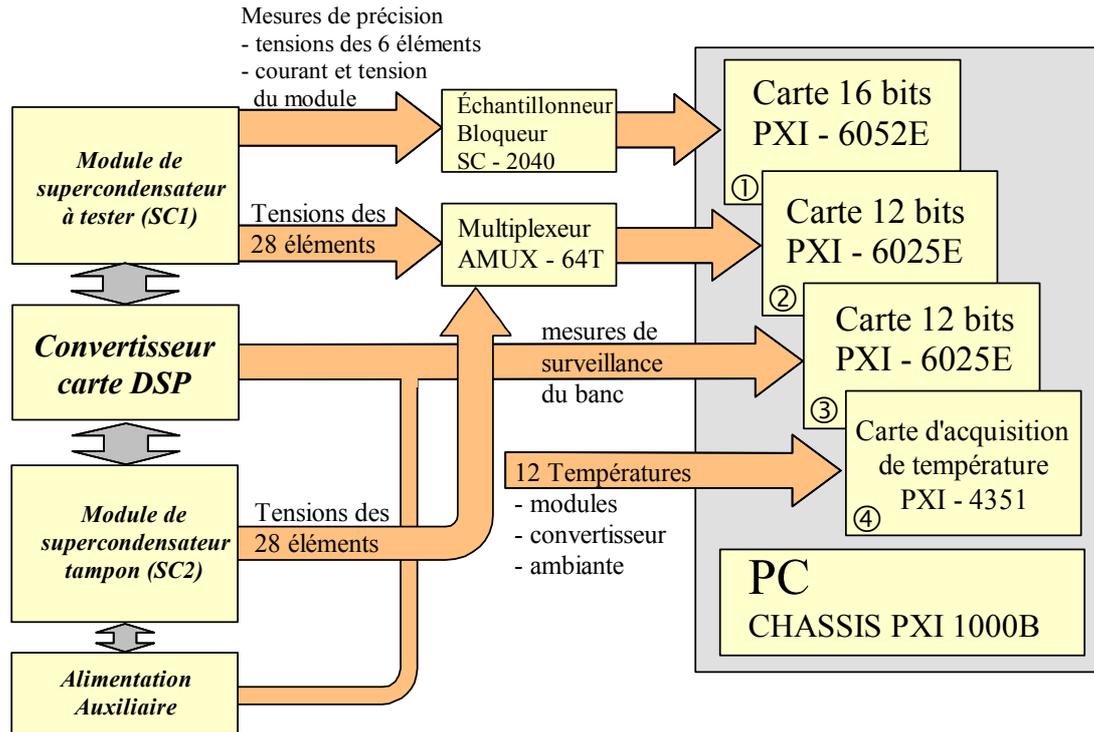


Fig. 3.8. : Acquisition des données

La carte PXI 6052 E (carte 1) est une carte d'acquisition précise (16 bits) dédiée à la mesure de la tension du module testé, de son courant et de 6 tensions élémentaires. Il est ainsi possible, avec ces acquisitions, de caractériser un élément isolé, et de ce fait, observer les dispersions des caractéristiques des éléments en cyclage.

Les cartes PXI 6025E (carte 2 et 3) ont une précision de 12 bits. Elles contrôlent en permanence un certain nombre de données qui doivent pouvoir être accessibles durant les phases d'acquisition. Ces mesures ne sont utilisées que pour la visualisation et le contrôle. La première carte assure la mesure des courants et tensions de chaque module, des courants dans l'inductance et dans l'alimentation auxiliaire. La seconde, associée à un multiplexeur, permet de mesurer toutes les tensions élémentaires des deux modules de supercondensateurs.

La carte PXI 4351 (carte 4) est une carte lente dédiée à la mesure des températures (constantes de temps thermiques de l'ordre de la trentaine de minutes). Des sondes de température sont placées dans le module testé. Il est possible d'avoir ainsi une cartographie des températures du module avec 9 sondes réparties comme indiqué sur la figure 3.9.. Ces sondes sont placées sur les connections reliant deux éléments. Les 16 éléments grisés sur la figure de gauche sont ceux pour lesquels une information de température est disponible. On procède également à une mesure sur le module tampon et à des mesures destinées à la surveillance, à savoir au niveau des radiateurs du convertisseur et dans la baie. Les 16 voies de la carte ne sont pas toutes utilisées, il est donc possible de faire évoluer la configuration du dispositif.

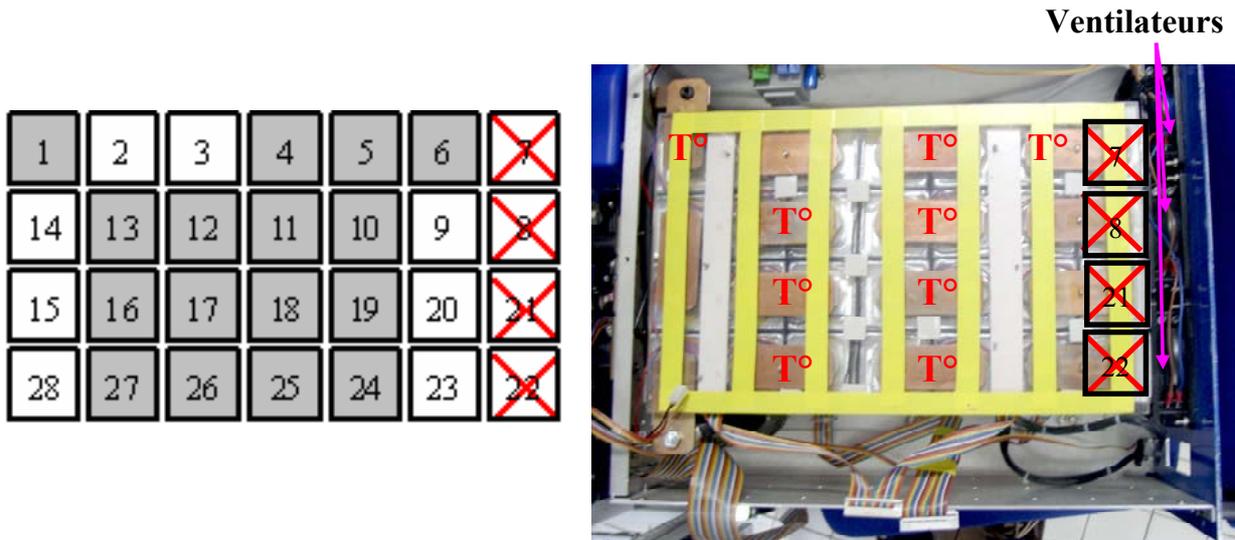


Fig. 3.9. : Position des capteurs de température sur le module testé

### III.1.3.2. Communication entre la centrale et le matériel

Le banc intègre, en plus de la partie acquisition de données, les fonctions de commande du convertisseur de puissance, de l'alimentation auxiliaire et de détection des défauts. Pour cela, certaines sorties analogiques et ports d'entrées/sorties numériques des cartes sont utilisés [C3-2]. Le synoptique de la partie communication et gestion du banc est présenté en figure 3.10..

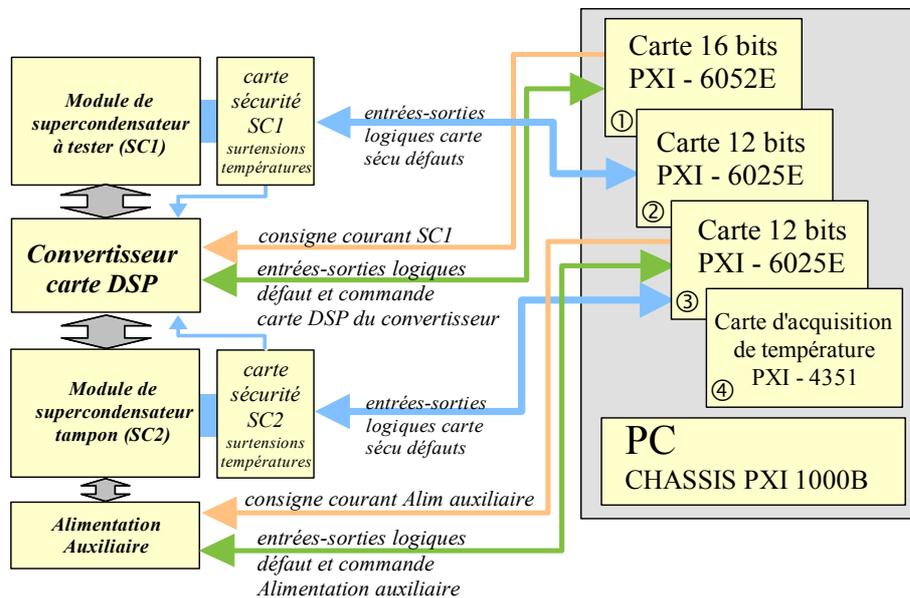


Fig. 3.10. : Synoptique de la partie communication et gestion du banc

Les fonctions principales sont :

#### La commande du convertisseur de puissance :

Une des sorties analogiques est utilisée pour donner la consigne en courant au convertisseur, celle-ci est variable de -400 à 400 A.

#### L'alimentation auxiliaire :

Une sortie analogique est nécessaire pour donner la consigne de courant de l'alimentation auxiliaire. Cette consigne est variable de  $-10$  à  $20$  A.

#### Les cartes de sécurité des deux modules de supercondensateurs :

Ces cartes génèrent, en cas de défaut, un signal et permettent également, en association avec la centrale d'acquisition, de le localiser. Ces défauts peuvent concerner la tension d'un supercondensateur qui ne doit pas excéder  $2.4V$ , ainsi que la température des électrodes qui doit rester inférieure à  $60^{\circ}C$ .

### III.1.4. Principe du cyclage

Afin de tester le comportement des supercondensateurs durant de longues périodes, il faut que la méthode de cyclage retenue permette d'obtenir une charge et décharge du module testé parfaitement périodiques. La méthode dite « classique » utilisant des cycles de durée de charge et de décharge identiques n'est pas adaptée pour des problèmes d'imperfection de fonctionnement. Ceci est montré en figure 3.11. ; la réponse temporelle du module diverge et la tension à la fin de chaque cycle diminue régulièrement.

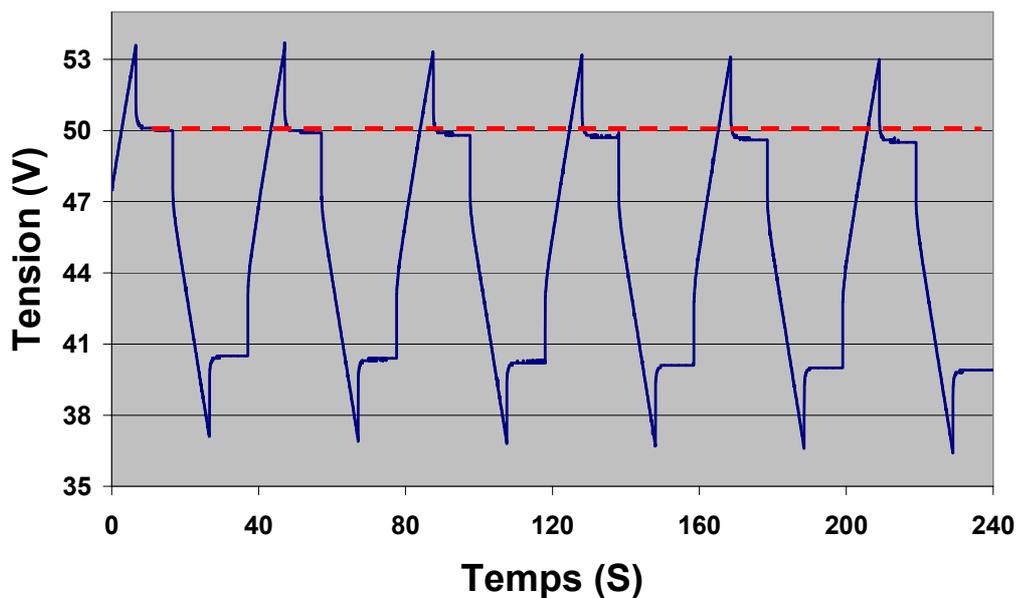


Fig. 3.11. : Méthode classique de cyclage

Pour résoudre ce problème, un cycle dit « contrôlé » est utilisé pour obtenir des réponses périodiques (figure 3.12. ). Cette méthode est basée sur deux conditions:

- ↪ La durée de la phase de décharge est constante.
- ↪ La phase de charge est arrêtée à une tension maximale choisie ( $48V$  dans notre cas).

Avec ces deux conditions, et après un régime transitoire de deux ou trois cycles un régime permanent est obtenu avec des réponses temporelles périodiques.

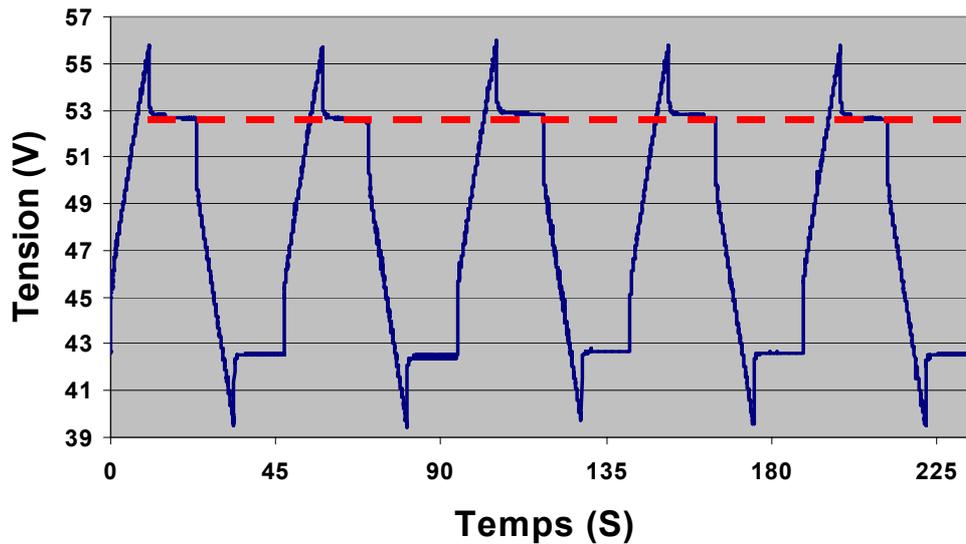


Fig. 3.12. : Réponses périodiques avec des cycles contrôlés

### III.2. Fonctionnement du banc en cyclage

Pour réussir à obtenir le type de cyclage présenté précédemment avec un fonctionnement du banc de test qui soit sûr et adapté à notre besoin, différentes actions ou fonctions sont à mettre en place :

- ✓ Initialisation du banc d'essai (matériel et tension initiale des deux modules).
- ✓ Gestion de la compensation des pertes du banc grâce à l'alimentation auxiliaire afin d'obtenir des cycles périodiques.
- ✓ Sauvegarde des acquisitions du module testé de façon périodique au cours du cyclage. (courant et tension du module testé, tensions de 6 éléments).
- ✓ Injection d'harmoniques de façon régulière au cours du cyclage pour la caractérisation fréquentielle.

Le synoptique global du dispositif est décrit dans l'arbre programmatique de la figure 3.13..

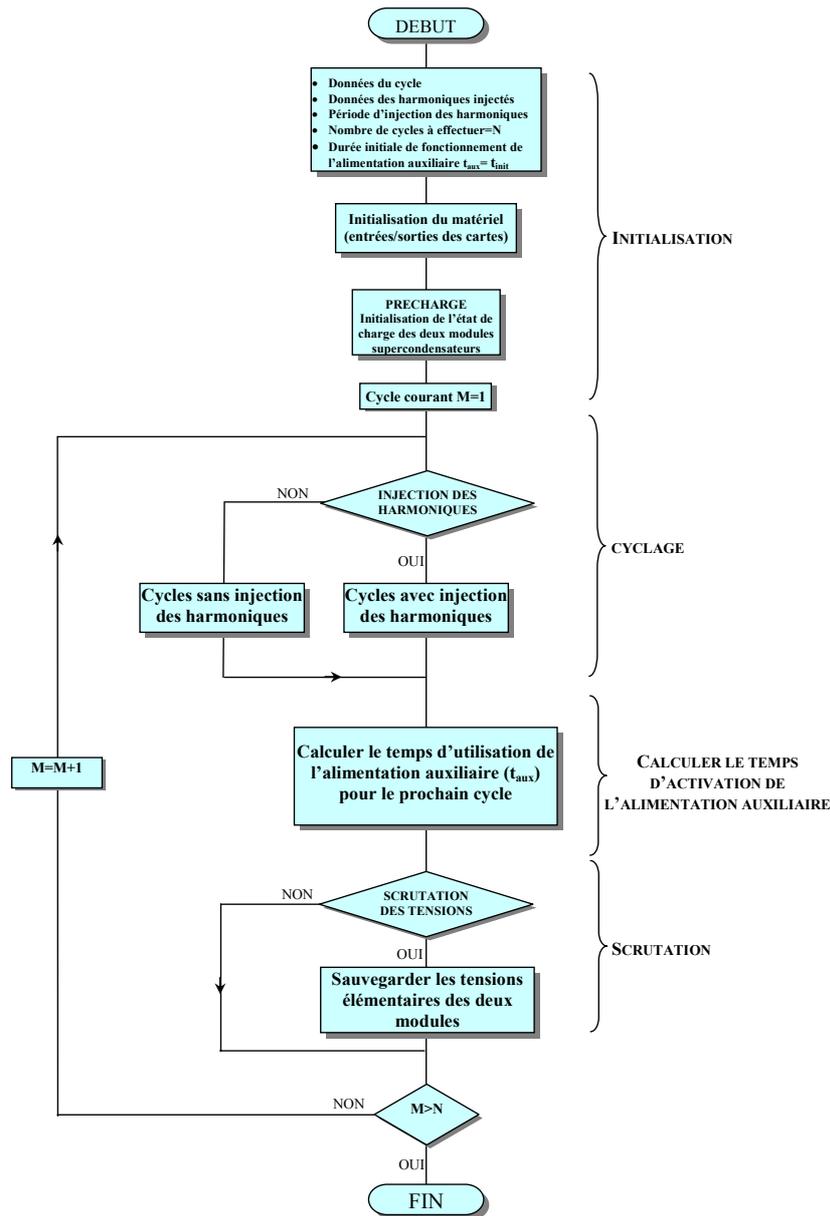


Fig. 3.13. : Arbre programmatique du fonctionnement global

### III.2.1. Initialisation du matériel et de la tension des deux modules

Avant de commencer le cyclage, il faut tout d'abord initialiser les différentes sorties (numériques et analogiques) des cartes en imposant des valeurs adaptées lors du démarrage et également initialiser les différents systèmes du banc. La deuxième partie de l'initialisation concerne les niveaux d'énergie des deux modules supercondensateurs, qui doivent être au démarrage des cycles, à l'état désiré.

### III.2.2. Cyclage et acquisitions

Le bloc « cyclage avec ou sans injection des harmoniques » reprend le fonctionnement du mode cyclage décrit dans les paragraphes (II.2.4) et (III.1.4), c'est à dire la génération des courants de consigne du convertisseur de puissance. Les acquisitions du courant et de la

tension du module testé, ainsi que de la tension de 6 éléments échantillons (éléments 1, 6, 12, 17, 19, et 24) sont faites avec la carte n°1 (6052E) à une fréquence de 1kHz.

### III.2.3. Gestion de l'alimentation auxiliaire

L'alimentation auxiliaire est capable de fournir un courant compris entre +20A et -10A. Elle fonctionne ici avec deux niveaux d'alimentation en courant qui sont 0 et 20A. Afin d'assurer la périodicité parfaite des cycles, l'alimentation auxiliaire doit être contrôlée de façon à compenser exactement l'énergie perdue à chaque cycle par les éléments de stockage. Plusieurs méthodes de contrôle ont été testées pour cette alimentation. La méthode la plus efficace, compte tenu des limitations de la programmation avec LABVIEW, consiste à utiliser un régulateur à effet proportionnel-intégral échantillonné afin de garder la tension du module tampon constante à la fin de chaque cycle. Ceci est obtenu par estimation de la durée de charge nécessaire pour atteindre la tension finale choisie pour le cycle utilisé (tension maximale du module tampon : 56V). Avec cette valeur de charge, on agit sur le temps de fonctionnement de l'alimentation auxiliaire au cours d'un cycle. Ainsi, à chaque cycle, on détermine le temps qu'il faut ajouter au temps précédent afin d'atteindre la tension finale choisie.

### III.2.4. Scrutation

La partie « scrutation » permet de mesurer la tension de tous les éléments par l'intermédiaire de la carte n°2 (6025E) et d'un multiplexeur. Ces mesures permettent de connaître la dispersion de tension des éléments du module testé lors du cyclage. Cette scrutation est réalisée de façon régulière afin de suivre l'évolution du comportement du module en fonction du nombre de cycles.

### III.2.5. Gestion des défauts

L'ensemble des défauts est centralisé sur la carte de commande du convertisseur de puissance de manière à pouvoir stopper instantanément le transit de puissance même en cas de défaillance de la partie programme. L'information défaut est ensuite transmise à la centrale d'acquisition par l'intermédiaire de 4 bits numériques. En cas de défaut, la centrale doit donc décoder les 4 bits, reconnaître le défaut et le traiter. On peut ainsi analyser le défaut a posteriori, les défauts étant répertoriés dans un fichier d'historique. Le banc peut ensuite, si le type défaut le permet, redémarrer automatiquement avec la procédure adéquate.

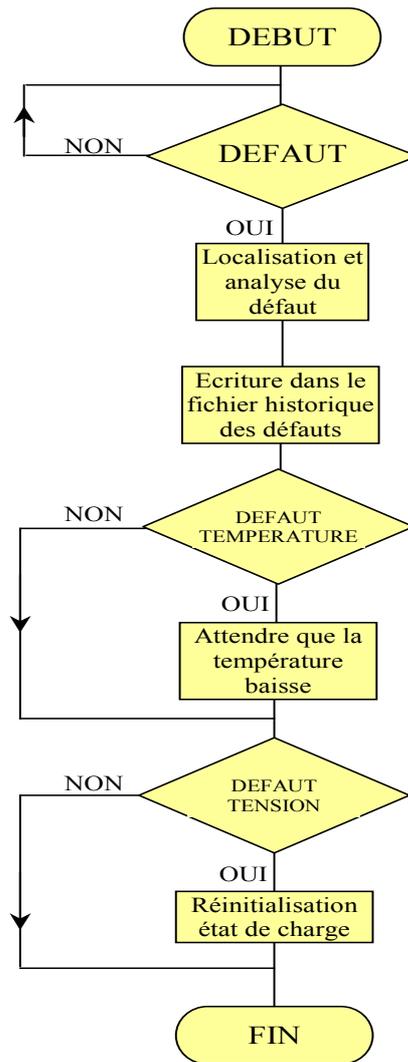


Fig. 3.14. : Arbre programmatique de la gestion des défauts

### III.2.6. Contrôle de la température des éléments

Afin de contrôler la température de certains éléments du module testé, on agit sur l'alimentation des ventilateurs de refroidissement à l'aide d'un relais activé par un bit de commande des cartes. Ce contrôle, bien que rudimentaire, permet d'agir sur la température du module. Trois modes de fonctionnement peuvent être envisagés :

- ↳ **Système ventilé en permanence** : ceci permet d'augmenter la constante de temps thermique des éléments supercondensateurs. Ce fonctionnement est utilisé pour déterminer la caractéristique thermique des éléments supercondensateurs. En effet, ce mode de fonctionnement permet une montée en température plus lente et donc l'obtention de plus de points de mesure. Par contre, la montée en température ne peut s'obtenir que par des cycles créant beaucoup de pertes ou lorsque la température ambiante est élevée.

- ↪ **Système non ventilé** : la désactivation des ventilateurs permet d'accentuer les contraintes thermiques sur les éléments supercondensateurs. Ce procédé sera utilisé dans les cyclages de caractérisation qui utilisent des courants de valeur réduite.
- ↪ **Contrôle de la température de certains éléments** : Selon la température mesurée, il est possible d'activer ou désactiver l'alimentation des ventilateurs. Cette technique permet de contrôler la température d'un élément supercondensateur et également de réduire les fluctuations de température du module en cas de changement de cycle ou de température ambiante. On peut ainsi, obtenir une relative homogénéité au niveau des conditions thermiques lors des essais.

### III.2.7. Fonctionnement global du programme : exemple de cycle

Les cycles doivent être définis à partir de paramètres qui sont :

- les tensions initiales des deux modules
- le temps initial de fonctionnement de l'alimentation auxiliaire
- la durée de la phase de décharge
- l'amplitude du courant pour chaque phase (charge/décharge)
- la période des cycles
- les cadences des acquisitions

La figure 3.15. montre la face avant du programme principal développé sous LABVIEW.

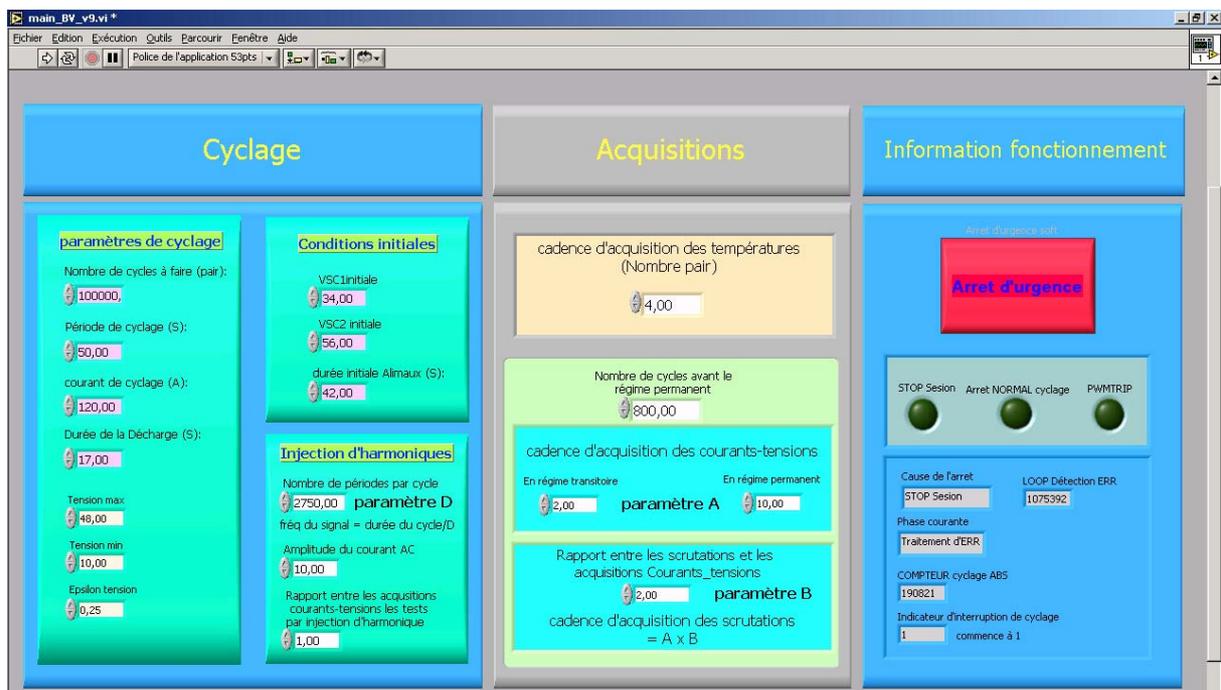


Fig. 3.15. : Face avant du programme développé sous LABVIEW

A l'exécution de ce programme, la phase d'initialisation est lancée, suivie de l'exécution du cyclage. On peut alors suivre l'évolution du courant et de la tension du module testé ainsi que l'évolution de la température des différents points cités dans la partie (II.2.2.4). Les figures 3.16. et 3.17. montrent les faces-avant qui présentent les formes d'onde du courant et de la tension du module ainsi que l'évolution de la température de certains éléments du module testé [C3-3].

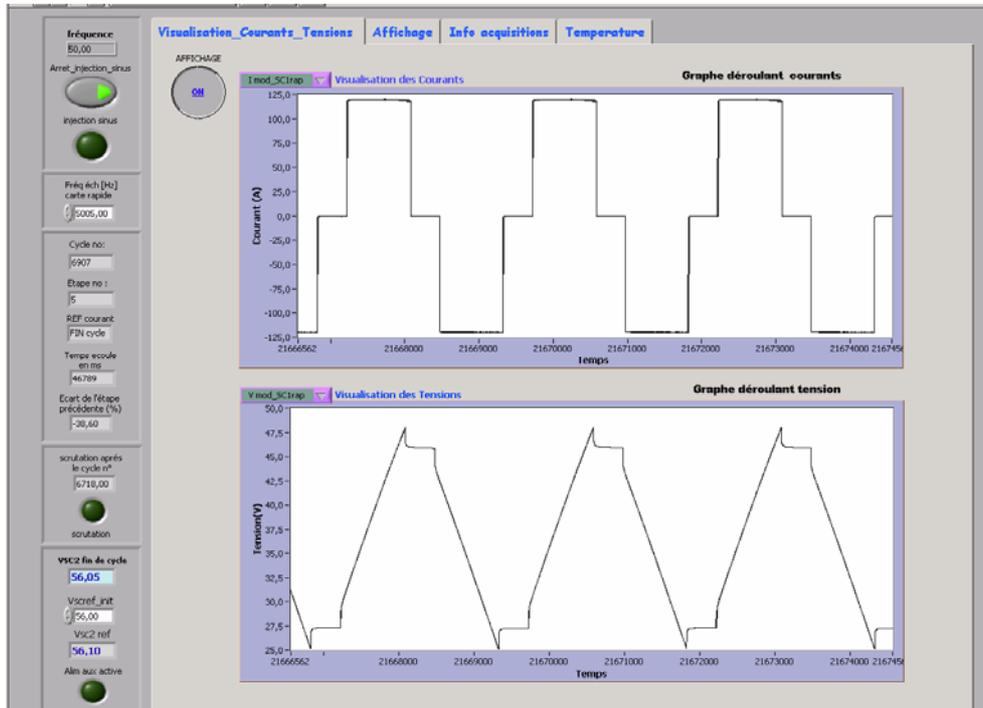


Fig. 3.16. : Courant et tension du module testé

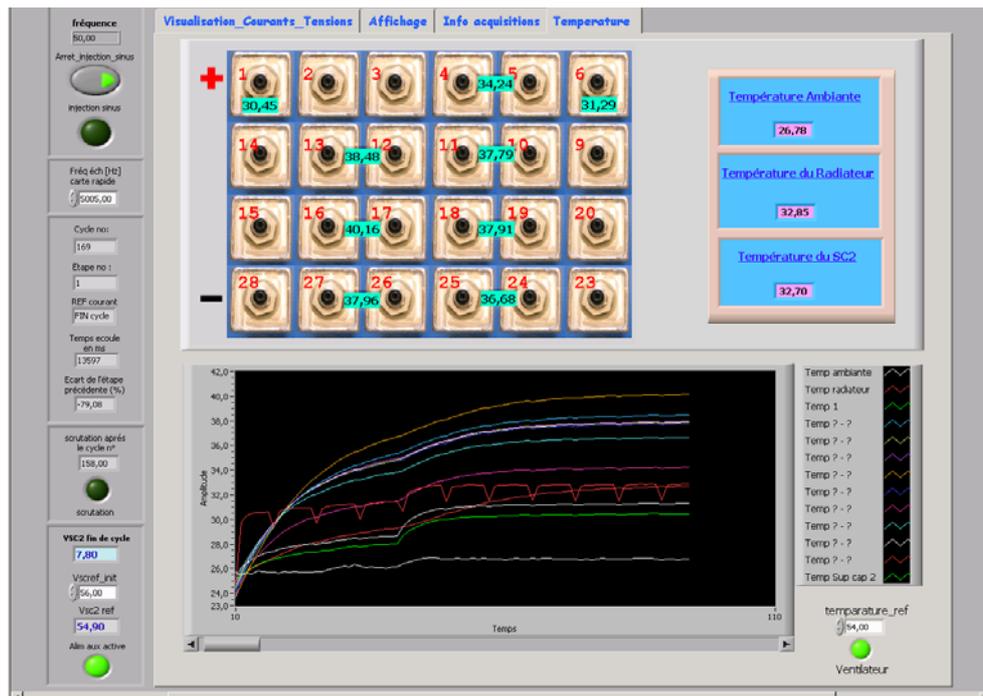


Fig. 3.17. : Evolution des températures

### III.3. Limites du banc et modèle

Le banc présente certaines caractéristiques limitant physiquement ses performances. En effet, il faut être capable d'assurer un cycle charge/décharge, celui-ci étant principalement lié à des aspects énergétiques et à la limitation en courant du banc. Cette partie montre cet aspect et présente le modèle développé à cet effet. Le modèle ainsi développé permet de déterminer la faisabilité du cycle et les conditions initiales de charge des modules nécessaires au démarrage.

#### III.3.1. Les pertes du banc

Compte tenu des faibles niveaux de tension, et des courants élevés apparaissant dans le montage, les pertes doivent être correctement évaluées afin de définir précisément les limites de fonctionnement du banc.

Plusieurs sources de pertes peuvent être distinguées :

- les pertes dans les supercondensateurs
- les pertes dans les câbles
- les pertes au sein du convertisseur
- les pertes dans les éléments passifs

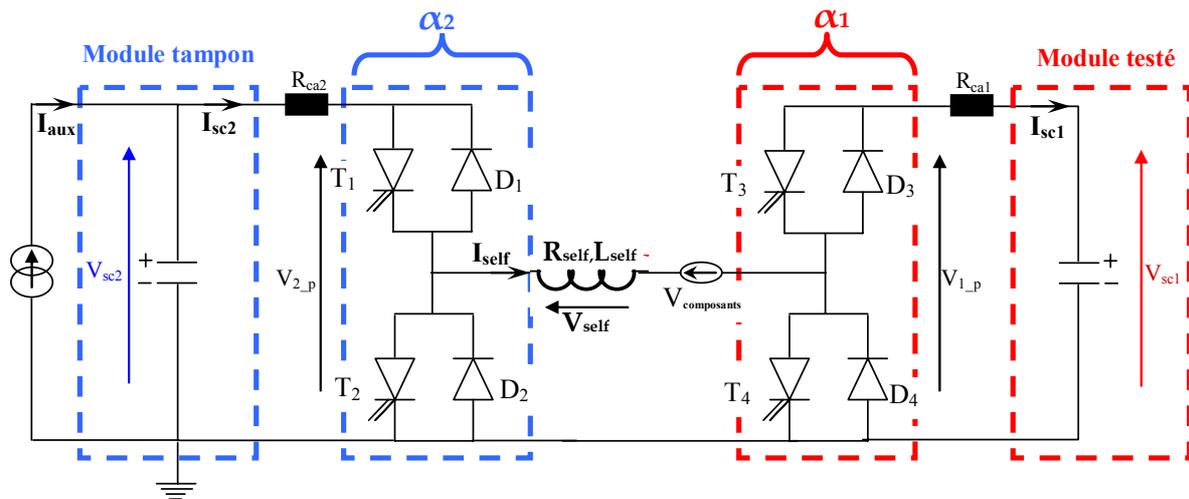


Fig. 3.18. : Schéma utilisé pour l'étude des limites du banc

En ce qui concerne les supercondensateurs, l'estimation de leurs pertes est obtenue grâce à leurs modèles. De même, les résistances des câbles de connexion au convertisseur ont été mesurées. Enfin, les pertes liées au convertisseur comprennent celles des semi-conducteurs (conduction/commutation), celles liées aux connexions à l'intérieur du convertisseur et enfin celles de l'inductance. Ces pertes globales ont été évaluées en mesurant les tensions convertisseur ( $V_{1,p}$ ,  $V_{2,p}$ ) et les courants des deux modules supercondensateurs en fonctionnement. A partir des mesures effectuées, il a été constaté que le paramètre le plus influent sur les pertes était le courant dans l'inductance. L'évolution de ces pertes est présentée en figure 3.19. en fonction du courant dans l'inductance. Nous pouvons exprimer ces pertes par une expression utilisant une fonction polynomiale de la forme :

$$P_{\text{conv}} = \Delta V_{\text{conv}}(i_{\text{self}}) \cdot i_{\text{self}} \quad (\text{III-3})$$

Avec  $\Delta V_{\text{conv}}(I_{\text{self}})$  : fonction polynomiale exprimant le chute de tension estimée provoquée par le convertisseur.

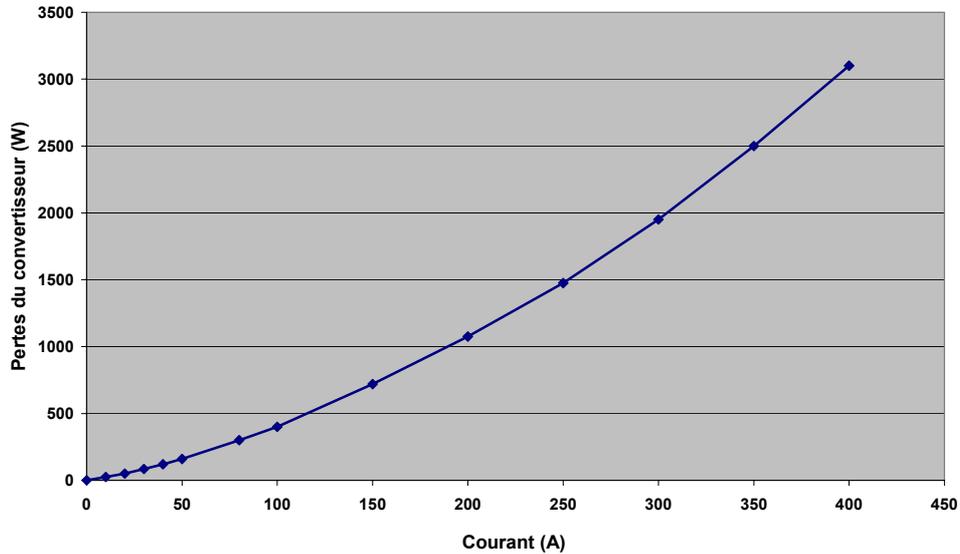
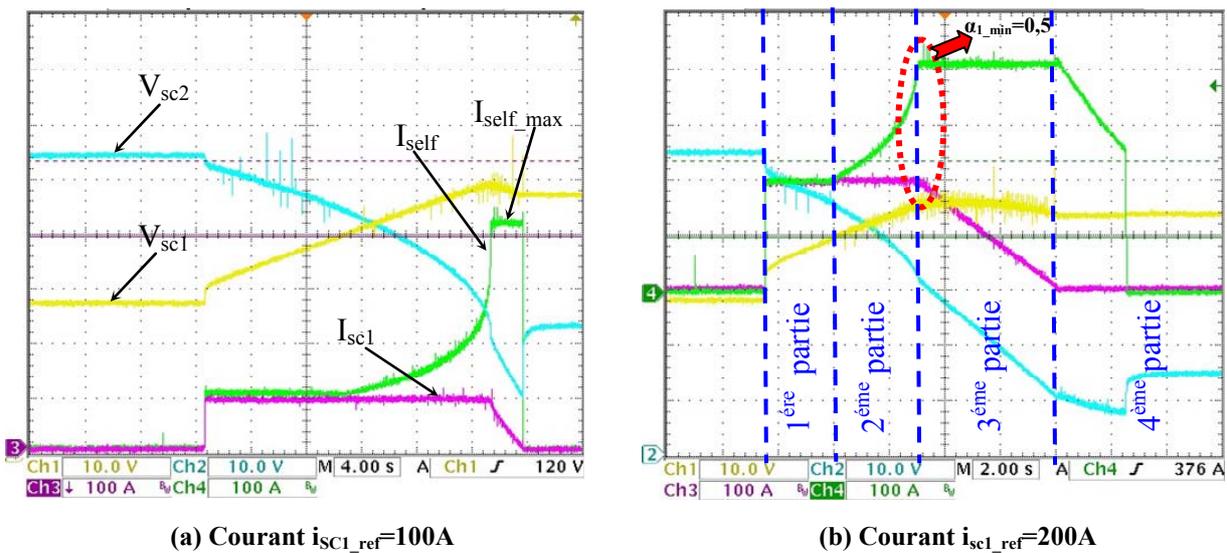


Fig. 3.19 : Perte du convertisseur en fonction du courant d'inductance

La figure 3.17 montre que les pertes du convertisseur augmentent avec le courant d'inductance et peuvent atteindre 3,1 kW pour 400A. Sachant que ce courant vaut  $i_{\text{self}} = \max(i_{\text{sc1}}, i_{\text{sc2}})$ , il est préférable de choisir un fonctionnement tel que  $i_{\text{self}} = i_{\text{sc1}}$  le plus longtemps possible, ce qui correspond à un fonctionnement maximisant les rapports cycliques des deux hacheurs.

### III.3.2. Phases de fonctionnement pour la charge du module testé



(a) Courant  $i_{\text{sc1\_ref}}=100\text{A}$

(b) Courant  $i_{\text{sc1\_ref}}=200\text{A}$

Fig. 3.20 : Stockage de l'énergie dans le module testé (SCI)

Les figures 3.20. a et b nous montrent la charge du module testé (SC1) pour deux valeurs de courant ( $I_{sc1} = 100A$  ou  $200A$ ). La réponse du système peut être divisée en quatre parties :

**Partie 1 :** cette phase se déroule avec  $i_{self}=i_{sc1}$ , soit  $\alpha_1=1$  ; les pertes Joule sont alors limitées.

**Partie 2 :** cette phase correspond à  $i_{self} = i_{sc2} > i_{sc1}$  ( $\alpha_2=1$ ). Les pertes croissent au sein du convertisseur jusqu'à ce que le courant de l'inductance atteigne la valeur de  $400A$ .

**Partie 3 :** Cette phase correspond au fonctionnement en saturation du convertisseur. Le courant de inductance a atteint sa valeur maximale et le convertisseur ne peut plus imposer le courant de référence  $i_{sc1}$ .

**Partie 4 :** Les pertes sont dans ce cas trop importantes pour que la charge du module testé puisse continuer. Ce qui est extrait du module tampon est intégralement perdu. Il faut alors interrompre le transit.

En conclusion, le système a des limites physiques correspondant à sa structure. Ses limites sont principalement liées à la grande plage de variation des tensions du module qui implique l'élévation du courant de l'inductance, l'augmentation des pertes et la saturation du système.

### III.3.3. Prédétermination des durées limites de charge

Pour évaluer les limites temporelles de charge du module, il suffit dans un premier temps de le modéliser et de déterminer les durées des phases 1 et 2. Dans cette partie, on utilise pour les supercondensateurs le modèle constructeur. Les données suivantes sont prises en compte :

$R_{sc1}=24m\Omega$ ,  $R_{sc2}=28m\Omega$ ,  $C_{sc1}=113F$ ,  $C_{sc2}=100F$ ,  $I_{self\_max}= 400A$ ,  $R_{self}=12 m\Omega$   $R_{ca1}=3m\Omega$ ,  $R_{ca2}=3m\Omega$ .

Avec  $R_{ca1}$ : résistance du câble qui relie le module testé au convertisseur.

$R_{ca2}$ : résistance du câble qui relie le module tampon au convertisseur.

Pour vérifier si la phase de charge que nous voulons effectuer est applicable avec ce banc ou non, nous devons calculer le temps nécessaire pour la charge avec le courant choisi.

$$t_{stockage} = \frac{C_{sc1}}{I_{sc1}} (V_{sc1} - V_{sc1\_0}).$$

Avec  $V_{sc1}$  : tension module testé après la charge -  $V_{sc1\_0}$ : la tension avant la charge.

De plus, la durée de la phase 1 ( $t_1$ ) durant laquelle le convertisseur fonctionne en élévateur de courant, ainsi que la durée de la phase 2 ( $t_2$ ) durant laquelle le convertisseur fonctionne en élévateur de tension sont calculées grâce à un modèle développé sous MATLAB-SIMULINK. En comparant la somme de ces deux temps avec le temps nécessaire pour la charge  $t_{stockage}$ , on en déduit la faisabilité du cycle.

$$\begin{cases} t_1 + t_2 > t_{stockage} \\ t_1 + t_2 \leq t_{stockage} \end{cases} \Rightarrow \begin{matrix} \text{essai} & \text{non} & \text{applicable} \\ \text{essai} & & \text{applicable} \end{matrix} \quad \text{(III-4)}$$

### III.3.3.1. Phase 1 (calcul de $t_1$ )

$$\begin{cases} V_{2\_p} \cdot \alpha_2 = V_{self} + V_{1\_p} \cdot \alpha_1 \\ \frac{I_{sc1}}{\alpha_1} = \frac{I_{sc2\_p}}{\alpha_2} = I_{self} \end{cases} \quad (III-5)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \text{phase (1)} \Rightarrow \alpha_1 = 1 \\ I_{sc2\_p} = I_{sc2} + I_{aux} \\ V_{2\_p} = V_{sc2} + V_{ca2} \\ V_{1\_p} = V_{sc1} + V_{ca1} \\ \Delta V_{conv}(I_{self}) = V_{self}(I_{self}) + V_{composants}(I_{self}) \end{cases} \quad (III-6)$$

A la fin de cette phase  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ . En remplaçant ces valeurs dans les équations (III-5) on trouve :

$$V_{2\_0} - (I_{sc1} - I_{aux}) \left( \frac{1}{C_{sc2}} t_1 + (R_{sc2} + R_{ca2}) \right) = \Delta V_{conv}(I_{sc1}) + \left( \frac{1}{C_{sc1}} t_1 + (R_{sc1} + R_{ca1}) \right) I_{sc1} + V_{1\_0} \quad (III-7)$$

De cette équation nous pouvons tirer la durée de la première phase :

$$t_1 = \frac{V_{sc2\_0} - V_{sc1\_0} - \Delta V_{conv}(I_{sc1}) - (I_{sc1} - I_{aux})(R_{sc2} + R_{ca2}) - (R_{sc2} + R_{ca2})I_{sc1}}{\left( (I_{sc1} - I_{aux}) \frac{1}{C_{sc2}} + \frac{1}{C_{sc1}} I_{sc1} \right)} \quad (III-8)$$

Cette formule nous donne le temps  $t_1$  en fonction de  $V_{sc2\_0}$ ,  $V_{sc1\_0}$ ,  $I_{sc1}$  et  $I_{aux}$ . On remarque que les chutes de tensions liées aux pertes jouent un rôle primordial dans cette phase. En effet, la chute de tension équivalente provoquant les pertes pour un courant de 100A est de 11V. La différence entre les deux tensions initiales des modules doit donc être supérieure à cette tension équivalente afin que le convertisseur puisse fonctionner en hacheur série (phase 1).

Les pertes peuvent bien sûr être réduites en diminuant le courant. Deux autres paramètres de poids peuvent influencer sur la durée de cette phase :

- la tension initiale du module tampon,
- le courant maximum admissible par l'alimentation auxiliaire.

### III.3.3.2. Phase 2 (calcul de $t_2$ )

Durant la phase 2, le courant du module tampon ainsi que celui de l'inductance croissent de façon exponentielle, ce qui influe sur le niveau de pertes et par conséquent sur l'augmentation de la demande de puissance. Le module tampon se décharge alors rapidement. Durant cette phase  $\alpha_2 = 1$  et  $I_{self} = I_{sc2\_p}$ . En utilisant l'équation (III-5) avec les conditions initiales suivantes :

$$\begin{cases} V_{2\_f} : \text{tension du module tampon à la fin de la phase 1 (calculée avec le modèle)} \\ V_{1\_f} : \text{tension du module testé en à la fin de la phase 1 (calculée avec le modèle)} \end{cases}$$

$$t_2 = \frac{V_{sc2\_0} - \frac{V_{sc1\_0} \cdot I_{sc1}}{I_{self\_max}} - \Delta V_{conv}(I_{self\_max}) - (I_{self\_max} - I_{aux})(R_{sc2} + R_{ca2}) - \frac{(R_{sc1} + R_{ca1})I_{sc1}^2}{I_{self\_max}}}{\left( \frac{(I_{self\_max} - I_{aux})}{C_{sc2}} + \frac{I_{sc1}^2}{C_{sc1} \cdot I_{self\_max}} \right)} \quad (III-9)$$

Les relations 8 et 9 implantées sous Matlab Simulink permettent de déterminer les durées t1 et t2 (figure 3.20).

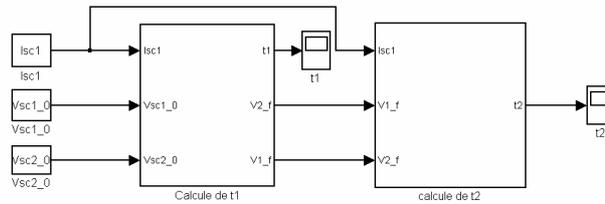


Fig. 3.21. : prédétermination de t1 et t2

### III.3.4. Modèle du banc

Avant de commencer un essai de cyclage, la faisabilité des cycles doit être testée. La partie précédente a présenté une première condition de fonctionnement. Afin d'introduire l'ensemble des contraintes, il est nécessaire d'utiliser un modèle plus fin. Ce modèle nous aide à choisir les cycles et prévoir la réponse du banc avec un temps de simulation très court par rapport au temps réel des cycles (30 fois plus rapide). Ceci évite des pertes de temps importantes lors des expérimentations (préparation d'essais...). Il permet par ailleurs de tester les différents modèles de supercondensateur avec l'environnement simulé du banc. Ce modèle pourra par la suite être utilisé pour l'aide au dimensionnement énergétique des futurs modules testés.

Le synoptique du modèle développé est le suivant :

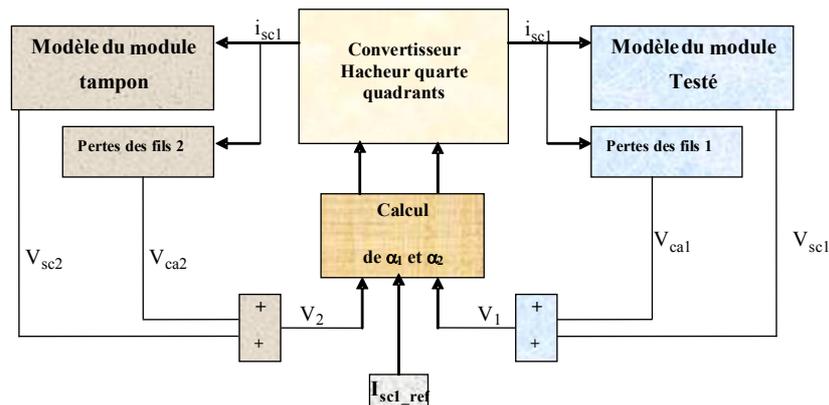


Fig. 3.22. : Synoptique du modèle du banc d'essais

Les supercondensateurs ont ici été modélisés avec le modèle à constantes localisées de la ligne de transmission présentée dans la partie (I.5) du premier chapitre (avec 10 branches R-C non-linéaires).

La figure 3.23 nous montre une comparaison entre les résultats donnés par le banc et ceux du modèle simulé, pour un courant de 100A.

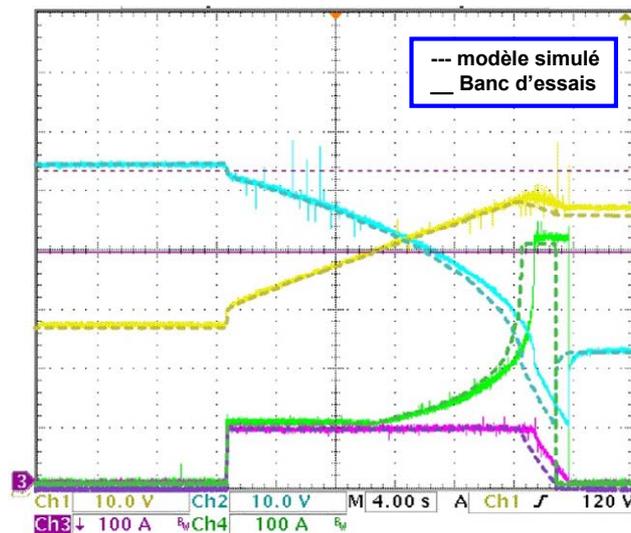


Fig. 3.23. : Validité du modèle simulé

La figure 3.23 montre un petit décalage entre les réponses expérimentale et simulée. Ce décalage est dû au léger surdimensionnement des pertes du modèle et nous laisse une marge de sécurité. Du point de vue rapidité de simulation, une simulation de 10 minutes de fonctionnement du banc (convertisseur + alimentation auxiliaire + modules supercondensateurs) est achevée en 20 secondes sur un PC standard.

### III.3.5. Amélioration des performances de cyclage du banc

A cause des limitation du banc en puissance de transit, l'augmentation de l'intensité du courant des cycles provoque une diminution de la profondeur de décharge. D'après les formules de  $t_1$  et  $t_2$ , l'amélioration de la profondeur de décharge passe par :

- ↳ L'augmentation de la différence entre les tensions initiales des deux modules (testé et tampon).
- ↳ L'augmentation de l'intensité maximale du courant fourni par l'alimentation auxiliaire.
- ↳ La diminution des pertes dont le paramètre le plus influent reste la réduction de la résistance de l'inductance du convertisseur.

A l'origine les deux modules regroupaient 28 éléments chacun. La mise en évidence des limitations du banc nous a conduit à réduire le nombre d'éléments du module testé à 24 éléments au lieu 28.

Le poids des 3 facteurs cités précédemment vis à vis des pertes sur un cycle de fonctionnement peut être obtenu grâce au programme d'aide à l'optimisation basé sur l'utilisation des plans d'expériences SOPHEMIS développé au L2EP [C3-4, C3-5]. En l'utilisant en parallèle avec le modèle du banc développé sous Matlab-Simulink, on peut classer les trois paramètres suivant leur influence sur la profondeur de décharge pour un courant de charge/décharge constant.

Dans le cas présent les pertes du système sont estimées durant la phase de charge. La figure 3.24. montre l'effet d'une variation de 10% de chaque facteur sur les pertes du

système. Cette technique permet de classer le poids de chacun de ces facteurs par rapport à ce critère.

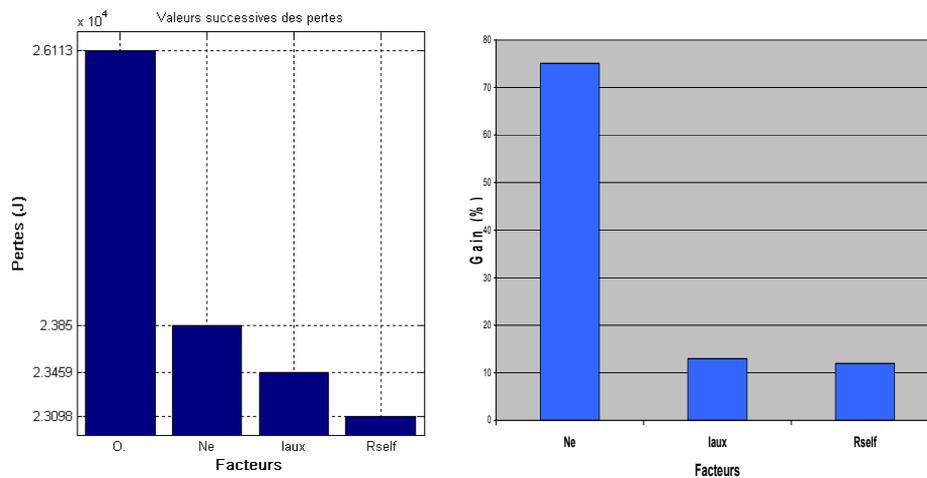


Fig. 3.24 : Les paramètres qui limitent la profondeur des cycles faites avec le banc d'essai

La figure 3.23 montre que le nombre d'éléments du module testé (Ne) (en gardant le nombre d'éléments du module tampon fixe) est le facteur le plus influent sur les pertes du système. Cette figure montre l'influence successive des 3 paramètres avec une variation de 10%. Ainsi avec des pertes initiales de 26kJ (courbe « O »), la réduction de 10% du nombre d'éléments apporte un gain de 2,26kJ (Ne), puis l'augmentation du courant de l'alimentation auxiliaire (Iaux) et la résistance de la self (Rself) apportent presque le même gain, avec seulement une réduction de 390J des pertes.

Après consultation avec des fabricant de self, un compromis a été trouvé entre la valeur de l'inductance et la résistance série. Cette résistance a été réduite à 5.5 m $\Omega$ .

La capacité de fourniture de puissance de l'alimentation auxiliaire à également été revue à la hausse. L'acquisition d'une nouvelle alimentation capable de délivrer un courant maximum de 45A va d'ici peut permettre d'effectuer des cycles encore plus contraignants.

### III.4. Rendement des supercondensateurs

La variation du rendement pour différents niveaux de courant et de courant efficace est étudiée sur des cycles commandés. En gardant toujours la même tension maximale de fin de cycle (48V), le temps de décharge ( $T_2$ ) est rendu variable pour différents niveaux de courant dans le module testé. La période des cycles reste constante (60s). La figure 3.25. montre l'allure des courants imposés au module.

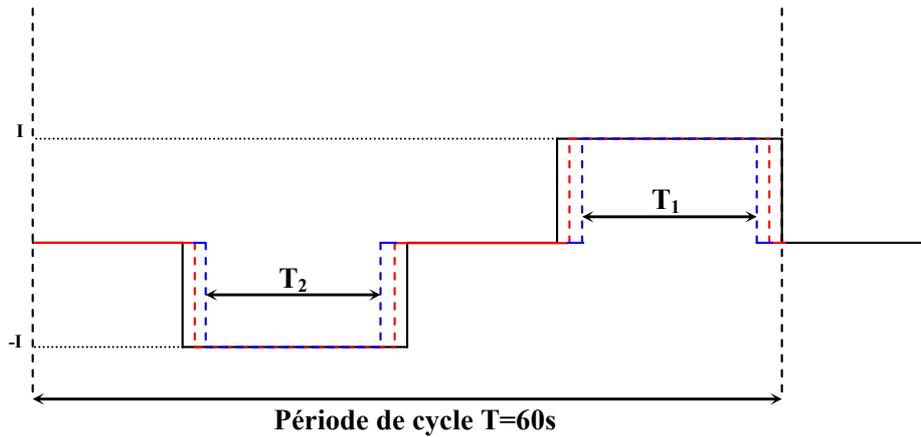


Fig. 3.25. : Cycles commandés effectués pour différents courants

La variation du rendement en fonction du courant de cyclage et du courant efficace est présentée sur la figure 3.25. en faisant le rapport des énergies fournies et reçues.

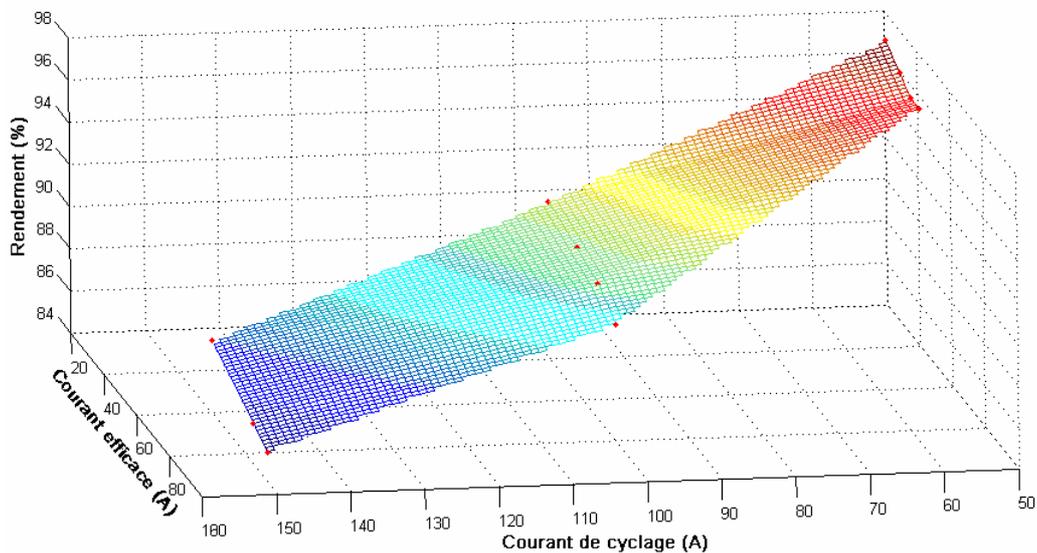


Fig. 3.26. : Variation du rendement en fonction du courant et de la puissance moyenne

Pour une même valeur du courant de cyclage, le rendement diminue lorsque le courant efficace augmente. Ceci paraît évident. Ce qui l'est moins c'est que pour un même courant efficace, le rendement diminue sensiblement lorsque le niveau du courant de cyclage augmente. La figure suivante nous montre la variation du rendement en fonction du courant efficace pour deux niveaux du courant de cyclage. La troisième courbe pour  $I=50A$  n'a pas pu être représentée pour des raisons de lisibilité de la figure.

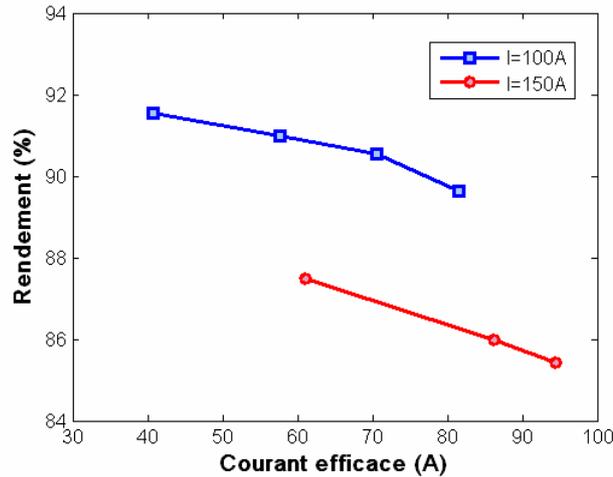


Fig. 3.27. : Variation du rendement en fonction du courant efficace

### III.4.1. Comparaison de l'expérimentation et du modèle énergétique simplifié.

Cette caractéristique nous a permis de vérifier que le modèle énergétique simplifié développé dans le chapitre précédent donnait de très bons résultats car comme le montre la figure 3.28., le calcul du rendement par le modèle énergétique donne une légère surestimation qui n'excède pas 0,6%.

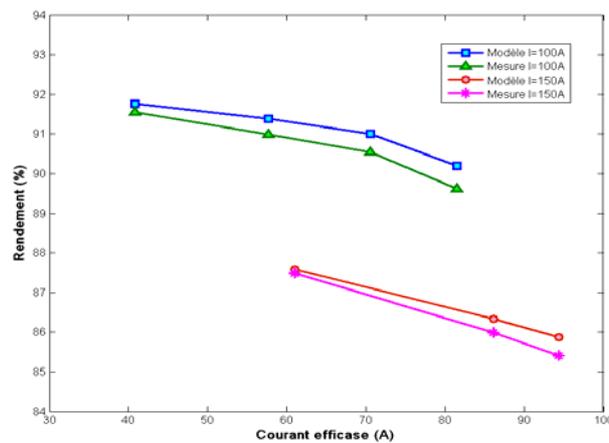


Fig. 3.28. : Comparaison du rendement mesuré avec le rendement estimé à l'aide du modèle énergétique simplifié

## III.5. Principe de caractérisation et cyclage du module

La caractérisation de plusieurs éléments du module supercondensateur est nécessaire pour observer et analyser leur processus de vieillissement. Cette caractérisation est liée directement aux modèles utilisés, ce qui incite à faire le choix d'un ou plusieurs modèles de base. Parmi ces modèles, on a choisi les deux modèles validés dans le deuxième chapitre, à savoir le modèle amélioré de la ligne de transmission et le modèle énergétique simplifié.

Deux types de cycles ont été imposés au module :

- des cycles de vieillissement
- des cycles de caractérisation

Les cycles de vieillissement permettent de reproduire les contraintes typiques des applications de puissance et de prévoir le comportement de ces composants dans diverses applications (stockage, lissage, freinage régénératif, etc...). Ce type de cycle peut être utilisé pour extraire certains paramètres des modèles du supercondensateur mais ne permet pas d'obtenir une information sur les caractéristiques pour les faibles tensions du module. La profondeur de décharge énergétique ne dépassant pas 80%, avec des cycles pour lesquels la tension du module varie entre la tension maximale (48V) et la moitié de cette tension (24V). La méthode de caractérisation obtenue avec ce type de cycle est donc incomplète.

Les cycles de caractérisation appliqués de façon régulière au cours du vieillissement permettent de connaître l'état des caractéristiques complètes du module à certaines périodes de leur vie. Les méthodes de caractérisation développées dans ce mémoire nous permettent de traiter les données de ces cycles et d'en extraire l'évolution de certaines caractéristiques des composants tout au long de leur période d'utilisation. Cependant, ce type de cycle n'est pas représentatif du fonctionnement typique d'un supercondensateur dans son environnement industriel.

Ces deux types de cycles sont donc complémentaires. Le premier permet de cycler le module et d'obtenir des informations sur l'évolution de certains paramètres du composant. Le second permet d'obtenir une caractérisation complète du composant mais de manière ponctuelle. Dans un premier temps, nous proposons de décrire les deux types de cycles. Ensuite une étude détaillée des caractéristiques obtenues avec les cycles de caractérisation est effectuée en prenant en compte la température des éléments. Enfin une troisième partie présente quelques résultats de caractérisation obtenus avec des cycles de vieillissement et les compare avec la méthode précédente qui est ici considérée comme la méthode de référence.

### **III.5.1. Cycle utilisé pour le vieillissement**

Les cycles de vieillissement sont utilisés en quasi-permanence pour solliciter le module testé comme il l'aurait été dans un environnement industriel. Ces cycles doivent également permettre de fournir un maximum d'informations nécessaires à la caractérisation. Il faut donc veiller à ce que le cycle appliqué ait un profil compatible avec ces deux contraintes. Les caractéristiques qui ont été définies prioritaires sont : la durée du cycle de l'ordre de la minute, la profondeur de décharge énergétique de 80% et enfin, des phases à courant nul doivent être présentes pour la caractérisation.

Les cycles qui sont appliqués pour l'instant ont une durée de 50 secondes. Quatre phases se succèdent:

- une phase de charge de 120A jusqu'à 48V,
- une phase à courant nul jusqu'à la fin de la demi période du cycle,
- une phase de décharge du module (-120A) pendant 17 secondes,
- une phase à courant nul jusqu'à la fin de la période.

Ces cycles peuvent évidemment évoluer en fonction du type d'application envisagée.

### III.5.2. Cycle utilisé pour la caractérisation

La mesure des capacités sur une grande gamme de tension exige l'utilisation de cycles particuliers faisant intervenir une contrainte sur la profondeur de la décharge qui doit être dans ce cas proche de 100%

Pour obtenir ce type de décharge, il est nécessaire d'utiliser un cycle avec un faible niveau de courant. Ces cycles doivent être effectués entre le niveau le plus bas d'énergie et le niveau le plus haut, donc entre une basse tension et la tension maximale de 48V.

Avec ces contraintes, la durée des cycles a été choisie égale à 150 secondes. Quatre phases se succèdent:

- une phase de charge de 70A jusqu'à 48V,
- une phase à courant nul jusqu'à la fin de la demi période du cycle,
- une phase de décharge du module (-70A) pendant 60 secondes,
- une phase à courant nul jusqu'à la fin de la période.

La figure 3.27 montre le cycle de caractérisation. Ce dernier pourra voir apparaître, en plus de ces signaux, des composantes harmoniques utilisées pour la caractérisation fréquentielle. En effet, un harmonique de 5A à 50Hz est ajouté au profil de courant décrit pour permettre la caractérisation fréquentielle des résistances du modèle type ligne de transmission.

*Le travail de caractérisation présenté dans cette partie est réalisé après 130.000 cycles réalisés avec le banc de test.*

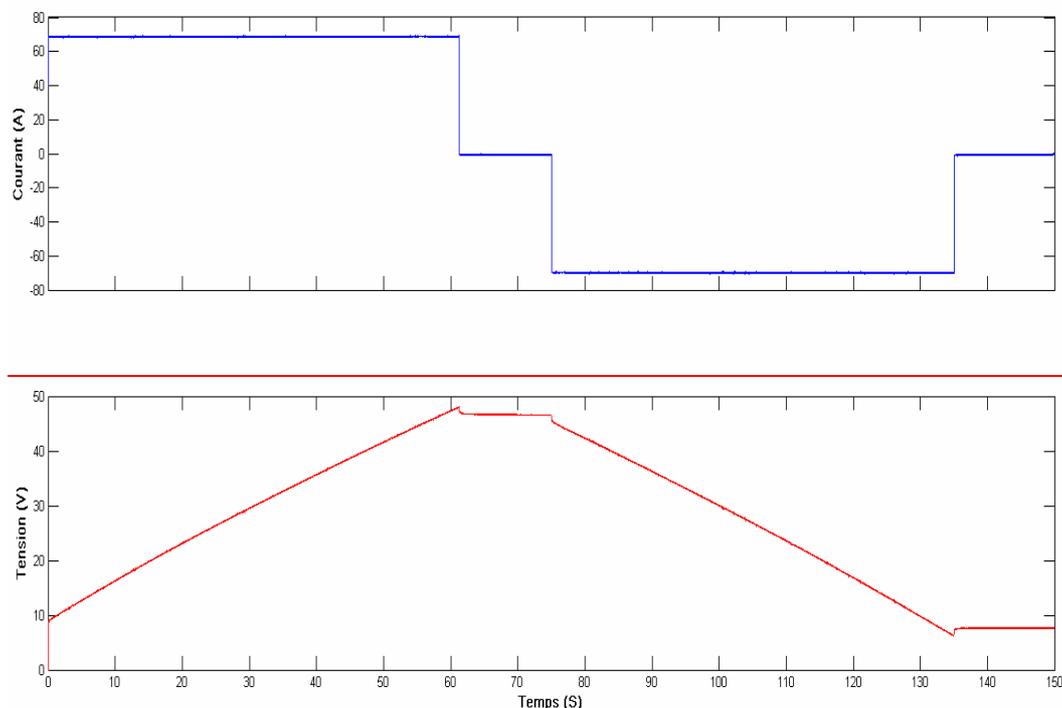


Fig. 3.29. : Cycle utilisé pour la caractérisation des supercondensateurs

La tension à la fin des cycles est de l'ordre de 7,5V et correspond à une très faible énergie stockée dans le module.

### III.5.3. Réponse thermique du module supercondensateur

L'un des paramètres qui influence considérablement le comportement de ces composants est la température [C3-6, C3-7, C3-8, C3-9, C3-10]. Mis à part le vieillissement des éléments supercondensateurs, l'échauffement induit également une variation des caractéristiques internes des éléments. La variation de la température d'un élément dépend directement du courant de cyclage et de la durée des phases charge/décharge.

#### III.5.3.1. Réponse thermique pour des cycles de vieillissement

Afin d'accélérer le vieillissement du module supercondensateur, il faut utiliser des cycles à forte intensité de courant avec des durées de cycle les plus courtes possibles ( $f=20\text{mHz}$ ). L'étude de l'évolution des caractéristiques internes des éléments supercondensateurs doit être faite pour les mêmes contraintes thermiques et les mêmes tensions. Afin de conserver la même température pour chaque élément durant toute sa durée de vie, le cyclage est réalisé en contrôlant la température (cf paragraphe III.2.6). La figure 3.30. montre l'évolution de la température des éléments en contrôlant celle des éléments les plus chauds du module (éléments 16-17). Dans cet exemple la température de ces deux éléments est maintenue à 50 °C. Sur la base de cette figure deux remarques peuvent être faites:

- ↪ La stabilité thermique des éléments est atteinte après presque 250 cycles.
- ↪ La température n'est pas homogène ; il y a une grande différence entre la température des éléments du centre du module et celle de ceux situés en périphérie.

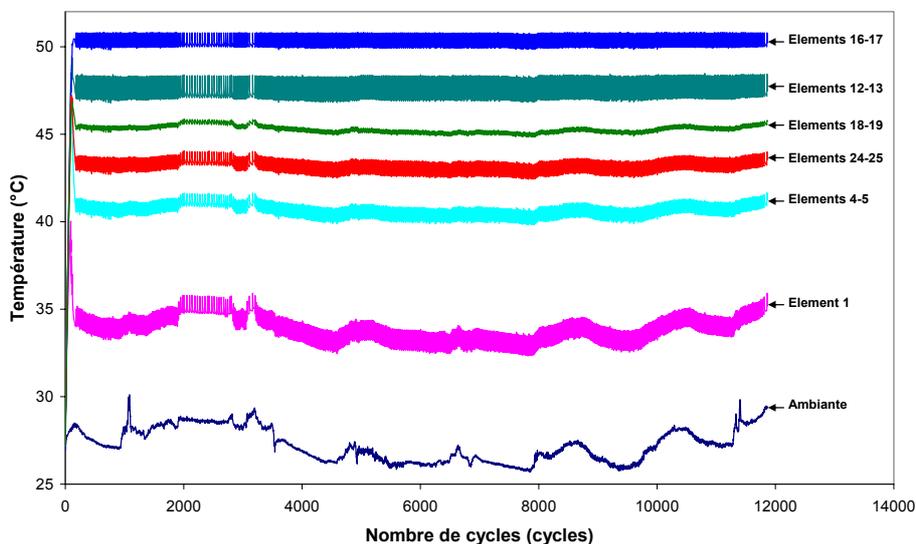


Fig. 3.30. : Contrôle de la température des deux éléments 16-17

La figure 3.30. montre que malgré la variation de la température ambiante, la température des deux éléments 16 et 17 reste presque constante (50°C), ce qui permet de minimiser l'influence de la température ambiante sur la température des autres éléments. Ces mesures montrent aussi que la température des éléments qui se situent aux extrémités (ex : éléments 1, 4, 5 ...) est plus sensible à l'évolution de la température ambiante.

Cette figure permet de classer les éléments caractérisés (éléments 1, 12, 17, 19) suivant les contraintes thermiques appliquées sur chacun.

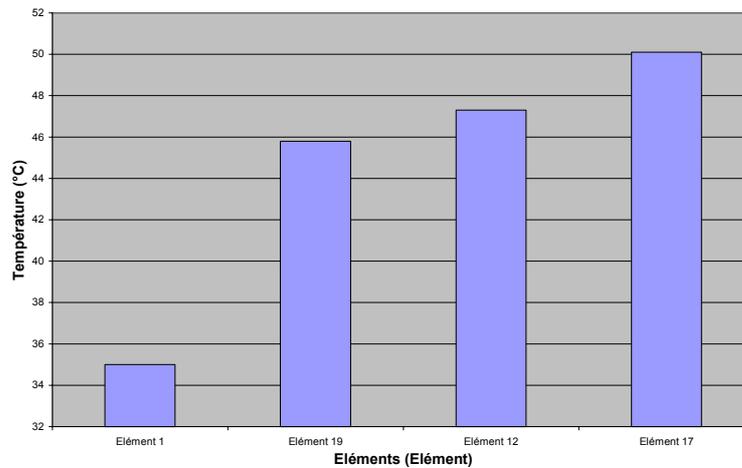


Fig. 3.31. : Classement des éléments caractérisés suivant les contraintes thermiques appliqués sur chacun pour des cycles de vieillissement

La figure 3.31. présente la température des quatre éléments cités précédemment à la fin de ces 12000 cycles. Elle montre que les éléments en périphérie et proches du système de ventilation (éléments 1 et 19) sont moins chauds que les éléments situés au centre du module (éléments 12 et 17). Cette répartition non homogène des contraintes thermiques influence nécessairement l'évolution des caractéristiques de ces éléments.

### III.5.3.2. Réponse thermique des cycles de caractérisation

Avec des courants réduits, les ventilateurs doivent être désactivés si on souhaite avoir accès à une grande plage de température.

La figure 3.32. montre la réponse thermique pendant 160 cycles de caractérisation des éléments 1, 5, 6, 10, 12, 17, 19, 24, et 27. La figure 3.32. montre une répartition des températures sur les éléments du module différente de celle obtenue dans le cas du cyclage de vieillissement avec régulation de température. Ainsi, si on classe les éléments par ordre de température, ce classement diffère entre les deux types de cycles.

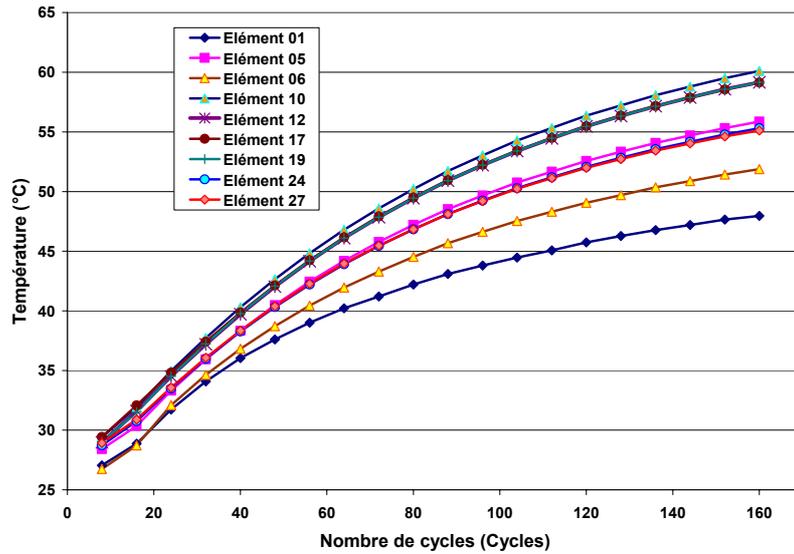


Fig. 3.32. : Réponse thermique de certains éléments du module testé

La figure 3.33. présente la température des quatre éléments (Éléments 1, 12, 17, 19) après les 160 cycles effectués avec le banc.

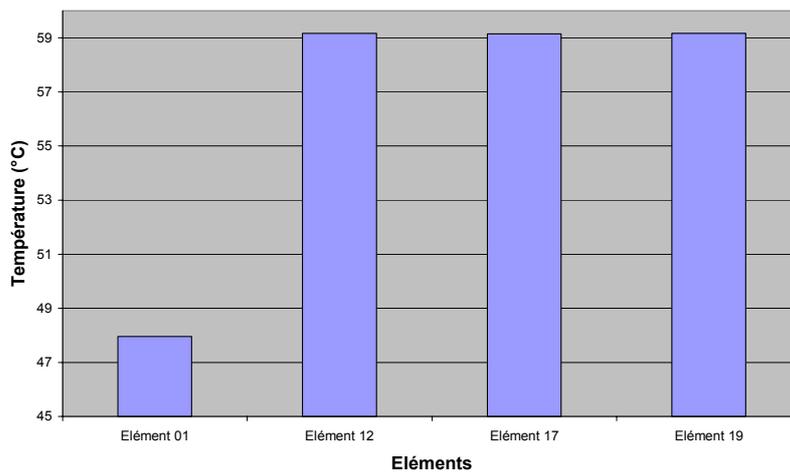


Fig. 3.33. : Classement des éléments caractérisés suivant les contraintes thermiques appliquées sur chacun pour des cycles de caractérisation

Cette figure montre que contrairement à l'évolution de la température des éléments dans le cas des cycles de vieillissement, la température des éléments 12,17 et 19 est la même après 160 cycles de caractérisation.

## III.6. Résultats expérimentaux de caractérisation

### III.6.1. Démarche

Dans cette partie nous proposons une étude de caractérisation de quatre éléments du module de supercondensateurs. Afin de montrer l'influence de la température et donc indirectement de la position de ces éléments dans le module sur leurs caractéristiques, les paramètres des deux modèles (modèle simplifié de la ligne de transmission et modèle énergétique simplifié), définis dans le chapitre précédent ont été caractérisés en fonction de

la température. Cette caractérisation, à un instant donné de la vie du module, a été obtenue grâce au cycle de caractérisation. Il suffit ensuite de comparer ces essais, qui peuvent être qualifiés de référence, aux essais obtenus avec les cycles de vieillissement pour connaître l'écart entre les mesures faites par les deux méthodes.

### III.6.2. Caractérisation à l'aide du modèle simplifié de la ligne de transmission

Comme l'indique le paragraphe II.5.1 du chapitre précédent, ce modèle est caractérisé par une résistance série ( $r_s$ ), une résistance de transmission ( $R$ ), et une capacité non-linéaire ( $C(v)$ ). Les paramètres résistifs sont calculés en utilisant une caractérisation fréquentielle. Par contre, la capacité est calculée avec une caractérisation temporelle. La variation de température des éléments est obtenue au cours de la phase de montée en température du module. Cette phase nous permet de déterminer les caractéristiques des éléments pour chaque cycle, la température évoluant au cours de cette phase transitoire.

#### III.6.2.1. Caractérisation des résistances du modèle à l'aide de la caractérisation fréquentielle

L'utilisation de la réponse fréquentielle des éléments supercondensateurs nous permet de suivre l'évolution des caractéristiques résistives ( $r_s$  et  $R$ ) des éléments. En plus du courant de cyclage présenté dans la figure 3.34., un harmonique de courant 5A à 50Hz est ajouté. L'injection de cet harmonique permet de prolonger la réponse fréquentielle des éléments caractérisés vers les « hautes fréquences » (50Hz). La figure 3.34. présente la réponse fréquentielle de quatre éléments (1, 12, 17, et 19) du module à 29°C.

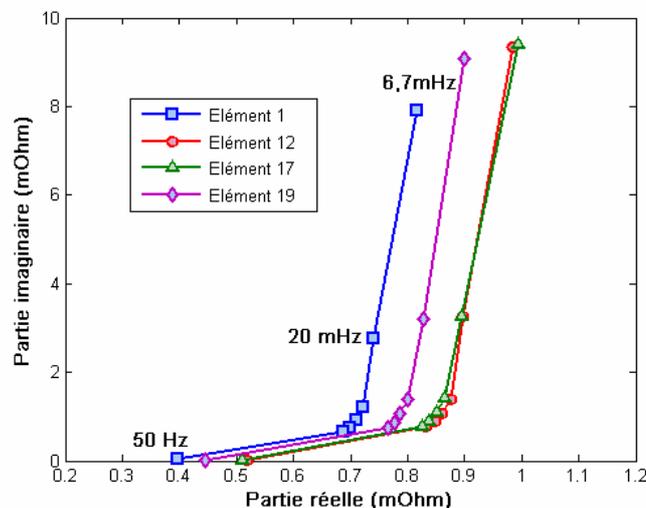


Fig. 3.34. : Réponse fréquentielle de quatre éléments (1, 12,17, et 19) du module à 29°C

Cette figure montre que la réponse fréquentielle des supercondensateurs dépend de leur position dans le module. Si on se réfère au comportement thermique de chacun de ces éléments durant le cyclage de vieillissement (figure 3.31.), on remarque que la réponse des éléments les plus froids (1-19) est décalée vers la gauche, contrairement à celle des éléments chauds (12-17). La réponse fréquentielle de chaque élément a été représentée pour trois températures différentes (Figure 3.35.).

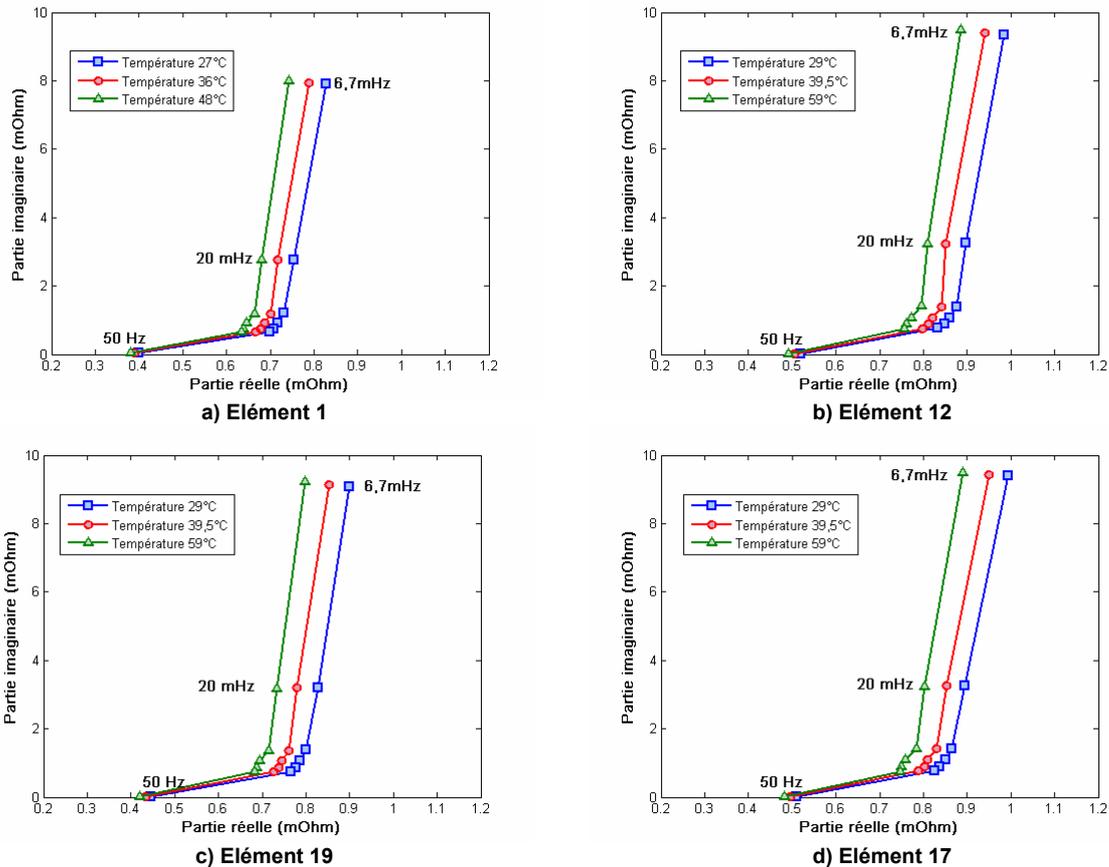


Fig. 3.35 : Réponse fréquentielle des quatre éléments pour trois températures différentes

Ces quatre figures montrent un comportement similaire, à savoir un décalage vers la gauche de la caractéristique fréquentielle avec l'augmentation de la température. Ce décalage est justifié par une diminution des deux caractéristiques ( $R_{BF}$  et  $R_{HF}$ ).

### III.6.2.1.1. Evolution de la résistance série en fonction de la température

La résistance série ( $r_s$ ) correspond à la résistance haute fréquence  $R_{HF}$  qui est égale à la partie réelle de l'impédance à 50Hz. La figure 3.36. montre que la résistance série varie de la même manière pour les quatre éléments (1, 12, 17, et 19). Ces mesures montrent une diminution de la résistance série avec l'augmentation de la température de l'ordre de 7 % entre 29°C et 59°C. La température de l'élément 1 ne dépasse pas les 48°C avec ce type de cycle, ceci étant lié à sa position. Les deux éléments 12 et 17 ont presque la même résistance série, ce qui paraît justifié par des contraintes thermiques similaires au cours du vieillissement.

D'autre part, on remarque que pour chaque température il existe une grande différence entre les résistances des éléments 1, 19 et (12,17). Cette différence doit refléter les contraintes thermiques appliquées sur ces éléments au cours des cycles de vieillissement. Plus les contraintes thermiques sont faibles, moins la résistance série est élevée. Entre l'élément le moins sollicité (Elément 1) et les deux éléments (12,17), on relève une différence de 30% sur  $r_s$  qui marque visiblement un vieillissement plus rapide des éléments qui subissent des températures plus élevées.

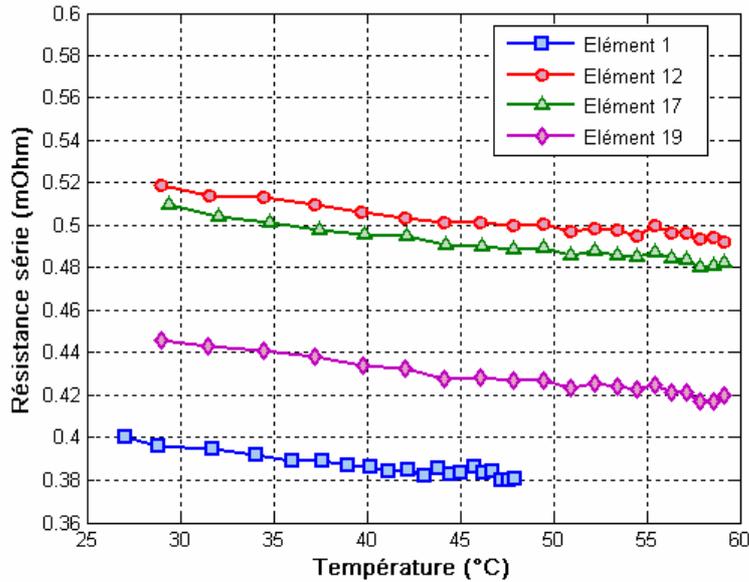


Fig. 3.36. : Comparaison des résistances série des quatre éléments

### III.6.2.1.1. Evolution de la résistance de transmission en fonction de la température

La résistance de transmission ( $R$ ) est calculée en utilisant la formule II.36 à partir de la résistance basse fréquence à 20mHz ( $R_{BF}$ ) et de celle calculée à 50Hz ( $R_{HF}$ ).

La figure 3.37. montre l'évolution de la résistance de transmission en fonction de la température pour les quatre éléments.

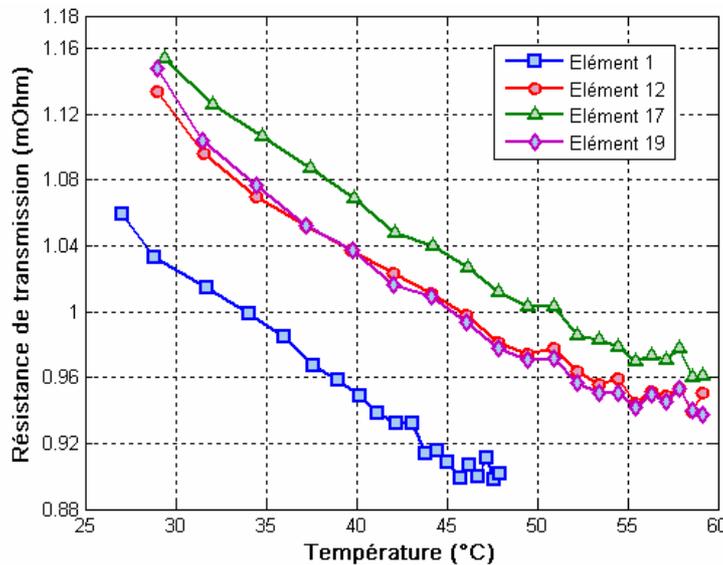


Fig. 3.37. : Evolution de la résistance de transmission des quatre éléments en fonction de la température

Cette figure montre une diminution de l'ordre de 25% pour les éléments chauds (12, 17, 19) entre 29°C et 59°C. La différence de résistance de transmission de ces 3 éléments chauds est faible. Entre ces trois éléments et l'élément 1, on note une différence de l'ordre de 11% à 29°C. On peut noter que l'élément 17 présentant ici la résistance de transmission la plus élevée correspond à l'élément qui subit la plus forte température au cours des cycles de vieillissement.

### III.6.2.2. Caractérisation des capacités du modèle à l'aide de la caractérisation temporelle

Cette méthode de caractérisation est basée sur l'utilisation de la réponse temporelle des éléments. Le gradient de la caractéristique ( $V_{SC} = f(t)$ ) représente  $(I/C_i)$ , cela nous donne :

$$C(V) = \frac{I}{\text{gradient}(V_{SC}(t))}.$$

#### III.6.2.2.1. Evolution de la capacité en fonction de la tension

La figure 3.38. présente pour les quatre éléments échantillons, la variation de la capacité de transmission en fonction de la tension pour trois températures différentes

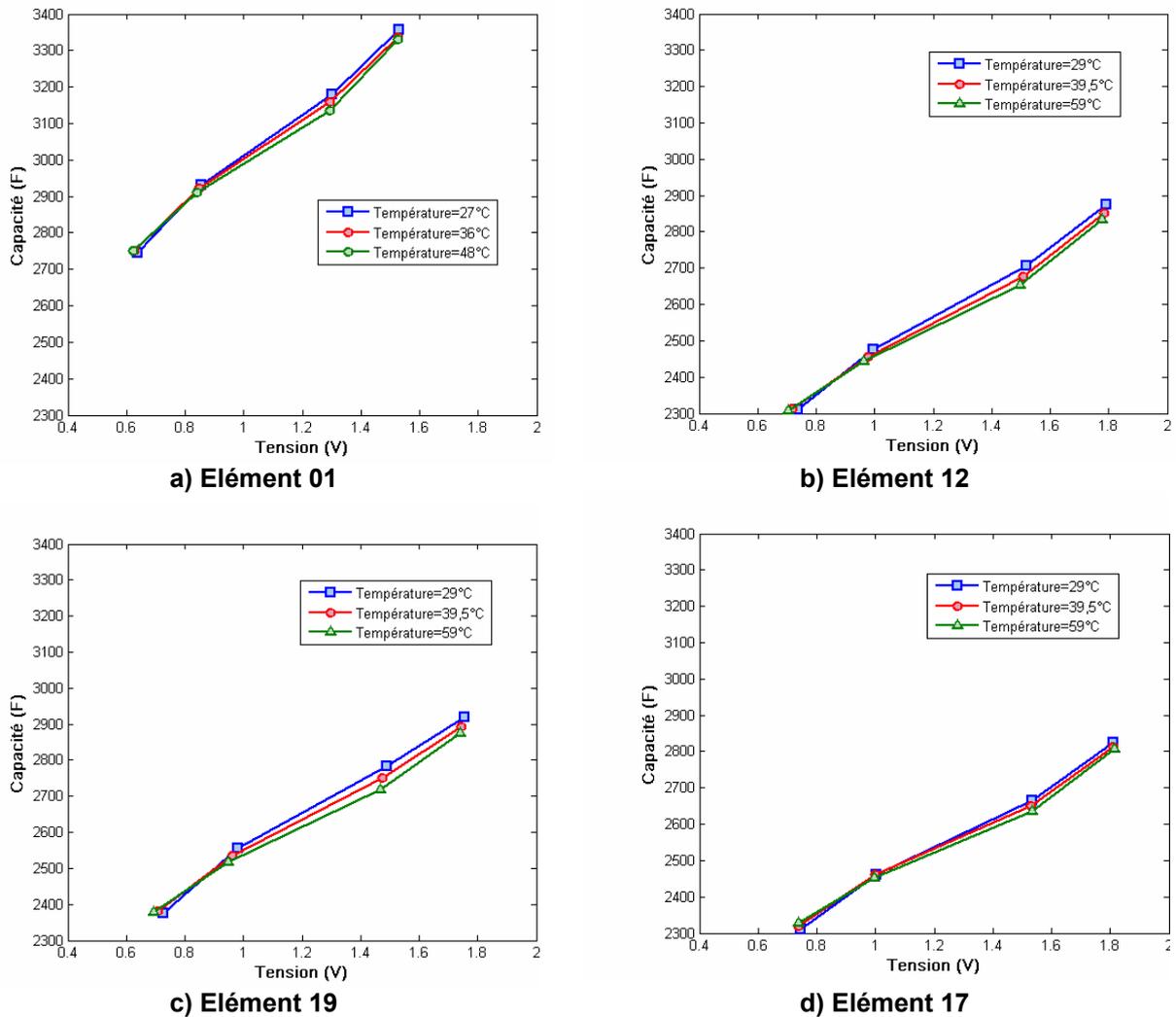


Fig. 3.38. : Evolution de la capacité de transmission des quatre éléments en fonction de la tension pour trois températures différentes

On peut remarquer sur ces relevés que :

- ✓ La capacité de transmission augmente avec la tension
- ✓ Cette capacité varie très peu avec la température
- ✓ Pour les faibles tensions, la capacité augmente avec l'augmentation de la température
- ✓ Globalement, au delà de 1V la capacité de transmission diminue en fonction de la température pour chaque élément.

La figure 3.39. présente une comparaison de la capacité des quatre éléments à 1,5V et 29°C.

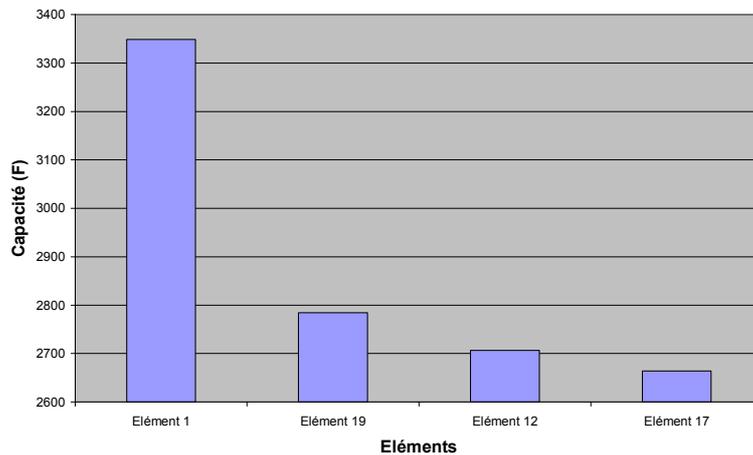
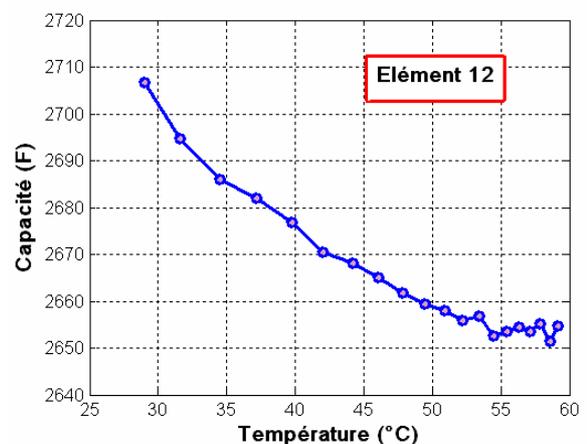
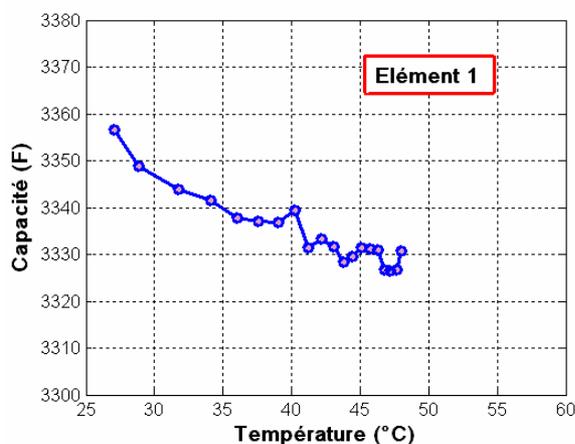


Fig. 3.39. : Comparaison de la capacité de transmission des quatre éléments à 1,5V et 29°C

Cette figure montre les valeurs de la capacité des éléments et l'état du vieillissement de chaque élément. Les éléments les plus sollicités thermiquement possèdent une plus faible capacité. Entre l'élément le plus mauvais (élément 17) et celui qui possède les meilleures caractéristiques (élément 1), on relève une différence d'environ 26%.

### III.6.2.2.2. Evolution de la capacité en fonction de la température

La figure 3.40. montre l'évolution de la capacité de transmission à 1,5V en fonction de la température pour les quatre éléments. Elle montre une faible diminution de cette capacité en fonction de la température (environ 2% entre 29° et 59°C).



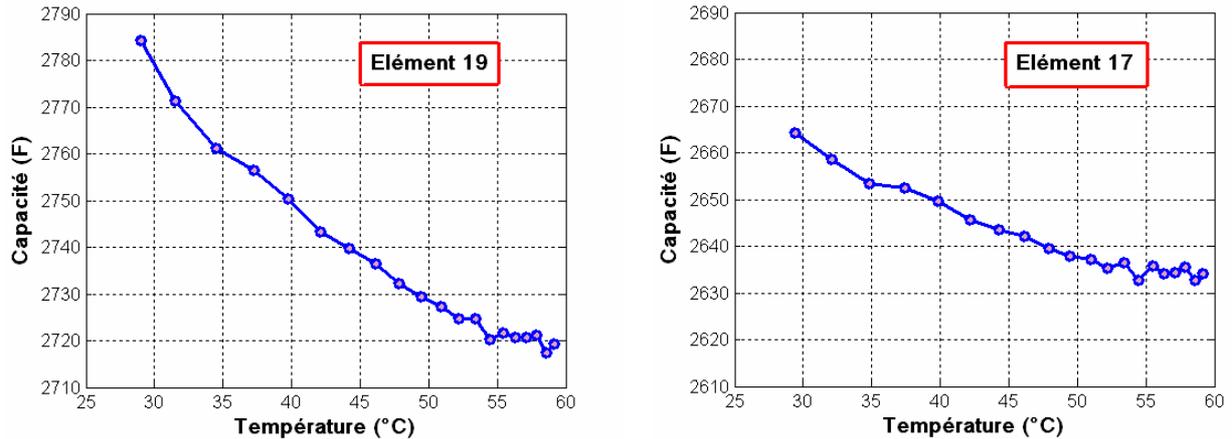


Fig. 3.40 : Evolution de la capacité de transmission des quatre éléments en fonction de la température à 1,5V

### III.6.3. Caractérisation du modèle énergétique simplifié

Ce modèle, décrit dans le chapitre II, est caractérisé par deux éléments : une résistance équivalente  $R_{eq}$  et une capacité non-linéaire équivalente  $C_{eq}(V)$ .

#### III.6.3.1. Evolution de la résistance

Il existe trois méthodes pour extraire la valeur de cette résistance :

La première de ces méthodes est basée sur une caractérisation fréquentielle. Elle utilise donc les résultats obtenus pour la détermination des résistances du modèle simplifié de la ligne de transmission.

La deuxième méthode est basée sur une caractérisation temporelle. Cette valeur de résistance est obtenue par mesure de la chute de tension durant la phase de redistribution (à courant nul)

Pour la dernière méthode, la résistance est évaluée à partir des pertes d'énergie. On considère dans ce cas que cette résistance est la cause de l'ensemble des pertes dans le supercondensateur.

##### III.6.3.1.1. Caractérisation fréquentielle de la résistance équivalente ( $R_{eq}$ )

Comme indiqué dans le deuxième chapitre, la résistance équivalente est égale à  $R_{BF}$ . La figure 3.41. présente l'évolution de la résistance basse fréquence en fonction de la température pour les quatre éléments (1, 12, 17, et 19). Cette figure montre une diminution de la résistance équivalente ( $R_{BF}$ ) en fonction de la température pour les quatre éléments. Pour l'élément 19, il y a une variation de 14% de la résistance BF entre 29°C et 59°C.

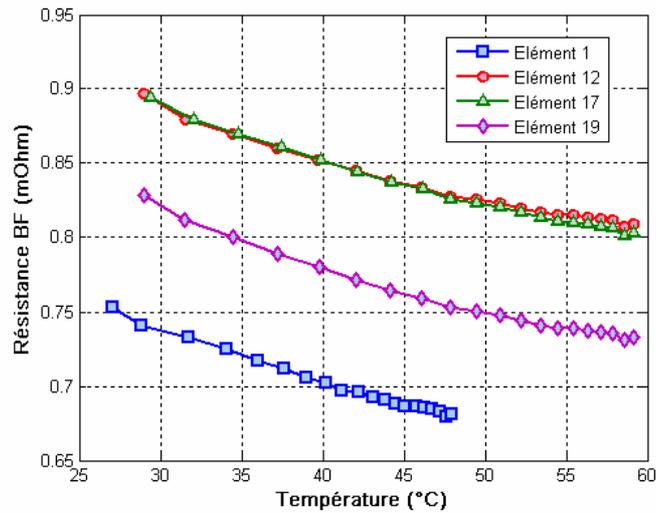


Fig. 3.41. : Comparaison de la résistance BF des quatre éléments

Cette figure montre que les éléments les moins sollicités thermiquement (éléments 1 et 19) possèdent une résistance équivalente plus faible que celles des éléments les plus sollicités (éléments 12 et 17). Pour chaque température on trouve presque la même différence de résistance BF entre les éléments. Cette différence est de l'ordre de 20% entre l'élément 1 et les éléments 12 et 17.

### III.6.3.1.2. Caractérisation temporelle de la résistance équivalente ( $R_{eq}$ )

Dans ce cas, la résistance équivalente est calculée en divisant la chute de tension entre la fin de la phase de charge et 10 secondes après cet instant par le courant (méthode constructeur). Ces dix secondes représentent le temps estimé nécessaire à la stabilisation de la tension des éléments. La figure 3.42. présente la variation de la résistance équivalente en fonction de la température calculée avec cette méthode pour les quatre éléments.

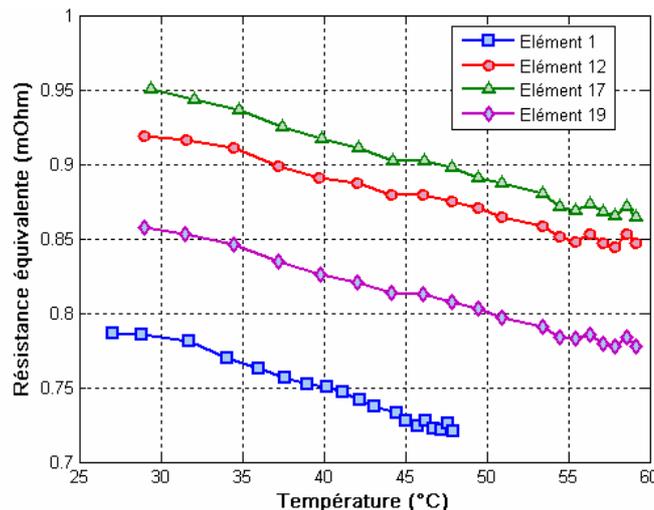


Fig. 3.42. : Evolution de la résistance équivalente des quatre éléments en fonction de la température

Cette figure montre une diminution de la résistance équivalente en fonction de la température. Entre 29°C et 59°C il y a 10% de variation pour l'élément 17. Afin de comparer la résistance de ces quatre éléments, on a présenté la valeur de cette résistance à 29°C (figure

3.43.).

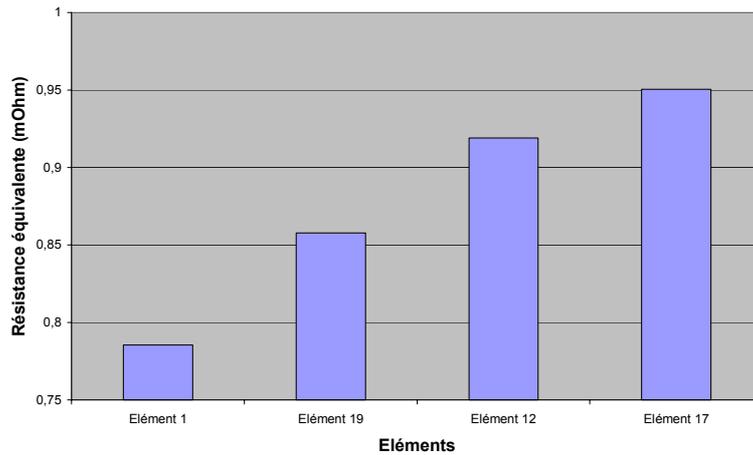


Fig. 3.43 : Comparaison de la résistance équivalente des quatre éléments à 29°C

Cette figure montre que les éléments les plus sollicités thermiquement possèdent une plus grande résistance équivalente (élément 12 et 17), contrairement aux éléments froids. Entre l'élément 1 et celui qui dispose des plus mauvaises caractéristiques (élément 17), on relève une différence de 22%.

### III.6.3.1.3. Caractérisation de la résistance énergétique ( $R_E$ )

La résistance énergétique est la résistance qui, parcourue par le courant traversant le supercondensateur, provoquerait des pertes équivalentes à celles mesurées. Afin d'obtenir la valeur de cette résistance, les pertes énergétiques durant tout le cycle sont calculées par la relation suivante :

$$E_{Pertes\_cycle} = \int_{Cycle} V_{SC} I dt \quad (III-10)$$

$$\text{Avec : } E_{Pertes\_cycle} = R_E \int_{Cycle} I^2 dt \Rightarrow R_E = \frac{E_{Pertes\_cycle}}{\int_{Cycle} I^2 dt} \quad (III-11)$$

La figure 3.44. montre l'évolution de la résistance énergétique en fonction de la température pour les quatre éléments (1, 12, 17, et 19).

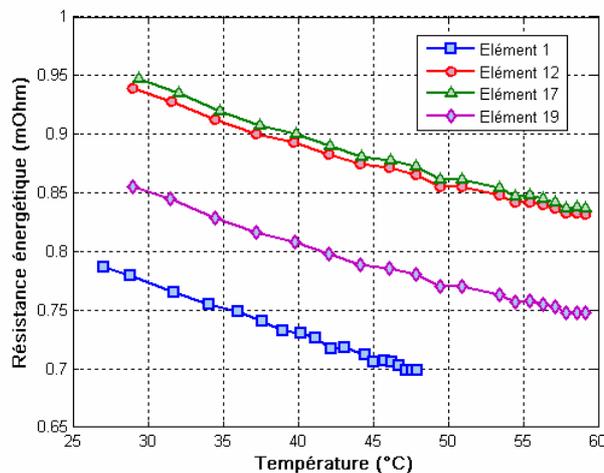


Fig. 3.44 : Evolution de la résistance énergétique des quatre éléments en fonction de la température

D'après les résultats présentés dans la figure 3.44., la résistance énergétique diminue avec l'augmentation de la température. Entre 29°C et 59°C la variation maximale est de 14,5% pour l'élément 19. On remarque aussi que la différence entre la résistance des éléments reste presque la même quelle que soit la température.

La figure 3.45. présente la valeur de la résistance énergétique des quatre éléments à 29°C.

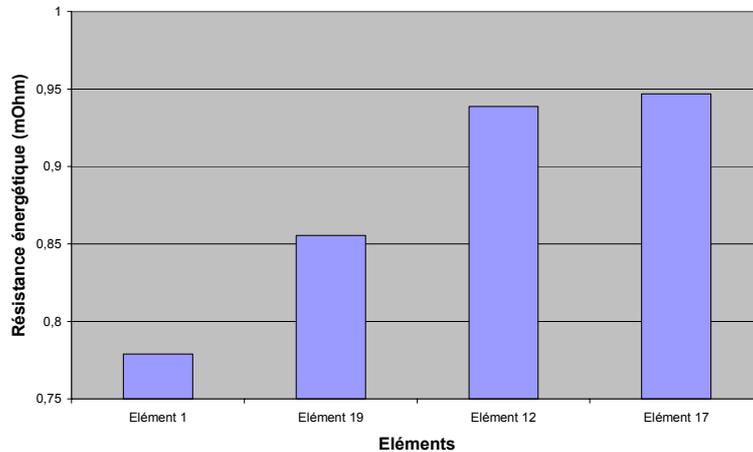


Fig. 3.45. : Comparaison de la résistance énergétique des quatre éléments à 29°C

Comme pour le cas de la résistance équivalente, la résistance énergétique reflète aussi l'état du vieillissement des éléments. Cette résistance est plus faible pour les éléments les moins sollicités thermiquement.

### III.6.3.1.4. Comparaison des trois méthodes

La figure 3.46. présente une comparaison entre l'évolution des trois résistances caractérisées avec les différentes méthodes (résistance équivalente ( $R_{eq}$ ) pour le premier modèle et résistance énergétique ( $R_E$ ) pour l'autre).

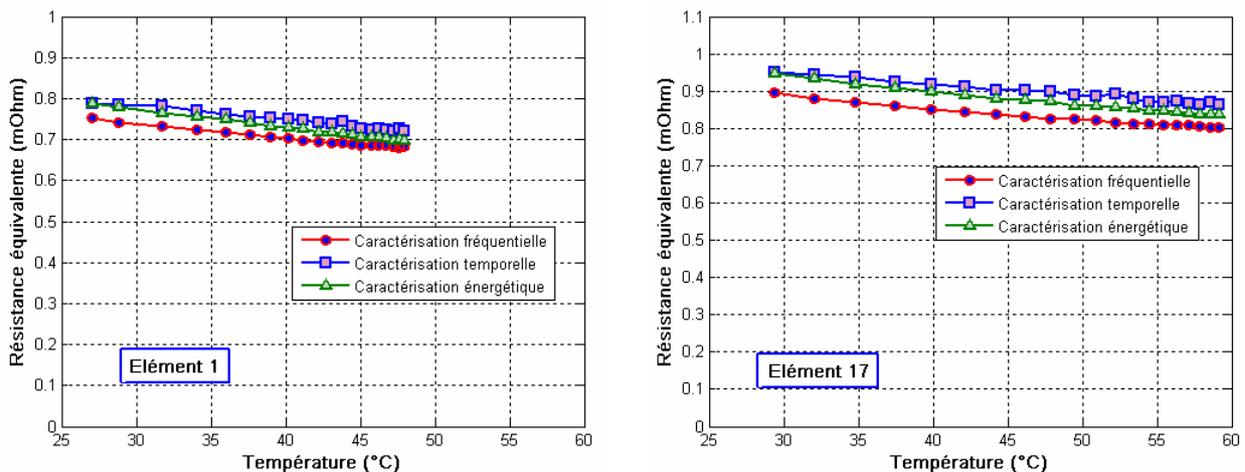


Fig. 3.46. : Comparaison des résistances énergétiques et équivalentes

Cette figure montre que les différentes méthodes aboutissent à des résultats très proches. La détermination de  $R_E$  étant directement basée sur les pertes mesurées, cette comparaison tend à valider les différentes approches. On constate que la résistance obtenue par la

méthode fréquentielle semble être sous-estimée, et que par contre la méthode temporelle (méthode généralement proposée par le constructeur) surestime la valeur.

### III.6.3.2. Evolution de la capacité

Il existe deux manières d'estimer la capacité du modèle énergétique simplifié :

La première,  $C_{eq}$ , est basée sur la caractérisation temporelle, de la même manière que pour le modèle simplifié de la ligne de transmission.

La seconde, est la capacité énergétique  $C_E$  basée sur la relation liant la tension à l'énergie stockée. Cette méthode ne peut être envisagée que si l'énergie de départ est très faible. C'est le cas uniquement pour les cycles de caractérisation.

#### III.6.3.2.1. Caractérisation de la capacité équivalente ( $C_{eq}$ )

La capacité équivalente de ce modèle est caractérisée de la même manière que pour le modèle simplifié de la ligne de transmission (paragraphe III.8.2.2)

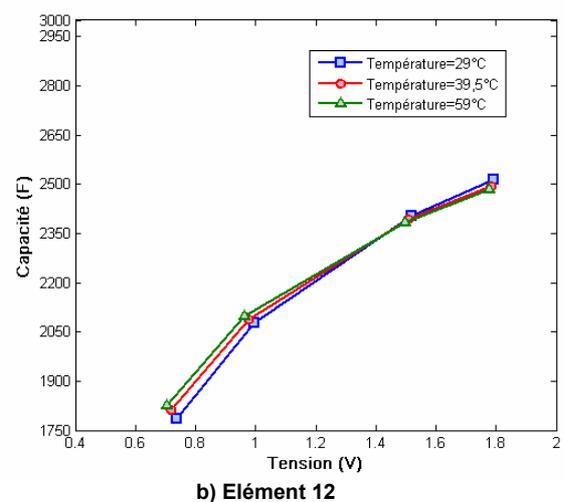
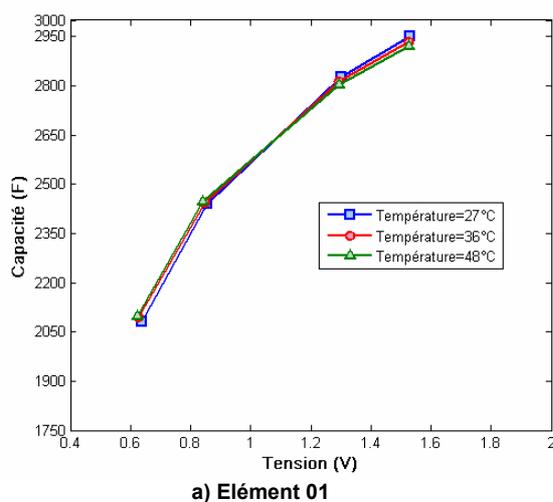
#### III.6.3.2.2. Caractérisation de la capacité énergétique ( $C_E$ )

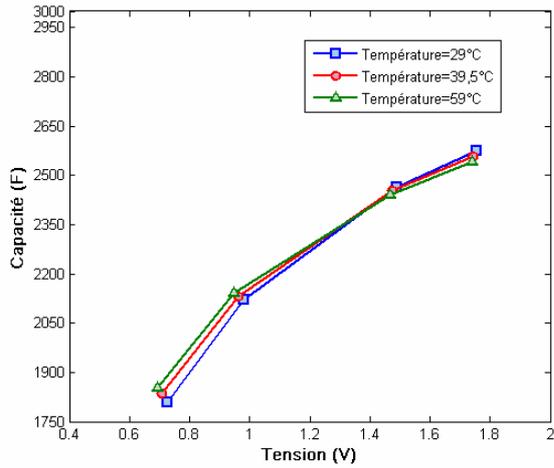
La signification de cette capacité a été expliquée dans le paragraphe II.6.1.2.2 du chapitre précédent. L'utilisation de la formule II.62 permet de calculer la valeur de cette capacité en respectant les conditions suivantes :

- ✓ La tension de fin des cycles doit être nulle.
- ✓ L'énergie qui reste stockée à la fin des cycles est négligeable.

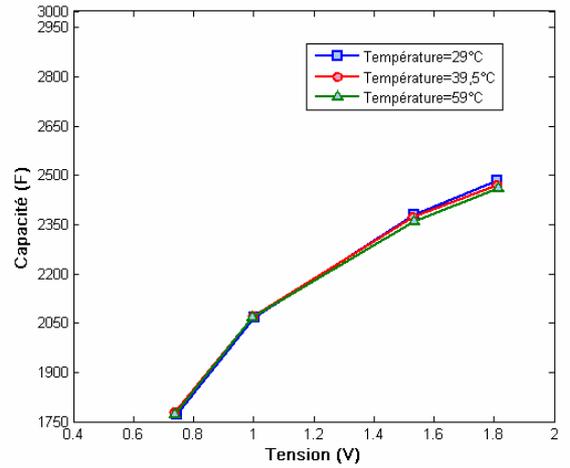
##### III.6.3.2.2.1. Evolution de la capacité en fonction de la tension

La figure 3.47. montre la variation de la capacité énergétique en fonction de la tension pour trois températures différentes.





c) Élément 19



d) Élément 17

Fig. 3.47. : Evolution de la capacité énergétique des quatre éléments en fonction de la tension pour trois températures différentes

Ces quatre figures montrent une variation non-linéaire de la capacité en fonction de la tension. On remarque aussi que pour les faibles tensions, la capacité augmente avec la température. Pour les tensions proches de la tension maximale, la tendance s'inverse.

### III.6.3.2.2. Evolution de la capacité en fonction de la température

La figure 3.48. présente l'évolution de la capacité énergétique en fonction de la température à 1,5V pour les quatre éléments.

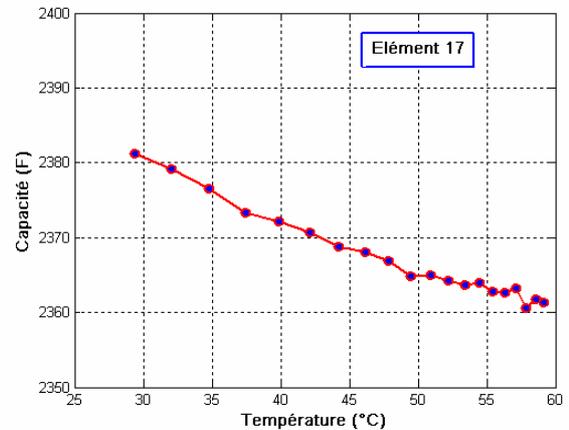
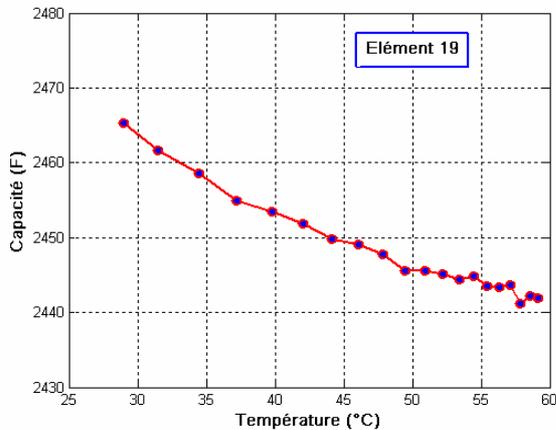
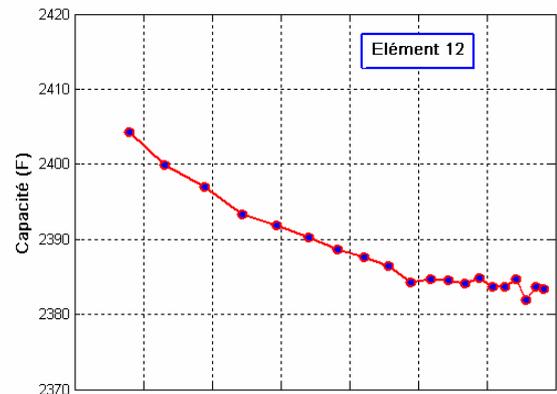
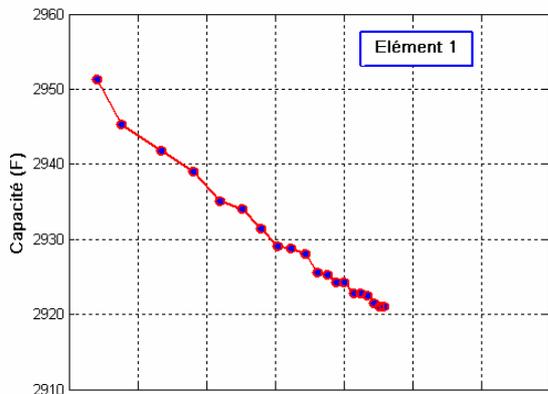


Fig. 3.48. : Evolution de la capacité énergétique des quatre éléments en fonction de la température à 1,5V

Ces figures montrent qu'à 1,5V la capacité énergétique diminue en fonction de la température. Cette variation reste non significative du fait qu'elle ne dépasse pas 1% entre 29°C et 59°C. Afin de comparer la capacité des quatre éléments, la figure 3.49. présente la capacité énergétique des quatre éléments à 1,5V et 29°C.

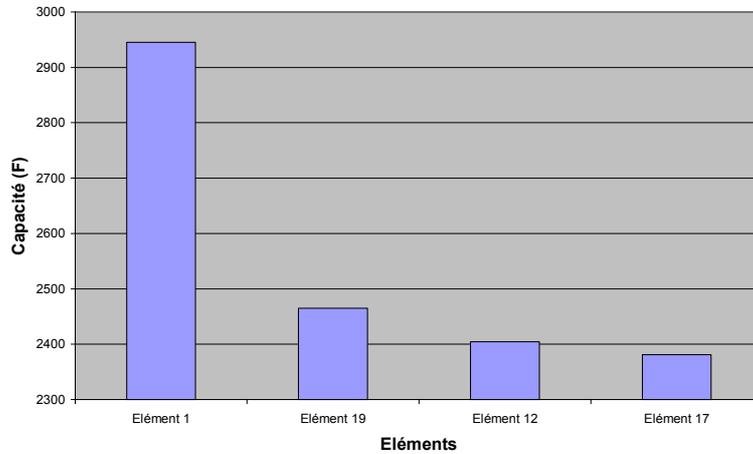


Fig. 3.49 : Comparaison de la capacité énergétique des quatre éléments à 1,5V et 29°C

Cette figure montre une capacité plus importante des éléments les moins contraints. Par contre les éléments les plus sollicités possèdent une faible capacité.

### III.6.3.2.3. Comparaison des deux méthodes

La figure 3.50. présente une comparaison entre l'évolution des deux capacités qui caractérisent le supercondensateur (capacité équivalente ( $C_{eq}$ ) et capacité énergétique ( $C_E$ )).

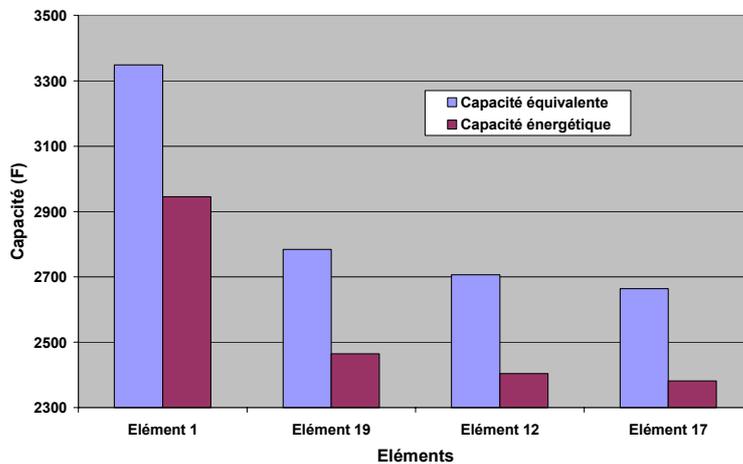


Fig. 3.50 : Comparaison des différentes capacités qui caractérisent un supercondensateur à 1,5V et 29°C

Cette comparaison renforce la remarque faite dans la partie (I.7.3) du deuxième chapitre. On remarque bien que la capacité énergétique est inférieure à la capacité instantanée. La différence est de 14% pour une tension proche de la tension maximale.

### III.6.4. Comparaison des résultats de caractérisation obtenus avec les deux types de cycles.

Tous les résultats présentés précédemment ont été basés sur l'utilisation de cycles de caractérisation. Cette méthode permet d'obtenir un grand nombre d'informations mais malheureusement les cycles utilisés ne peuvent être considérés comme réalistes dans le cas d'une application industrielle. De plus, cette méthode étant plus compliquée à mettre en œuvre, elle n'est utilisée que rarement. L'autre approche proposée est d'utiliser les mesures obtenues lors du cyclage de vieillissement pour extraire des paramètres utiles à la caractérisation. Nous proposons dans cette partie de comparer quelques résultats obtenus par l'exploitation des mesures des cycles de vieillissement avec les résultats obtenus précédemment. Nous ne pouvons comparer que ce qui est comparable, et donc le fait de ne pas être dans les mêmes conditions de température ou de tension explique que seuls quelques points de mesure ont pu être comparés.

#### III.6.4.1. Comparaison des résistances obtenues par la caractérisation fréquentielle

La figure 3.51. montre la réponse fréquentielle de l'élément 17 obtenue avec les deux types de cycles (cycles de caractérisation  $f=6,7\text{mHz}$  et cycles de vieillissement  $f=20\text{mHz}$ ) dans les mêmes conditions de température ( $50^\circ\text{C}$ ). Les caractéristiques sont ici très proches. Il est également intéressant de remarquer que les points à même fréquence sont très proches. Grâce à ces mesures, les résistances haute fréquence et basse fréquence ont pu être comparées. Les résistances haute fréquence sont parfaitement identiques. Les résistances basse fréquence à  $20\text{mHz}$  sont de  $0,82\text{m}\Omega$  pour la méthode basée sur le cycle de caractérisation et de  $0,783\text{m}\Omega$  pour l'autre méthode. L'erreur est donc inférieure à 5%.

Cette figure montre que l'utilisation des cycles de vieillissement introduit une sous-estimation de la résistance basse fréquence. Ce décalage est dû à une faible représentation de la redistribution des charges et des phénomènes lents si on augmente la fréquence ( $f=20\text{mHz}$ ).

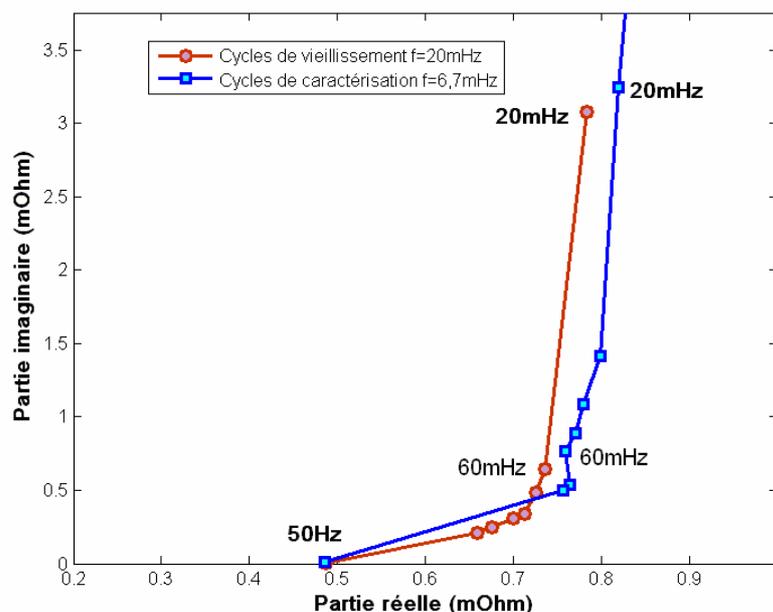


Fig. 3.51. : Réponse fréquentielle de l'élément 17 avec deux types de cycle pour  $50^\circ\text{C}$

### III.6.4.2. Comparaison des capacités équivalentes

La figure 3.52. présente la comparaison des capacités de transmission de l'élément 17 pour une température de 50°C. Cette figure met en évidence l'un des principaux défauts de la méthode utilisant des cycles de vieillissement. En effet, bien que la profondeur des cycles soit ici de 80%, la plage de variation de tension est relativement faible.

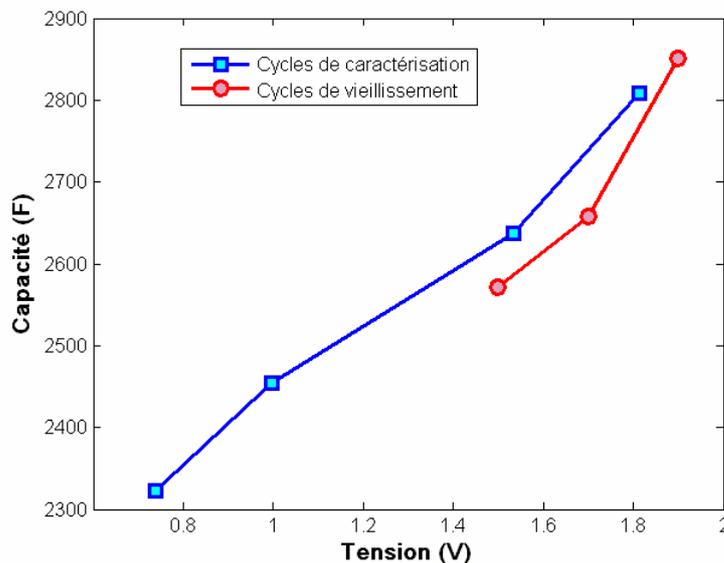


Fig. 3.52. : Comparaison des capacités de transmission

Cette figure montre une sous-estimation de la capacité avec l'utilisation des cycles de vieillissement (une erreur maximum de -3% par rapport aux résultats obtenus avec les cycles de caractérisation).

Cette partie montre qu'il est possible d'extraire des informations directement à partir des cycles de vieillissement et que l'observation de ces paramètres tout au long du cyclage peut permettre d'observer le phénomène de vieillissement des éléments du module.

## III.7. Etude du vieillissement

### III.7.1. Méthodes utilisées pour l'étude du vieillissement

Jusqu'à présent l'étude était basée sur la caractérisation électrique et énergétique d'un module de supercondensateurs à un instant défini de sa vie. Cette partie prend en compte l'évolution des caractéristiques en fonction du nombre de cycles afin de connaître l'effet de vieillissement provoqué par le cyclage prolongé.

Pour cette étude de vieillissement, deux méthodes peuvent être envisagées :

- ✓ Une première méthode basée uniquement sur l'application de cycles de vieillissement qui ne donne que des informations partielles sur les caractéristiques des supercondensateurs. Cette méthode a cependant l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre car elle n'utilise qu'un seul type de cycle.
- ✓ Une seconde méthode où les phases de caractérisation s'effectuent avec des cycles de caractérisation. Cette méthode donne des résultats plus précis mais est plus difficile à mettre en œuvre.

### III.7.1.1. Utilisation des mêmes cycles pour le vieillissement et la caractérisation.

Dans ce cas, comme le montre la figure 3.53., un seul type de cycle est utilisé. Les caractéristiques sont directement calculées avec les cycles de vieillissement. Cette méthode donne des bons résultats, mais ne permet pas de faire une caractérisation sur toute la plage de la tension [0V-2V], car ce type de cycle ne couvre que l'intervalle [1,12V-2V]. Avec cette technique, un autre problème apparaît dans la phase d'exploitation des cycles. La capacité est calculée pour un instant qui est censé correspondre à une tension identique pour tous les éléments supercondensateurs. Or ce n'est pas le cas à cause du problème de déséquilibre de tension. Il apparaît donc un « bruit » sur les caractéristiques puisque les éléments ne sont pas tous dans les mêmes conditions d'utilisation. Par contre, le gros avantage de cette méthode est que l'on peut avoir nettement plus de points de mesure et qu'il est possible d'accéder à toutes les données enregistrées pour redéfinir la caractéristique a posteriori.

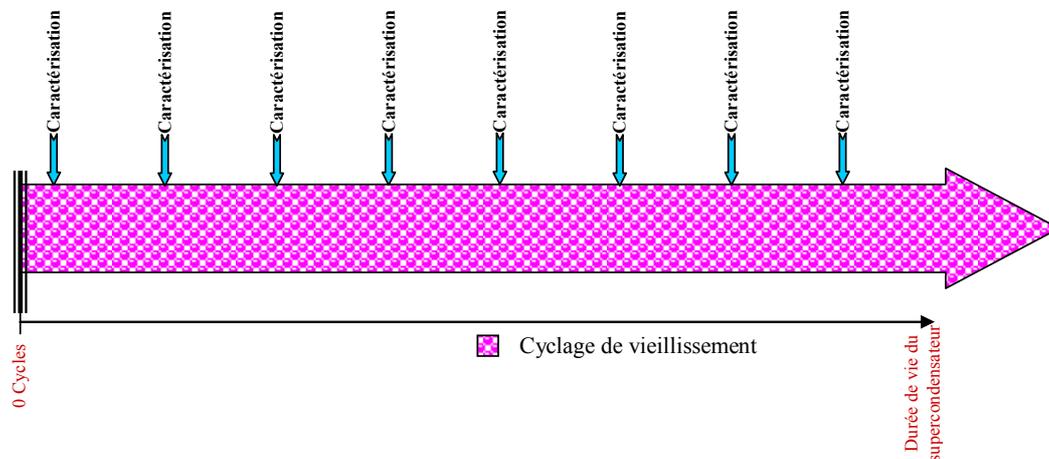


Fig. 3.53 : Utilisation d'un seul type de cycle pour l'étude de vieillissement

### III.7.1.2. Utilisation de cycles différents pour le vieillissement et la caractérisation

Afin de résoudre les problèmes de la première méthode, une autre démarche, basée sur l'utilisation de deux types de cycles, peut être envisagée : des cycles de vieillissement la majeure partie du temps, et une caractérisation de façon régulière avec des cycles adaptés (faible fréquence, faible intensité de courant, charge complète...). Il est également possible avant chaque campagne de caractérisation, de procéder à un rééquilibrage des tensions des éléments. La figure 3.54. illustre le principe de cette seconde méthode. Par rapport à la première, cette figure montre l'apparition d'une phase de caractérisation régulièrement espacée le long du vieillissement du module. Avant chaque phase de caractérisation, les tensions des éléments sont équilibrées.

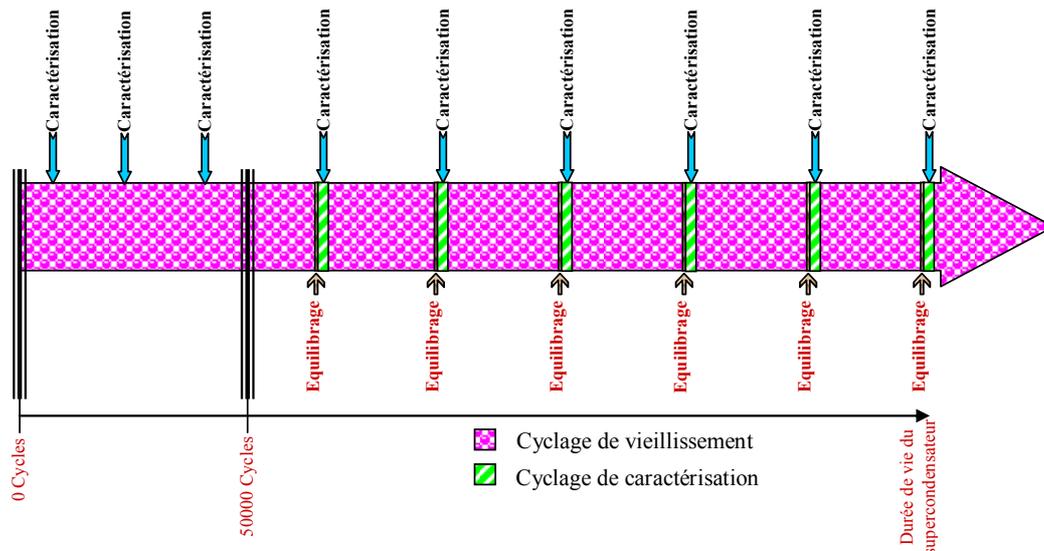


Fig. 3.54 : Utilisation de deux types différents de cycle pour l'étude de vieillissement

Le gros inconvénient de cette méthode est que ce principe limite le nombre de point de mesure et que ces phases doivent être prévues dans le fonctionnement. Cela n'a ailleurs pas été le cas au début des tests puisque ces cycles de caractérisation n'ont été définis qu'après 50000 cycles d'utilisation du module.

### III.7.2. Evolution des caractéristiques

L'évolution des caractéristiques du supercondensateur peut nous donner une idée de la durée de vie du composant [C3-11, C3-12, C3-13]. Cette dernière représente un critère primordial pour l'utilisation de ces composants dans des applications de puissance.

Dans cette partie nous nous intéressons à l'évolution de la capacité à un seul point de tension ( $V_{sc}=1,8V$ ). De ce fait, l'utilisation de la première méthode pour l'étude de vieillissement convient dans ce cas.

#### III.7.2.1. Evolution de la résistance équivalente

La résistance équivalente est calculée avec la méthode fréquentielle ( $R_{eq} = R_{BF}$ , avec  $f_{BF} = 20mHz$ ) présentée dans la partie II.6.1.1.1 du mémoire. La figure 3.55. présente l'évolution de la résistance équivalente de l'élément 17 (élément plus chaud) à 50°C entre 50000 et 200000 cycles. Cette figure montre une augmentation de 4% de cette résistance équivalente pour 150000 cycles. Si on compare cette caractéristique avec celle d'un élément moyen du module, on remarque la confirmation de cette tendance.

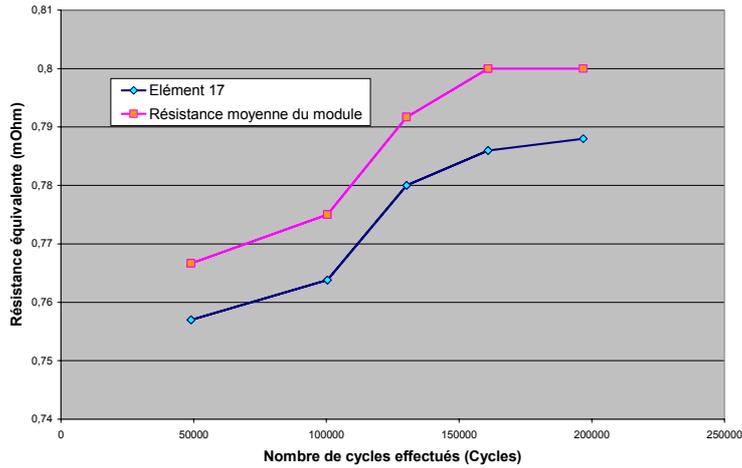


Fig. 3.55 : Comparaison de l'évolution de la résistance équivalente d'un élément avec la résistance moyenne du module

### III.7.2.2. Evolution de la résistance série

La résistance série est calculée aussi avec la méthode fréquentielle ( $r_s = R_{HF}$ , avec  $f_{BF} = 20mHz$ ) présentée dans la partie II.5.1 du mémoire. La figure 3.56. présente l'évolution de cette résistance pour l'élément 17 dans les mêmes conditions que précédemment.

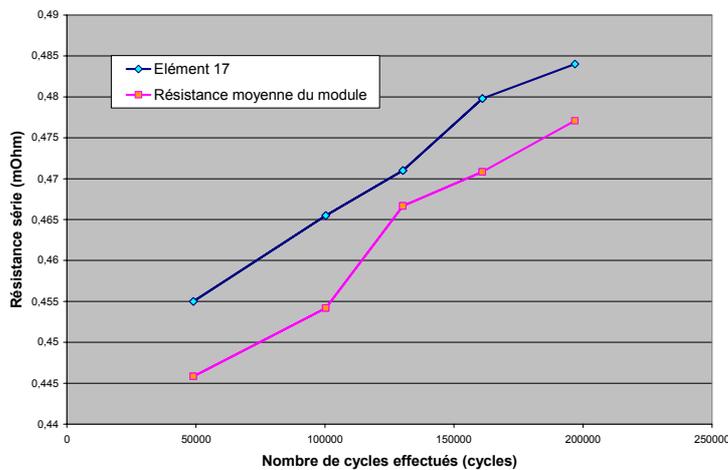


Fig. 3.56 : Comparaison de l'évolution de la résistance série d'un élément avec la résistance moyenne du module

Cette figure montre une élévation de 6,2% de cette résistance série toujours pour 150 000 cycles. Si on compare cette caractéristique avec celle d'un élément moyen on remarque la confirmation de cette tendance. La résistance série moyenne du module est inférieure à celle de l'élément 17, car ce dernier est l'un des éléments du module les plus sollicités thermiquement.

### III.7.2.3. Evolution de la capacité équivalente

Dans ce cas, on s'intéresse à l'évolution de la capacité pour une tension proche de la tension maximale des éléments ( $V_{sc}=1,8V$ ). La figure 3.57. montre l'évolution de cette capacité toujours pour l'élément 17 en fonction du nombre de cycles effectués.

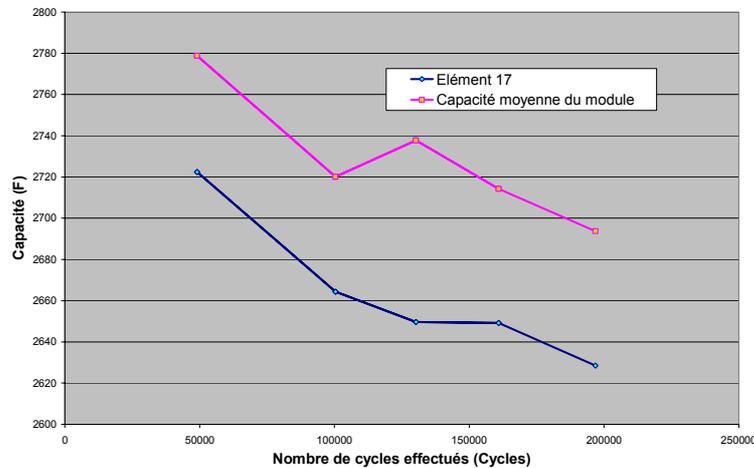


Fig. 3.57. : Comparaison de l'évolution de la capacité d'un élément avec la résistance moyenne du module

La figure 3.57. montre une diminution rapide de la capacité durant les premiers cycles. Cette diminution ralentit ensuite avec le cyclage. Pour ces 150000, on a 4% de diminution de la capacité à 50°C. On retrouve la même tendance pour l'évolution de la capacité moyenne du module. Cette dernière est plus importante que celle de l'élément 17 qui plus sollicité thermiquement que la moyenne dans le module.

## III.8. Conclusion

Le banc de test développé permet de reconstituer des conditions d'utilisation des supercondensateurs s'approchant de celles rencontrées dans le domaine de la traction électrique. L'implantation d'un système performant de sécurité rend désormais possible un cyclage continu (24h/24h) et sécurisé (surveillance de l'échauffement et de la surtension des éléments). Le transit d'énergie est assuré par un convertisseur abaisseur/élevateur adapté aux applications de faible tension (48V) et fort courant (400A). L'architecture choisie pour le convertisseur (méthode d'opposition), permet de limiter les pertes énergétiques du système. Le développement d'un modèle du banc a permis d'optimiser ses caractéristiques et de prédéfinir les cycles avant leur implantation.

Parmi les tests possibles avec le banc développé, on peut citer :

- ✓ Un cyclage continu avec différents profils de courant,
- ✓ Tester les différents modèles développés,
- ✓ Etudier le rendement du composant pour différents courants efficaces,
- ✓ Réaliser des essais à puissance constante,
- ✓ Réaliser des tests avec des courants alternatifs (caractérisation fréquentielle),
- ✓ Identifier les phénomènes lents (autodécharge),
- ✓ Suivre l'évolution du déséquilibre pour les éléments du module testé.

L'utilisation de ce banc a permis de caractériser un module de supercondensateurs (48V/112F) ainsi que quatre éléments du module. Cette caractérisation a été basée sur l'utilisation des deux modèles développés dans le deuxième chapitre.

L'utilisation du cycle de caractérisation (résultats à 130000 cycles) a conduit à la caractérisation du modèle simplifié de la ligne de transmission et du modèle énergétique. Cette caractérisation a été appliquée à quatre éléments du module pour différentes températures.

De façon générale, on observe une décroissance des résistances  $r_s$  et  $R$  du modèle ligne de transmission, en fonction de la température (dans la gamme 20 à 60°C). Cette variation est plus importante pour le paramètre  $R$  que pour  $r_s$ . Il a été également remarqué que le vieillissement est moins accentué sur l'élément subissant moins de contrainte thermique lors du cyclage (élément 1). On note par contre une faible influence de la température de ces éléments sur leur capacité  $C(v)$ . De plus, c'est aussi l'élément qui a subi le moins de contraintes thermiques qui possède la plus forte capacité. L'utilisation du modèle énergétique simplifié a conduit à des résultats similaires. Ceci nous a permis de comparer les différentes approches de mesure de  $R_{eq}$  (fréquentielle, méthode constructeur, énergétique). Ces trois méthodes conduisent à des résistances mesurées relativement proches.

Les premiers résultats obtenus à partir des cycles de vieillissement (200000 cycles) ont permis d'observer les tendances d'évolution de certains paramètres ( $R$ ,  $r_s$ ,  $C$ ) en fonction du nombre de cycles effectués. Cette étude a été faite pour l'élément 17 et pour le module complet. On observe logiquement une augmentation des résistances et une diminution de la

capacité en fonction du nombre de cycles. La dégradation observée apparaît toutefois très raisonnable compte tenu des températures de fonctionnement imposées aux composants. Ceci semble indiquer que ces composants auront vraisemblablement une durée de vie assez importante.

Ces premiers résultats obtenus à l'aide du banc de test et des méthodes de caractérisation implantées illustrent concrètement la démarche de cette étude. Cette phase de validation achevée, l'utilisation du banc pour le vieillissement et la caractérisation de modules de technologie plus récente, subissant des contraintes plus importantes, nous paraît une des prochaines étapes à atteindre afin d'exploiter véritablement les potentiels technologique et scientifique développé au L2EP.



## Figures du chapitre 3

Fig. 3.1: Synoptique du banc de caractérisation de modules de supercondensateurs.....	92
Fig. 3.2 : Banc de caractérisation.....	93
Fig. 3.3 : Module supercondensateur (96F, 56V, 400A).....	94
Fig. 3.4 : Le convertisseur d'échange d'énergie (60V/400A).....	94
Fig. 3.5 : Hacheur quatre quadrants.....	95
Fig. 3.6 : Principe de commande du convertisseur.....	95
Fig. 3.7 : Boucle de régulation du courant de la self.....	97
Fig. 3.8 : Acquisition des données.....	98
Fig. 3.9 : Position des capteurs de température sur le module testé.....	99
Fig. 3.10 : Synoptique de la partie communication et gestion du banc.....	99
Fig. 3.11 : Méthode classique de cyclage.....	100
Fig. 3.12 : Réponses périodiques avec des cycles contrôlés.....	101
Fig. 3.13 : Arbre programmatique du fonctionnement global.....	102
Fig. 3.14 : Arbre programmatique de la gestion des défauts.....	104
Fig. 3.15 : Face avant du programme développé sous LABVIEW.....	105
Fig. 3.16 : Courant et tension du module testé.....	106
Fig. 3.17 : Evolution des températures.....	106
Fig. 3.18 : Schéma utilisé pour l'étude des limites du banc.....	107
Fig. 3.19 : Perte du convertisseur en fonction du courant d'inductance.....	108
Fig. 3.20 : Stockage de l'énergie dans le module testé (SC1).....	108
Fig. 3.21 : prédétermination de $t_1$ et $t_2$ .....	111
Fig. 3.22 : Synoptique du modèle du banc d'essais.....	111
Fig. 3.23 : Validité du modèle simulé.....	112
Fig. 3.24 : Les paramètres qui limitent la profondeur des cycles faites avec le banc d'essai.....	113
Fig. 3.25 : Cycles commandés effectués pour différents courants.....	114
Fig. 3.26 : Variation du rendement en fonction du courant et de la puissance moyenne.....	114
Fig. 3.27 : Variation du rendement en fonction du courant efficace.....	115
Fig. 3.28 : Comparaison du rendement mesuré avec le rendement estimé à l'aide du modèle énergétique simplifié.....	115
Fig. 3.29 : Cycle utilisé pour la caractérisation des supercondensateurs.....	117
Fig. 3.30 : Contrôle de la température des deux éléments 16-17.....	118
Fig. 3.31 : Classement des éléments caractérisés suivant les contraintes thermiques appliqués sur chacun pour des cycles de vieillissement.....	119
Fig. 3.32 : Réponse thermique de certains éléments du module testé.....	120
Fig. 3.33 : Classement des éléments caractérisés suivant les contraintes thermiques appliquées sur chacun pour des cycles de caractérisation.....	120
Fig. 3.34 : Réponse fréquentielle de quatre éléments (1, 12,17, et 19) du module à 29°C.....	121

<i>Fig. 3.35</i> : Réponse fréquentielle des quatre éléments pour trois températures différentes .....	122
<i>Fig. 3.36</i> : Comparaison des résistances série des quatre éléments.....	123
<i>Fig. 3.37</i> : Evolution de la résistance de transmission des quatre éléments en fonction de la température .....	123
<i>Fig. 3.38</i> : Evolution de la capacité de transmission des quatre éléments en fonction de la tension pour trois températures différentes .....	124
<i>Fig. 3.39</i> : Comparaison de la capacité de transmission.....	125
<i>Fig. 3.40</i> : Evolution de la capacité de transmission des quatre éléments en fonction de la température à 1,5V ..	126
<i>Fig. 3.41</i> : Comparaison de la résistance BF des quatre éléments.....	127
<i>Fig. 3.42</i> : Evolution de la résistance équivalente des quatre éléments en fonction de la température .....	127
<i>Fig. 3.43</i> : Comparaison de la résistance équivalente des quatre éléments à 29°C.....	128
<i>Fig. 3.44</i> : Evolution de la résistance énergétique des quatre éléments en fonction de la température.....	128
<i>Fig. 3.45</i> : Comparaison de la résistance énergétique des quatre éléments à 29°C.....	129
<i>Fig. 3.46</i> : Comparaison des résistances énergétiques et équivalentes.....	129
<i>Fig. 3.47</i> : Evolution de la capacité énergétique des quatre éléments en fonction.....	131
<i>Fig. 3.48</i> : Evolution de la capacité énergétique des quatre éléments en fonction de la température à 1,5V.....	131
<i>Fig. 3.49</i> : Comparaison de la capacité énergétique des quatre éléments à 1,5V et 29°C.....	132
<i>Fig. 3.50</i> : Comparaison des différentes capacités qui caractérisent un supercondensateur à 1,5V et 29°C.....	132
<i>Fig. 3.51</i> : Réponse fréquentielle de l'élément 17 avec deux types de cycle pour 50°C.....	133
<i>Fig. 3.52</i> : Comparaison des capacités de transmission.....	134
<i>Fig. 3.53</i> : Utilisation d'un seul type de cycle pour l'étude de vieillissement .....	135
<i>Fig. 3.54</i> : Utilisation de deux types différents de cycle pour l'étude de vieillissement .....	136
<i>Fig. 3.55</i> : Comparaison de l'évolution de la résistance équivalente d'un élément avec la résistance moyenne du module.....	137
<i>Fig. 3.56</i> : Comparaison de l'évolution de la résistance série d'un élément avec la résistance moyenne du module.....	137
<i>Fig. 3.57</i> : Comparaison de l'évolution de la capacité d'un élément avec la résistance moyenne du module .....	138

## *Bibliographie du chapitre 3*

### [C3-1]

P. Bartholomeüs, B. Vulturescu, X. Pierre, N. Rizoug, P. Le Moigne "A 60V-400A test bench for supercapacitor modules," EPE'2003, Toulouse, Septembre 2003.

### [C3-2]

J.P. Gadenne, A.L. Sérurier "Participation au développement d'un banc de caractérisation de supercondensateurs," Rapport TER ECL, Novembre 2001.

### [C3-3]

N. Rizoug, P. Bartholomeüs, P. Le Moigne, B. Vulturescu, "Electrical and thermal behaviour of a supercapacitor module: on-line characterization," ESSCAP'2004, Belfort, France.

### [C3-4]

S. Vivier, "Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application au dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis," Thèse de doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille, 2002.

### [C3-5]

S. Vivier, F. Gillon, P. Brochet, "Optimization techniques derived from experimental design method and their application to the design of a brushless direct current motor," IEEE transactions on magnetics, vol. 37, N° 5, Septembre 2001

### [C3-6]

N. Rizoug, P. Bartholomeüs, B. Vulturescu, X. Pierre, P. Le Moigne, "Voltage sharing in supercapacitor modules : Experimental study," PESC'2004, Aschen, Allemagne, pp. 690-696.

### [C3-7]

A. Hammar, J. Chabas, R. Lallemand, G. Coquery, G. rojat, P. Venet, "Impedance spectroscopy characterization of supercapacitors for railway environment," EPF2004, Berlin, Germany.

### [C3-8]

H.Gualous, D.Bouquain, J.M. Kauffmann, "Variation de la résistance série et de la capacité des supercondensateurs en fonction de la température," EPF'2002 Montpellier, pp 233-237

### [C3-9]

W. Lajnef, O. Briat, S. Azzopardi, E. Woïrgard, J.-M. Vinassa, "Ultracapacitor electrical modeling using temperature dependent parameters," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C3-10]**

D. Linzen, S. Buller, E. Karden, R. W. De Doncker, "Analysis and Evaluation of Charge-Balancing Circuits on Performance, Reliability, and Lifetime of Supercapacitor Systems," IEEE Transactions On Industry Applications, VOL. 41, NO. 5, Septembre/Octobre 2005

**[C3-11]**

N. Rizoug, "Caractérisation d'un module supercondensateur pour des contraintes électriques de type traction," JCGE'2005, Montpellier, France.

**[C3-12]**

G. Coquery, R. Lallemand, J.Kauv, A. De Monts, B. Soucaze-Guillous, J. Chabas, A. Darnault, "First accelerated ageing cycling test on supercapacitors for transportation applications : methodology, first results," ESSCAP'2004, Belfort, France.

**[C3-13]**

P. Desprez, G. Barrailh, P. Lavaur, M. Bariand, C. Jehoulet, " SAFT Supercapacitors cells and batteries," EPE'2003

## *Chapitre 4 :*

*Les phénomènes lents :  
Fuites internes et  
problème du déséquilibre  
de tension*

# Table des matières

## **Chapitre 4 : Les phénomènes lents : Fuites internes et problème du déséquilibre de tension**

<b>IV.1.MISE EN EVIDENCE EXPERIMENTALE DU DESEQUILIBRE .....</b>	<b>146</b>
IV.1.1. CONTEXTE DE CETTE ETUDE.....	146
IV.1.2. CONFIGURATION MATERIELLE.....	146
IV.1.3. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	146
<i>IV.1.3.1. Equilibrage des tensions.....</i>	<i>147</i>
<i>IV.1.3.2. Cycles utilisés pour l'étude du déséquilibre.....</i>	<i>148</i>
IV.1.4. RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	148
<i>IV.1.4.1. Evolution du déséquilibre des 28 éléments .....</i>	<i>148</i>
IV.1.5. CORRELATION ENTRE LA TEMPERATURE DES ELEMENTS DU MODULE ET L'EVOLUTION DE LEUR DESEQUILIBRE DE TENSION.....	150
<i>IV.1.5.1. Evolution de la température de quatre éléments du module .....</i>	<i>150</i>
<i>IV.1.5.2. Evolution du déséquilibre pour les quatre éléments choisis : .....</i>	<i>151</i>
<b>IV.2.INFLUENCE DES PARAMETRES DES MODELES POUR LA MISE EN SERIE.....</b>	<b>151</b>
IV.2.1. MODELE ENERGETIQUE SIMPLIFIE REQ - CEQ .....	152
<i>IV.2.1.1. Cas des éléments présentant des capacités (<math>C_{eq}</math>) différentes.....</i>	<i>152</i>
<i>IV.2.1.2. Cas des éléments présentant des résistances équivalentes (<math>R_{eq}</math>) différentes .....</i>	<i>153</i>
<i>IV.2.1.3. Cas des éléments présentant des résistances de fuite (<math>R_{pf}</math>) différentes .....</i>	<i>153</i>
IV.2.2. MODELE AMELIORE DE LA LIGNE DE TRANSMISSION .....	154
<i>IV.2.2.1. Variation de la résistance série (<math>r_s</math>) .....</i>	<i>155</i>
<i>IV.2.2.2. Variation de la capacité de la ligne de transmission (<math>C</math>) .....</i>	<i>155</i>
<i>IV.2.2.3. Variation de la résistance de la ligne de transmission (<math>R</math>).....</i>	<i>156</i>
<i>IV.2.2.4. Variation de la résistance des fuites (<math>R_{pf}</math>).....</i>	<i>157</i>
<i>IV.2.2.5. Variation de la tension initiale.....</i>	<i>157</i>
<i>IV.2.2.6. Comparaison des résultats obtenus avec le modèle et par l'expérimentation. ..</i>	<i>158</i>
IV.2.2.6.1. Caractérisation des quatre éléments après la stabilisation de la température.....	159
<b>IV.3.CONSIDERATIONS SUR LES FUITES .....</b>	<b>160</b>
IV.3.1 METHODE DE MESURE .....	160
IV.3.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	161
IV.3.3 REMARQUES SUR LES RESULTATS DES ESSAIS DE FUITE.....	163
<b>IV.4. CONCLUSION .....</b>	<b>164</b>

# Chapitre 4

## Les phénomènes lents Fuites internes et Problème du déséquilibre de tension

L'utilisation de supercondensateurs permet d'obtenir des capacités de stockage importantes, mais la tension maximale supportée par l'électrolyte (moins de 2,7V) nécessite leur mise en série pour les applications de forte puissance [C4-1], afin de fonctionner avec des rendements convenables. L'inconvénient de cette méthode est lié au déséquilibre naturel des tensions des éléments en série qui peut apparaître après plusieurs cycles de charge/décharge. Ce déséquilibre est dû au fait que les éléments utilisés ne peuvent être tous identiques. D'ordinaire les constructeurs proposent des dispositifs d'équilibrage aptes à limiter cette dérive en tension. Ces dispositifs sont plus ou moins complexes et peuvent créer des courants de fuite qui peuvent limiter l'autonomie du système. Notre approche a ici pour but de tenter d'identifier les paramètres les plus influents sur le phénomène de déséquilibre. Pour cela, il est tout d'abord nécessaire de trouver un modèle qui mette en évidence le phénomène avec des tendances comparables à celles observées expérimentalement.

Les modèles utilisés dans ce chapitre sont ceux définies dans le deuxième chapitre, à savoir :

- le modèle énergétique Req-Ceq
- le modèle amélioré de la ligne de transmission qui repose sur l'aspect physique des phénomènes internes du supercondensateur.

Il faut noter que ces modèles sont adaptés aux cycles utilisés, mais ne prennent pas en compte les phénomènes très basse fréquence pouvant apparaître sur un nombre de cycles important. Ainsi, les phénomènes de fuite et de redistribution lente n'ont pas été pris en compte.

## IV.1. Mise en évidence expérimentale du déséquilibre

### IV.1.1. Contexte de cette étude

Les résultats expérimentaux de cette partie ont été présentés à la conférence PESC 2004 [C4-2]. Cette communication avait mis en évidence l'effet du cyclage sur le déséquilibre de tension des éléments du module. A cette époque la configuration du module n'avait pas encore été modifiée. Celui-ci comprenait encore 28 éléments. De plus le refroidissement était moins efficace et donc les écarts de température étaient plus importants.

### IV.1.2. Configuration matérielle

Lorsque l'on souhaite observer des phénomènes particuliers lors d'expérimentations, surtout lorsque ce sont des phénomènes lents qui mettent en jeux des déséquilibres qui sont liés à de très faibles écarts d'énergie, il est primordial de veiller à ce que rien ne puisse perturber les résultats expérimentaux. En général, ce sont les capteurs qui peuvent perturber les mesures du fait de leur présence. Le choix technologique des capteurs de tension de chaque élément s'est porté, pour des problèmes de coût (28 capteurs par modules), sur des amplificateurs différentiels à haute tension de mode commun. Cette particularité implique un déséquilibre des impédances de mode différentiel vues par les éléments supercondensateurs. En effet, bien que les impédances de mode commun des amplificateurs différentiels soient très grandes (200k $\Omega$ ), les courants de circulation des éléments dépendent de leur position dans le module. De ce fait, c'est l'élément qui est directement connecté au point de masse des capteurs qui voit le plus grand courant consommé (c'est l'ensemble des courants consommés par les capteurs). Pour éviter ce déséquilibre, les impédances ont été corrigées, de ce fait, chaque élément supercondensateur se voit connecté à une impédance identique de quelques centaines d'Ohms (290 $\Omega$ ). Ces impédances constituent donc un système d'équilibrage qui a une faible efficacité mais qui tend à limiter le déséquilibre du système. Il n'est donc pas possible de connaître le comportement du module sans aucun système d'équilibrage mais on peut considérer que, compte tenu des valeurs des impédances, on s'y approche.

### IV.1.3. Procédure expérimentale

La mise en évidence du déséquilibre lors du cyclage nous oblige à faire des cycles de manière continue et en nombre important afin d'observer ce phénomène de manière sensible.

La procédure utilisée est la suivante :

- ✓ Equilibrage forcé des tensions des éléments supercondensateurs.
- ✓ Suppression du système d'équilibrage
- ✓ Cyclage du module
- ✓ Acquisition de façon périodique des tensions de fin de cycles des éléments du module
- ✓ Comparaison des tensions de fin de cycles à la moyenne des tensions du module.

### IV.1.3.1. Equilibrage des tensions

Avant de commencer le cyclage, les tensions des éléments supercondensateurs sont équilibrées [C4-3]. La tension à laquelle tous les éléments seront alignés est calculée par simulation du banc avec les cycles imposés. Cette simulation permet de trouver la tension de fin de cycle après la stabilisation de la réponse du module.

L'équilibrage en tension des 28 éléments supercondensateurs est réalisé en mettant des résistances identiques ( $R_{eq1}$ ) en parallèle avec chaque élément. La valeur de la résistance  $R_{eq1}$  est très faible et est choisie en fonction du temps d'équilibrage voulu.

La figure 4.1. présente le dispositif expérimental d'équilibrage.

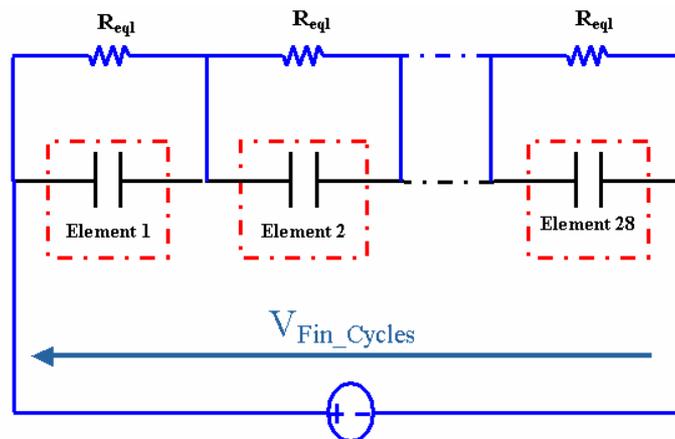


Fig. 4.1. : Equilibrage des tensions avant le cyclage

Ce dispositif permet de forcer l'équilibrage pour avoir à la fin de cette phase des tensions toutes identiques ( $V_{Fin\_cycles}/28$ ) aux bornes de chaque élément. Dès que la tension des éléments atteint ce niveau, on supprime le système d'équilibrage. La figure 4.2. présente l'état des tensions des 28 éléments après la phase d'équilibrage en fonction de leur indice (figure de gauche) et en fonction de leur position dans le module (figure de droite).

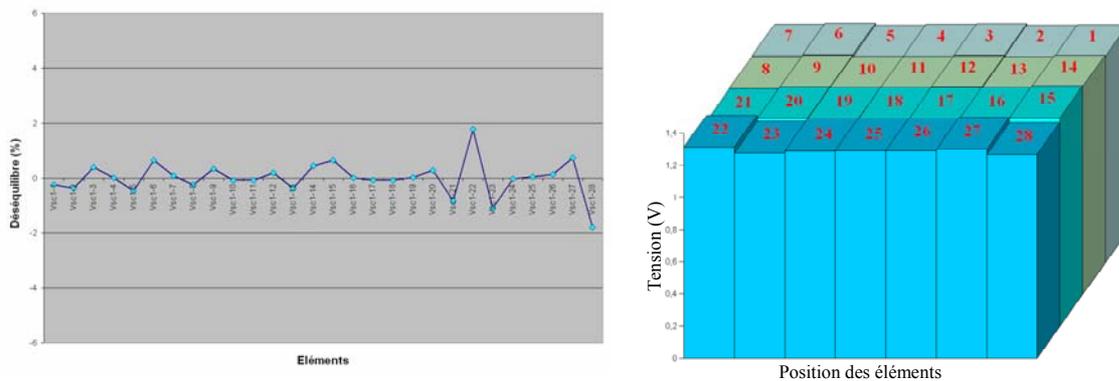


Fig. 4.2. : Etat de la tension des éléments après la phase d'équilibrage

Notons que le déséquilibre initial est inférieur à 2%. Ce déséquilibre initial est soit lié à la tolérance des résistances d'équilibrage, soit lié au temps d'équilibrage trop court pour réduire cette erreur.

### IV.1.3.2. Cycles utilisés pour l'étude du déséquilibre

La figure 4.3. présente le cycle utilisé pour l'étude de déséquilibre ainsi que les paramètres de ce cycle. Ils sont du même type que ceux présentés dans le chapitre 3, définis de façon à créer un cycle périodique basé sur une tension seuil de module de 56V et une durée de décharge fixe (17s) à 100A.

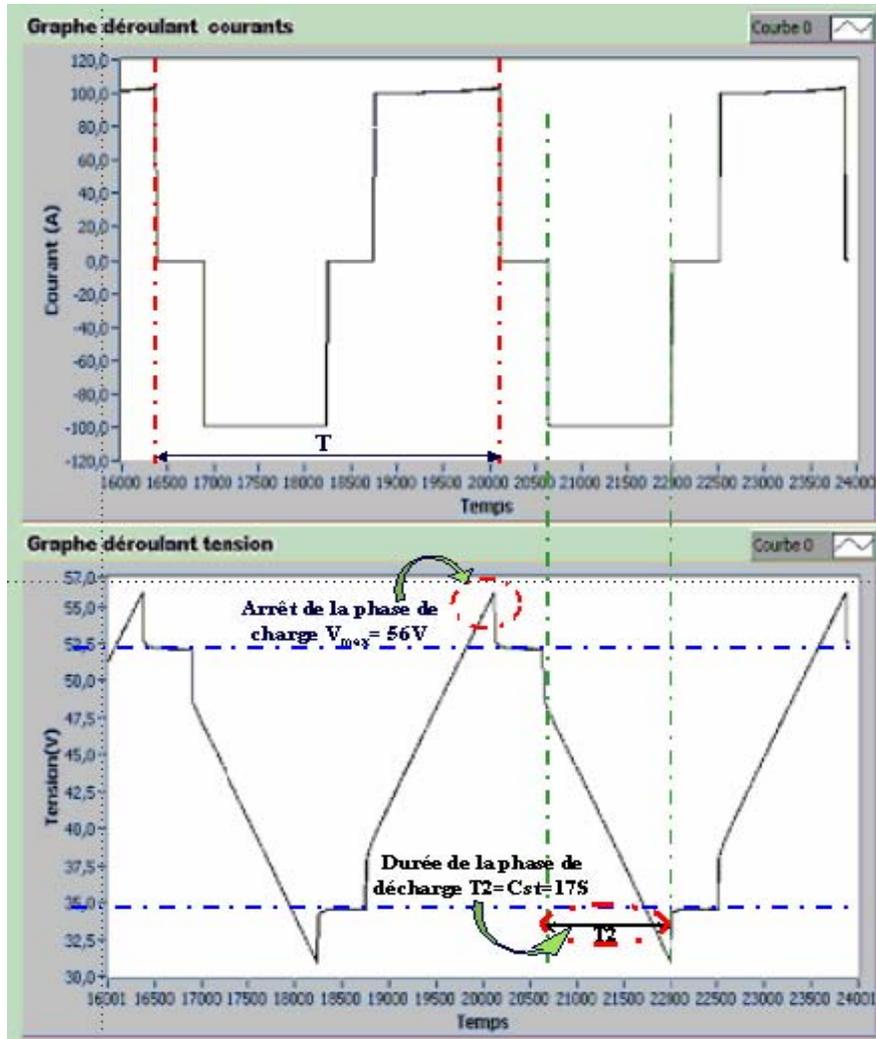


Fig. 4.3. : Cycle utilisé pour l'étude du déséquilibre de tension

## IV.1.4. Résultats expérimentaux

### IV.1.4.1. Evolution du déséquilibre des 28 éléments

Après la phase d'équilibrage décrite précédemment, on commence le cyclage. Périodiquement et après un nombre choisi de cycles, l'acquisition des tensions de fin de cycles est effectuée. Ces données permettent de suivre l'évolution du déséquilibre de chaque élément le long du cyclage [C4-2]. La figure 4.4. montre l'évolution de ce déséquilibre durant les 676 premiers cycles effectués.

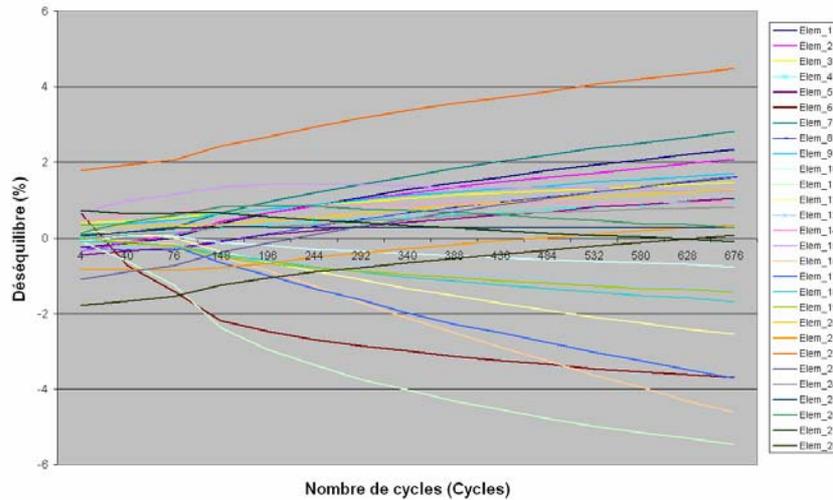


Fig. 4.4. : Evolution du déséquilibre pour les 676 premiers cycles

La figure 4.4. montre la variation de la tension de chaque élément par rapport à la moyenne des tensions. Pour ces 676 cycles, la divergence est relativement rapide et elle atteint environ 5%. Notons qu'à la fin de ce relevé, la croissance du déséquilibre tend à se réduire. La figure 4.5. montre l'évolution du déséquilibre pour un nombre important de cycles (entre 4000 et 13000 cycles).

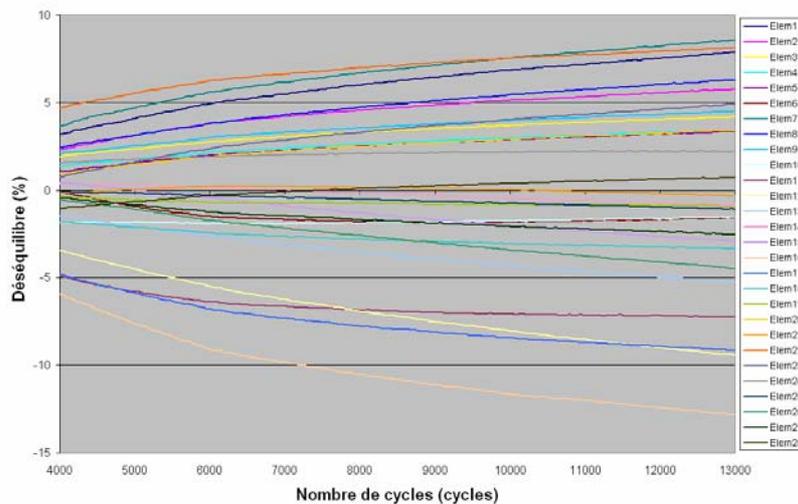
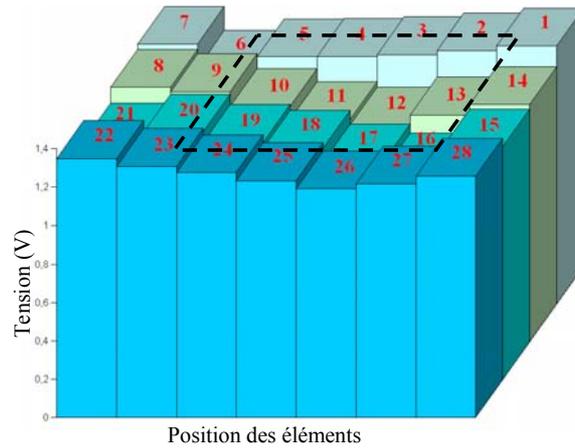


Fig. 4.5. : Evolution du déséquilibre entre 4000 et 13000 cycles

Pour ces 9000 derniers cycles, la variation de déséquilibre ne dépasse pas 6%. Ainsi, cette évolution est nettement plus limitée que dans la phase de démarrage. Cette stabilisation peut être due à la stabilisation en température des éléments supercondensateur et/ou à une diminution des phénomènes de redistribution après un certain nombre de cycles.

Ces résultats mettent en évidence la différence de comportement des éléments puisque le sens d'évolution du déséquilibre n'est pas le même pour tous les éléments. Afin d'avoir une idée de la dispersion en 3D du déséquilibre entre tous les éléments supercondensateurs, l'état des tensions pour les 28 éléments du module après ces 13000 cycles est présenté sur la figure 4.6.



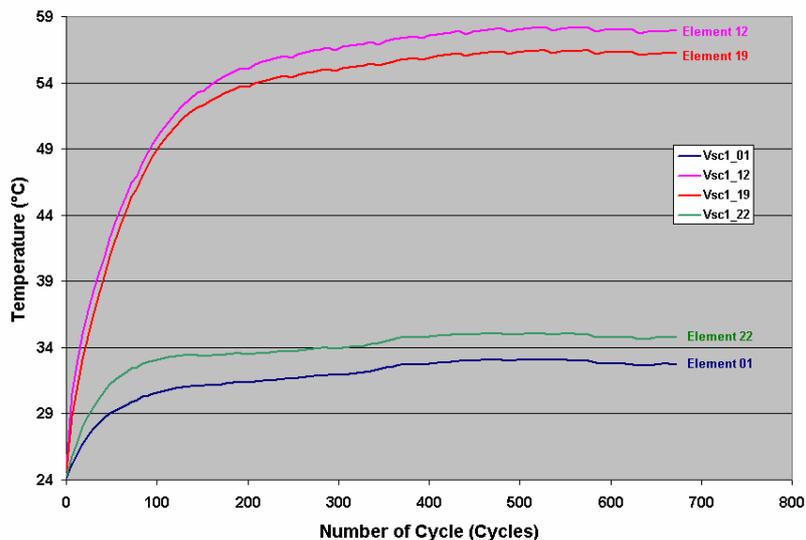
**Fig. 4.6. : Corrélation entre la position des éléments et l'évolution de leur déséquilibre**

Cette figure montre la tension des éléments supercondensateurs après 13000 cycles. Dans cette présentation, on a conservé la position de chaque élément dans le module. Cette représentation des tensions montre que la tension des éléments du centre est moins importante que celle des éléments périphériques. Ce regroupement des éléments évoluant de façon similaire tend à montrer l'influence de la température sur le déséquilibre [C4-3].

#### IV.1.5. Corrélation entre la température des éléments du module et l'évolution de leur déséquilibre de tension

##### IV.1.5.1. Evolution de la température de quatre éléments du module

Afin de connaître l'effet de la température des éléments du module sur leur déséquilibre de tension, 4 éléments parmi les 6 qui peuvent être caractérisés ont été choisis. Parmi ces six éléments, on a choisi ceux situés sur une diagonale dans le module (1, 12, 19, 22). Ce choix a été fait afin de prendre des éléments qui ont différentes températures représentatives du module (deux éléments d'extrémité (1 et 22) et deux éléments du centre (12 et 19)). La figure 4.7. présente l'évolution de la température de ces quatre éléments en fonction du nombre de cycles effectués.



**Fig. 4.7. : Evolution de la température des quatre éléments (1, 12, 19 et 22) en fonction du nombre de cycles effectués**

Cette figure montre que la température des éléments du centre (éléments 12 et 19) est très supérieure à celle des éléments d'extrémité (éléments 1 et 22). Cette différence est due au fait que les éléments d'extrémité bénéficient des effets du système de ventilation. Après la stabilisation de la température, il y a plus de 23°C de différence entre les deux zones.

#### IV.1.5.2. Evolution du déséquilibre pour les quatre éléments choisis :

Afin de chercher une éventuelle corrélation entre la température des éléments et leur déséquilibre, on a présenté sur la figure 4.8. l'évolution du déséquilibre pour les quatre éléments choisis (1, 12, 19 et 22) pour les 676 premiers cycles. Ces tendances sont vérifiées jusqu'à la fin des essais.

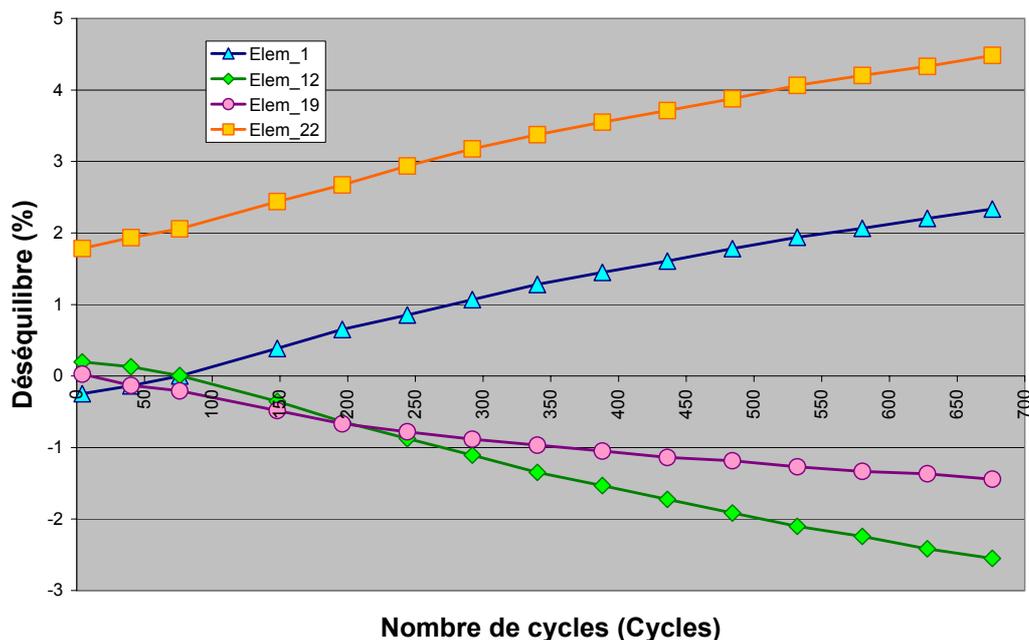


Fig. 4.8. : Evolution du déséquilibre des quatre éléments (1, 12, 19 et 22) en fonction du nombre de cycles effectués

Cette figure montre que la tension des deux éléments du centre (éléments chauds, 12 et 19) a tendance à diminuer par rapport à la moyenne des tensions du module. Par contre, la tension des deux autres éléments (éléments plus froids, 1 et 22) tend à augmenter. Cette tendance observée pour ces quatre éléments témoigne de l'existence d'une corrélation entre l'écart de température des éléments et l'évolution de leur déséquilibre de tension. Les résultats de la figure 4.6 confirme également cela puisque les éléments situés au centre sont plus chaud que les éléments de la périphérie du module.

## IV.2. Influence des paramètres des modèles pour la mise en série.

Les résultats expérimentaux ont montré que le déséquilibre en tension croît lors du cyclage. Comme nous connaissons maintenant le comportement réel d'un tel dispositif, nous pouvons vérifier si les modèles définis au deuxième chapitre peuvent permettre de comprendre ces phénomènes. Le phénomène du déséquilibre de tension est un phénomène

qui s'observe à long terme, ce qui nous amène à introduire une résistance de fuites dans le modèle global. Comme nous le verrons à la fin de ce chapitre, le phénomène de fuite est trop complexe pour être modélisé par une simple résistance. C'est cependant ce modèle qui a été choisi pour une première approche.

Afin de savoir si ces modèles peuvent justifier une source de déséquilibre, on simule la réponse de deux éléments supercondensateurs (2700F/2,3V) mis en série. Au départ les deux éléments possèdent la même tension initiale (1V) et on simule des cycles contrôlés similaires à ceux utilisés dans l'essai de déséquilibre, en regardant l'influence de la variation des différents paramètres des modèles.

### IV.2.1. Modèle énergétique simplifié Req - Ceq

Le modèle énergétique simplifié est caractérisé par une résistance  $R_{eq}$  en série avec une capacité non linéaire  $C_{eq}$  qui varie en fonction de la tension. La figure 4.9. montre le modèle énergétique simplifié avec l'utilisation d'une résistance en parallèle avec la capacité pour modéliser les éventuelles fuites internes du supercondensateur.

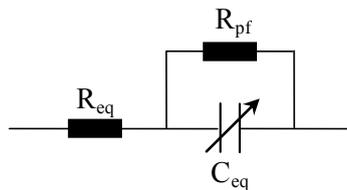


Fig. 4.9. : Modèle énergétique simplifié en prenant en compte les fuites internes

#### IV.2.1.1. Cas des éléments présentant des capacités ( $C_{eq}$ ) différentes

Cette approche doit permettre de déterminer si une différence de capacité peut induire un déséquilibre.

Le premier élément est caractérisé par :

$$R_{eq} = rs + \frac{R}{3} = 0,77m\Omega, R_{pf} = 290\Omega \text{ et } C_{eq}(v) = -250,5v^2 + 1115v + 2010$$

La valeur de  $R_{pf}$  correspond à l'impédance du système de mesure (cf IV.1.2)

Le second présente les mêmes caractéristiques, mais avec une variation de la capacité de +30%. La figure 4.10. montre la réponse du modèle pour ces deux éléments supercondensateurs mis en série, en effectuant des cycles contrôlés.

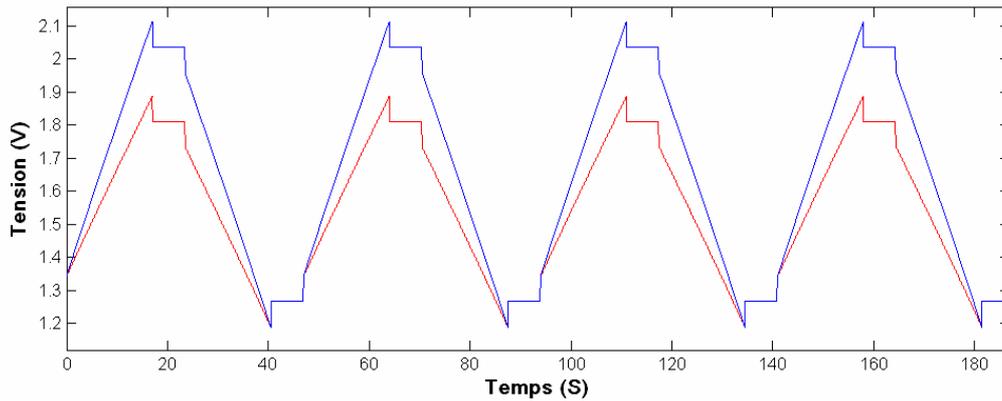


Fig. 4.10. : Influence de la variation de la capacité équivalente sur le déséquilibre de tension

D'après ces résultats, la tension des deux éléments atteint la même valeur (1,27V) à la fin de chaque cycle, ce qui montre qu'en utilisant ce modèle, un déséquilibre ne peut pas être causé par une différence de capacité entre les éléments.

#### IV.2.1.2. Cas des éléments présentant des résistances équivalentes ( $R_{eq}$ ) différentes

Pour étudier l'influence d'une différence de résistance équivalente ( $R_{eq}$ ), on suit les mêmes étapes que précédemment en prenant toujours un élément comme référence et une variation de +30% de la résistance équivalente pour l'autre élément. La figure 4.11. montre la réponse des deux éléments pour des cycles similaires à ceux utilisés précédemment.

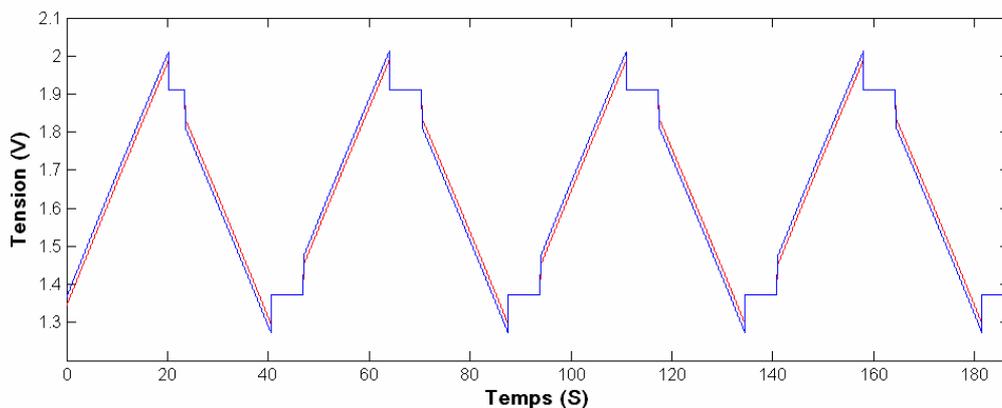


Fig. 4.11. : Influence de la variation de la résistance équivalente sur le déséquilibre de tension

Ces résultats montrent également l'absence d'influence de ce paramètre sur un déséquilibre de tension. La tension des deux éléments retourne au même point après chaque cycle. Ce retour est justifié par la disparition de la chute de tension due aux résistances série au repos ( $I=0$ ), soit après la phase de charge ou bien de décharge.

#### IV.2.1.3. Cas des éléments présentant des résistances de fuite ( $R_{pf}$ ) différentes

En utilisant la même procédure que dans les deux cas précédents, l'influence d'une différence de la résistance qui représente les fuites sur l'évolution du déséquilibre est simulée en prenant une variation de +30% de la résistance des fuites du second élément. La figure 4.12. montre l'évolution de la tension de fin des cycles en fonction du temps. On a représenté l'évolution du déséquilibre pour un temps équivalent à 500 cycles, ce qui permet d'atteindre

la phase d'équilibre statique (pont diviseur résistif).

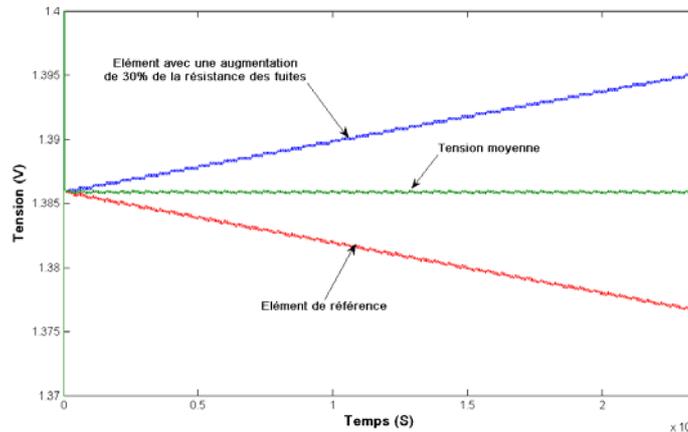


Fig. 4.12. : Influence de la variation de la résistance des fuites sur le déséquilibre de tension

Avec cette variation de résistance des fuites, le déséquilibre évolue comme un système de premier ordre avec une constante de temps  $\tau \approx C \cdot R_{pf} \approx 2700 \cdot 290 = 783000$  Sec. Après une durée de  $5\tau$ , le déséquilibre se stabilise à une valeur correspond à la différence des résistances de fuite.

Après cette étude effectuée avec l'utilisation du modèle énergétique simplifié ( $R_{eq} - C_{eq}$ ) auquel on a ajouté un paramètre de fuite, il apparaît que seules les fuites peuvent influencer l'évolution du déséquilibre de tension. Ainsi seuls les phénomènes de fuites ou éventuellement de redistribution semblent pouvoir justifier l'évolution du déséquilibre.

L'utilisation du modèle énergétique simplifié avec la représentation des fuites par des résistances en parallèle avec les capacités, a montré que l'existence d'une différence de cette résistance de fuite provoque un déséquilibre qui s'accroît et évolue de façon linéaire avec le cyclage.

#### IV.2.2. Modèle amélioré de la ligne de transmission

En utilisant le modèle amélioré de la ligne de transmission et en introduisant une résistance de fuites (Fig. 4.13.), on essaie ici de déterminer, quels sont les paramètres influants sur le déséquilibre.

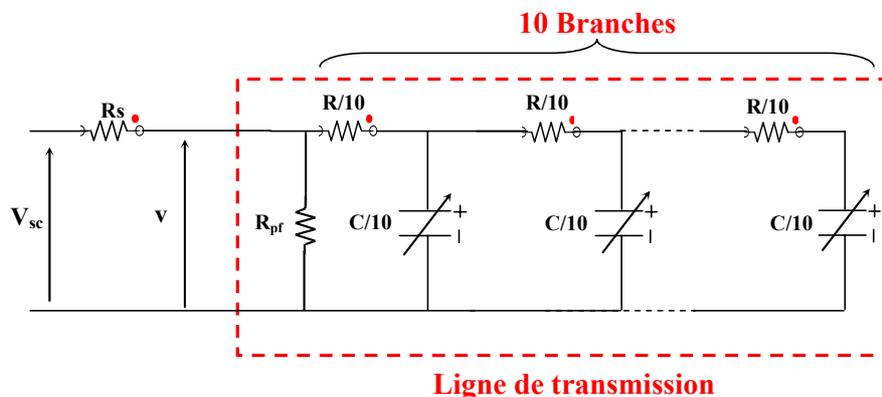
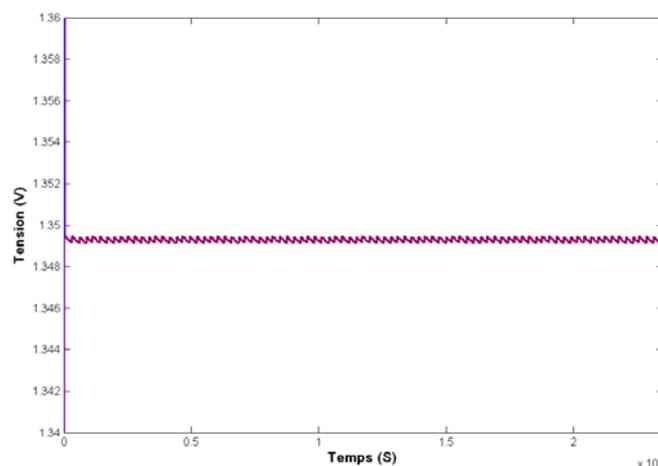


Fig. 4.13. : Modèle simplifié de la ligne de transmission avec la prise en considération des fuites internes

Pour l'élément de référence, on prend les caractéristiques données par le tableau 2.2, avec une ligne de transmission caractérisée par dix branches  $r_i$ - $c_i$ .

#### IV.2.2.1. Variation de la résistance série ( $r_s$ )

Afin de tester l'influence d'une différence de résistance série ( $r_s$ ) (fig. 4.13.) entre deux éléments supercondensateurs sur le déséquilibre, on prend deux éléments supercondensateurs en série. L'un de ces éléments est pris comme référence, l'autre élément possède une résistance série plus grande que celle du premier (+50% par rapport à l'élément référence). Mis à part la résistance série, toutes les autres caractéristiques sont les mêmes. On fait des cycles contrôlés (durée de cycle=47s). Dans ce cas la condition de fin de stockage est faite sur la somme des tensions des deux éléments. La figure 4.14. nous montre l'évolution de la tension de fin de cycle des deux éléments.

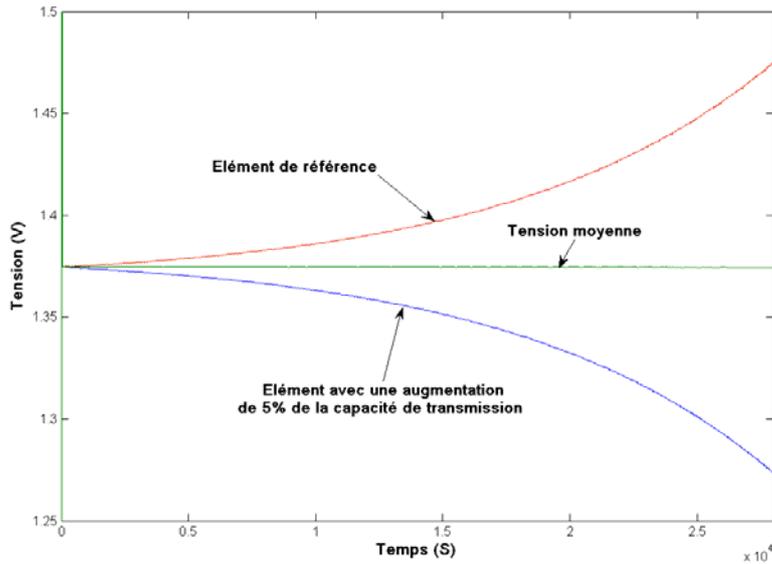


**Fig. 4.14. : Variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 50% de  $r_s$**

On remarque bien qu'avec deux éléments qui n'ont pas la même résistance série, il n'apparaît pas de déséquilibre des tensions puisque la tension de fin de cycle des deux éléments est la même.

#### IV.2.2.2. Variation de la capacité de la ligne de transmission (C)

Le modèle de la ligne de transmission est caractérisé par une résistance constante (R) et une capacité non-linéaire (C) qui varie en fonction de la tension (V) à ses bornes. Afin de faire varier la valeur de cette capacité, on décale la valeur moyenne vers le haut ou vers le bas. Ce décalage est calculé par rapport à la valeur moyenne de la capacité du modèle de référence. Dans notre étude on a choisi un décalage de +5%. La figure 4.15. montre l'évolution de la tension de fin de cycle des deux éléments supercondensateurs (de référence et celui avec la valeur moyenne décalée de +5%), pour des cycles contrôlés. Les deux éléments supercondensateurs possèdent les mêmes caractéristiques, mis à part la capacité de la ligne de transmission.

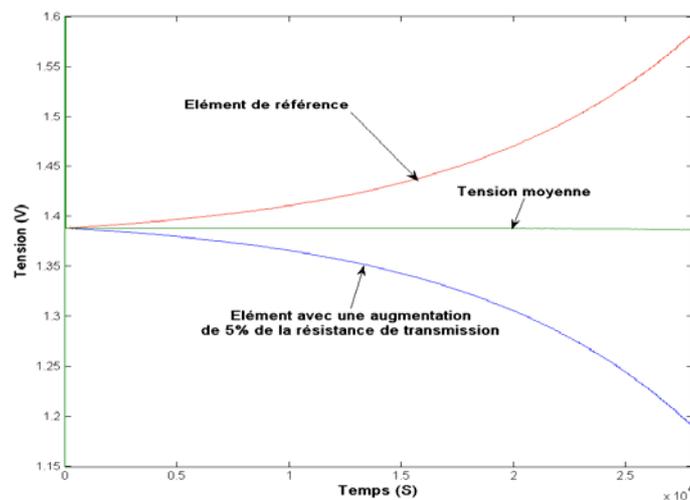


**Fig. 4.15. : Variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 5% de la capacité de transmission**

On remarque qu'avec ce modèle, les deux réponses s'éloignent l'une par rapport à l'autre. Après 500 cycles, on a pour les deux éléments 7% de déséquilibre par rapport à la tension moyenne. La tension de l'élément qui possède la plus grande capacité décroît par rapport à la tension moyenne. Les tensions divergent ici de façon exponentielle, ce qui ne correspond pas au comportement expérimental observé.

#### IV.2.2.3. Variation de la résistance de la ligne de transmission (R)

Le troisième paramètre à tester est la résistance de la ligne de transmission. On suit la même procédure que celle utilisée précédemment en prenant deux éléments supercondensateurs en série, le second élément ayant une différence de +5% sur la valeur de R. On effectue le même type de cycle que pour le cas précédent (cycles contrôlés). La variation de la tension de fin de cycle des deux éléments en fonction du temps écoulé est présentée sur la figure suivante :



**Fig. 4.16. : Variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 5% de la capacité de transmission**

Ces résultats montrent également l'apparition d'un déséquilibre croissant des deux tensions. Après le même nombre de cycles que dans le cas d'une différence de capacité, on relève 13% de déséquilibre des deux éléments par rapport à la tension moyenne. La tension de l'élément qui a la résistance de transmission la plus grande est celle qui a tendance à décroître. Le déséquilibre évolue encore de façon exponentielle et tend à diverger.

#### IV.2.2.4. Variation de la résistance des fuites ( $R_{pf}$ )

En utilisant toujours le même principe, le second élément possède ici une résistance de fuite plus importante (+30%). La figure 4.17. présente l'évolution de la tension de fin de cycles des deux éléments.

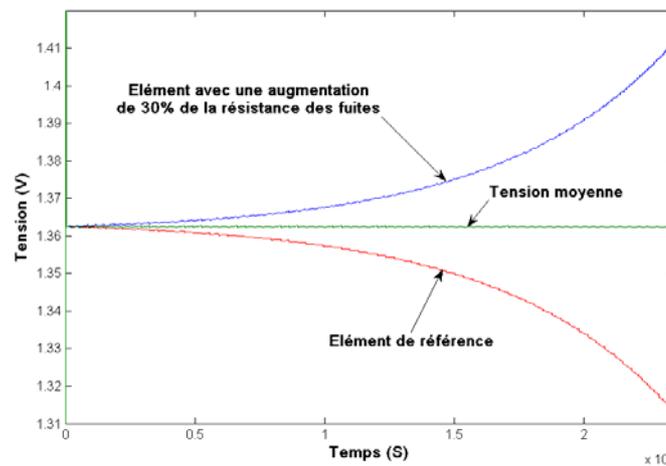
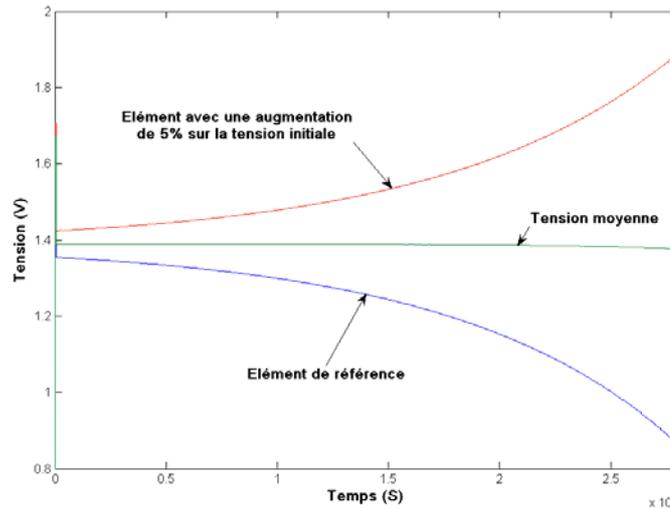


Fig. 4.17. : Variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 30% de la résistance des fuites

La figure 4.17. montre qu'avec une variation de la résistance des fuites, il y a apparition d'un déséquilibre croissant avec le cyclage. Ce dernier augmente de façon exponentielle avec le temps et atteint 3,6% après 500 cycles.

#### IV.2.2.5. Variation de la tension initiale

L'évolution du déséquilibre pour une variation de la capacité de transmission ou bien pour une variation de la résistance de transmission a montré une accentuation du déséquilibre avec l'augmentation de la différence de tension entre les éléments. Afin d'observer l'influence d'une différence de tension à l'état initial sur le déséquilibre, on a simulé l'évolution du déséquilibre pour *deux éléments identiques* en considérant une différence de tension de 5% à l'état initial (Figure 4.18.).



**Fig. 4.18. : Variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 5% de la tension initiale**

Cette figure montre la grande influence de la différence de tension entre deux éléments sur l'évolution du déséquilibre avec ce type de modèle. Après 500 cycles, ce déséquilibre initial atteint 36% de déséquilibre final.

On peut donc se demander, à ce stade, si le modèle de type ligne de transmission est adapté à cette étude car le comportement observé ne paraît pas ressembler au comportement réel.

L'utilisation du modèle simplifié de la ligne de transmission tend à montrer que trois paramètres peuvent influencer l'évolution du déséquilibre de tension. Ces trois caractéristiques classées de la plus influente à la moins influente sont :

- ✓ Un déséquilibre initial
- ✓ la résistance de transmission
- ✓ la capacité de transmission
- ✓ la résistance des fuites

On remarque aussi que l'influence de la résistance de fuites est plus importante que celle observée dans le cas du modèle énergétique simplifié.

#### **IV.2.2.6. Comparaison des résultats obtenus avec le modèle et par l'expérimentation.**

Nous avons pu remarquer que même si l'évolution des déséquilibres, avec ces évolutions exponentielles, n'étaient pas en accord avec l'expérimentation, des tendances existaient. En effet, les éléments qui ont une résistance de ligne de transmission ou une capacité élevée voient leur tension décroître. A partir des résultats de caractérisation qui peuvent être obtenus, il est possible de savoir si ces tendances peuvent être vérifiées expérimentalement. Pour cela, il est possible, en caractérisant les quatre éléments examinés en paragraphe IV.1.4., de le contrôler.

#### IV.2.2.6.1. Caractérisation des quatre éléments après la stabilisation de la température

L'identification des caractéristiques du modèle simplifié de la ligne de transmission pour les quatre éléments permet ensuite de simuler l'évolution du déséquilibre pour ces quatre éléments en introduisant les caractéristiques de chaque élément après la stabilisation de la température. Le tableau suivant présente les caractéristiques et la température de chaque élément après la phase transitoire de la température.

Eléments	Résistance série ( $m\Omega$ )	Résistance de transmission ( $m\Omega$ )	Capacité (F) (à 1,8V)	Température ( $^{\circ}C$ )
<i>Elément 1</i>	<b>0,46</b>	<b>1,04</b>	<b>3046</b>	<b>32,7</b>
<i>Elément 12</i>	<b>0,52</b>	<b>0,98</b>	<b>2850</b>	<b>57,9</b>
<i>Elément 19</i>	<b>0,73</b>	<b>1,02</b>	<b>2895</b>	<b>56,3</b>
<i>Elément 22</i>	<b>0,48</b>	<b>1,17</b>	<b>2920</b>	<b>34,8</b>

Tab. 4.1-Caractéristiques de quatre éléments après la stabilisation de la température

Les résultats présentés dans le tableau montrent que les éléments chauds (élément12, élément19) possèdent une capacité et une résistance de transmission plus faible que celles des éléments froids.

En se basant sur cette comparaison, et d'après les simulations faites avec le modèle simplifié de la ligne de transmission, la tension des éléments chauds (éléments 12 et 19) doit se déséquilibrer et augmenter par rapport à la moyenne des tensions. Le contraire se produit pour la tension des éléments froids (éléments 1 et 22). Ces tendances vont à l'inverse des résultats expérimentaux observés en figures 4.7. et 4.8. .

L'observation des données mesurées montre une interdépendance visible entre l'évolution de la tension et les valeurs de R et C. Comme cette différence de paramètre n'intervient pas sur les modèles circuit développés dans le second chapitre (modèles adaptés aux cycles de l'ordre de la minute), il apparaît nécessaire de s'intéresser au comportement très basse fréquence du composant pour espérer trouver une justification physique à ces phénomènes. Ceci implique d'étudier les courants de fuites qui sont en réalité principalement liés à des phénomènes de redistribution au sein du composant.

Cette approche apparaît justifiée au vu des résultats précédents. En effet, les valeurs de R et C sont directement liées à la mobilité des ions de l'électrolyte dans la surface poreuse de l'électrode. Le phénomène de redistribution repose sur le même principe en considérant des constantes de temps plus longues. Il apparaît probable que les variations relatives au « circuit RC rapide » aient une corrélation avec l'évolution des phénomènes lents au sein du composant. Dans cette optique, nous proposons dans cette fin de chapitre une première approche des phénomènes lents, communément appelés fuites qui pourraient justifier le déséquilibre observé.

### IV.3. Considérations sur les fuites

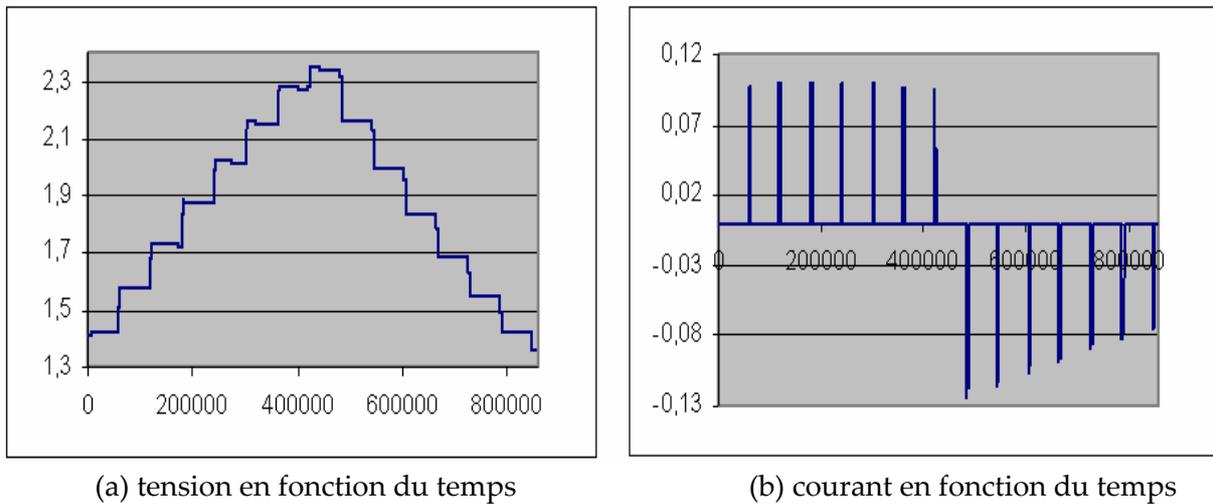
D'après ce qui a été observé précédemment, le seul paramètre qui semble avoir une influence prépondérante et directe sur le déséquilibre est le courant de fuites. Le cyclage a un effet indirect, par l'échauffement qu'il provoque et les écarts de température inévitables si l'on envisage un assemblage en module compact et avec un système de refroidissement simple et peu coûteux. Nous proposons, dans cette partie, de montrer les résultats expérimentaux que nous avons obtenus en test d'autodécharge à température contrôlée [C4-4, C4-5, C4-6, C4-7]. Ces résultats montrent qu'il n'est pas simple de modéliser ce phénomène et que le protocole de mesure a une influence primordiale sur les résultats. C'est pour cette raison que l'interprétation des résultats est extrêmement délicate. Ces résultats seront présentés bruts associés à la procédure de mesure.

#### IV.3.1 Méthode de mesure

L'objectif de ce travail est de définir le comportement du supercondensateur en autodécharge en fonction de sa tension et de sa température [C4-8, C4-9, C4-10], afin d'avoir des informations sur le courant de fuite et plus particulièrement sur l'ordre de grandeur des écarts de courant de fuite en fonction de ces différents paramètres [C4-11]. Nous avons donc souhaité développer une méthode capable de donner ces informations de manière automatique. Le principe est le suivant : Les échantillons de supercondensateurs sont soumis à une température contrôlée très stable (au plus  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ). Ces échantillons sont chargés puis déchargés progressivement par palier. A chaque palier, l'acquisition est faite pendant un temps relativement long (théoriquement suffisant pour que la dérivée de la tension se stabilise ou presque). Lorsque ce point est obtenu, on prend cette valeur et on la multiplie par la capacité équivalente à la tension donnée afin d'obtenir le courant de fuite en régime permanent. La figure 4.19. montre le synoptique du système de mesure. Trois échantillons de supercondensateurs ont été testés et ont donné des résultats très proches. Les échantillons ont été testés à des paliers en charge et en décharge. Les figures 4.20. (a) et (b) montrent respectivement la tension et le courant de charge-décharge d'un élément. Pour les premiers essais, le cycle complet durait 10 jours. Ces essais ont été effectués pour quatre valeurs de températures, ce qui donne au total 40 jours d'essais.



Fig. 4.19. : Synoptique du système de mesure



(a) tension en fonction du temps

(b) courant en fonction du temps

Fig. 4.20. : Tension et courant de charge-décharge d'un élément lors des essais

### IV.3.2 Résultats expérimentaux

La figure 4.21. présente pour les 4 valeurs de température le courant estimé en régime permanent en fonction de la tension.

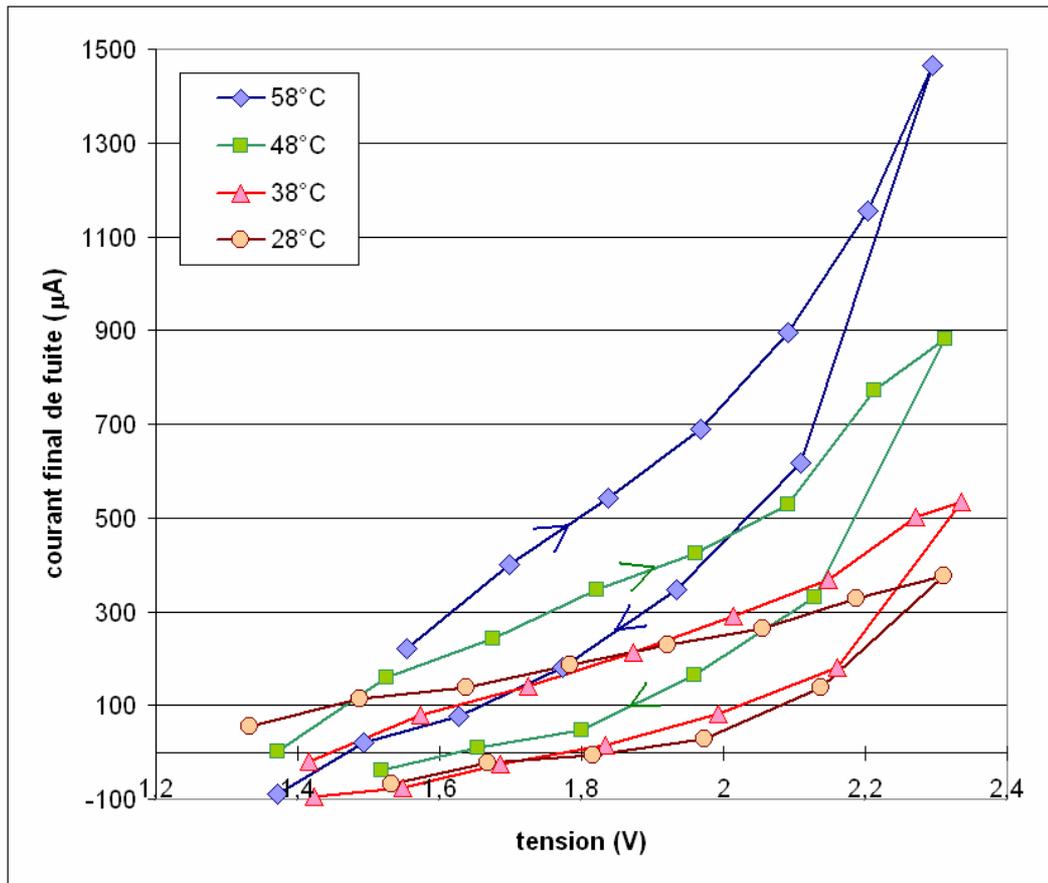


Fig. 4.21. : Courant estimé en régime permanent en fonction de la tension

Sur cette figure on peut remarquer qu'il apparaît comme une sorte d'hystérésis. En effet les points pour la charge se situent au dessus des points pour la décharge. Cette hystérésis doit certainement être due au fait que le temps d'attente en fin de mesure est trop court pour atteindre le régime établi. On peut à partir de ce relevé avoir une valeur approchée d'un des paramètres représentant les fuites dans un supercondensateur. Il est à noter que ces courants sont très faibles et ne représentent qu'une petite partie du phénomène et donc des pertes d'énergie d'autodécharge.

Pour connaître, pour un seul point de mesure, l'ordre du modèle représentant les fuites dans un élément, un second type d'essai a été réalisé. Durant 12 jours, après une période de repos très longue, puis une charge de 0.4V à 1.87V à 250mA, un test d'autodécharge a été effectué à 58°C. La figure 4.22. représente la tension aux bornes du supercondensateur lors de cet essai. Il a été possible, à partir de la dérivée de la tension, d'estimer le courant de repos et les constantes de temps du circuit. Le courant de repos est d'environ 230µA et l'on a dénombré plus de 5 constantes de temps, dont la plus grande est de 350000 secondes, ce qui correspond à 4 jours. Notons que cette constante de temps ne peut pas être négligée compte-tenu du courant auquel elle est associée et à sa durée d'existence. Ceci implique que si l'on souhaite connaître la caractéristique complète, il est quasiment indispensable d'observer ce phénomène jusqu'à ce que l'on obtienne la plus grande des constantes de temps ayant un effet significatif sur la caractéristique d'autodécharge. Dans le cas contraire, les paramètres obtenus pour un point de mesure ne permettront pas de prédéterminer la caractéristique

pour un autre essai. De plus, obtenir les paramètres d'un modèle à 5 constantes de temps dont les valeurs peuvent varier avec la tension ou la température, est quasiment impossible.

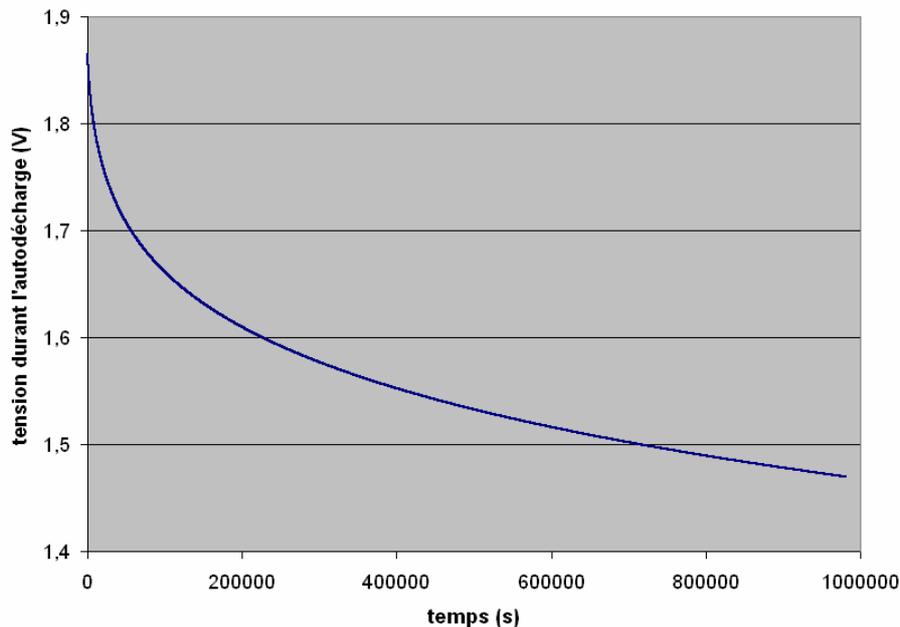


Fig. 4.22. : Tension aux bornes du supercondensateur lors de l'essai d'autodécharge à 58°C

### IV.3.3 Remarques sur les résultats des essais de fuite

D'après ce qui a été observé précédemment, compte-tenu des constantes de temps existantes, de grandes précautions doivent être prises lors de la préparation des essais : deux essais qui semblent être effectués dans des conditions similaires peuvent donner des résultats différents si les conditions préalables aux tests sont différentes. Le passé a donc une forte influence. C'est là d'ailleurs, la principale particularité de ce type d'essai.

Remarquons que pour modéliser le déséquilibre, il n'est pas nécessaire de connaître les caractéristiques précises d'autodécharge de chacun des éléments, mais de connaître les écarts entre ces caractéristiques. On peut alors faire des tests d'autodécharge durant le cyclage (aux températures réelles d'utilisation) en stoppant le cyclage et en mesurant les tensions durant quelques minutes pour savoir comment évoluent les différents éléments. C'est une des pistes d'investigation que nous privilégions pour la suite de ce travail.

## IV.4. Conclusion

Au début de la vie d'un module de supercondensateur, ses éléments ont des caractéristiques très semblables. Mais au fil du temps ils subissent des contraintes différentes et se modifient tous en fonction de ce qu'ils ont vécu. Le déséquilibre va donc être de plus en plus difficile à compenser au fur et à mesure que le module vieillit. Ceci peut alors entraîner un effet d'emballement de la dégradation du dispositif. L'objet du chapitre est de tenter d'identifier les paramètres influençant fortement le déséquilibre. L'objectif final de cette étude, qui n'a pu être abordé ici, est le choix, le dimensionnement et l'optimisation des dispositifs d'équilibrage indispensables pour l'intégration de ce composant dans les systèmes électriques.

Les essais expérimentaux présentés dans ce chapitre ont mis en évidence ce déséquilibre lié à la présence d'éléments de caractéristiques différentes et traversés par le même courant. Il a été montré qu'il y avait un lien entre ce phénomène et l'effet de dispersion de température lorsque le module est utilisé en cyclage. Nous avons ensuite utilisé les modèles développés au deuxième chapitre pour tenter de trouver les paramètres qui avaient une influence sur le déséquilibre. Ces modèles caractérisés pour des durées de fonctionnement de quelques dizaines de secondes se sont montrés inefficaces pour expliquer le déséquilibre de tension. Afin d'améliorer la compréhension de ce phénomène, une caractérisation de l'effet de fuite interne et de redistribution a été entreprise. Celle-ci a montré que ces phénomènes sont complexes et ont des constantes de temps très longues. Il n'est donc pas simple de modéliser le déséquilibre car cela met en présence des phénomènes de durée courte (le cyclage) et d'autre de durée très longue. Ces mesures de déséquilibres doivent donc être poursuivies en parallèle aux essais de vieillissement afin d'avoir un retour d'expérience sur ce phénomène sur le long terme, l'objectif étant toujours d'identifier la cause du déséquilibre afin de dimensionner rationnellement le système d'équilibrage nécessaire.



## Figures du chapitre 4

Fig. 4.1 : Equilibrage des tensions avant le cyclage.....	147
Fig. 4.2 : Etat de la tension des éléments après la phase d'équilibrage.....	147
Fig. 4.3 : Cycle utilisé pour l'étude du déséquilibre de tension .....	148
Fig. 4.4 : Evolution du déséquilibre pour les 676 premiers cycles.....	149
Fig. 4.5 : Evolution du déséquilibre entre 4000 et 13000 cycles.....	149
Fig. 4.6 : Corrélation entre la position des éléments et l'évolution de leur déséquilibre .....	150
Fig. 4.7 : Evolution de la température des quatre éléments (1, 12, 19 et 22) en fonction du nombre de cycles effectués .....	150
Fig. 4.8 : Evolution du déséquilibre des quatre éléments (1, 12, 19 et 22) en fonction du nombre de cycles effectués .....	151
Fig. 4.9 : Modèle énergétique simplifié en prenant en compte les fuites internes .....	152
Fig. 4.10 : Influence de la variation de la capacité équivalente sur le déséquilibre de tension .....	153
Fig. 4.11 : Influence de la variation de la résistance équivalente sur le déséquilibre de tension .....	153
Fig. 4.12 : influence de la variation de la résistance des fuites sur le déséquilibre de tension.....	154
Fig. 4.13 : Modèle simplifié de la ligne de transmission avec la prise en considération des fuites internes.....	154
Fig. 4.14 : variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 50% de $r_s$ .....	155
Fig. 4.15 : variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 5% de la capacité de transmission.....	156
Fig. 4.16 : Variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 5% de la capacité de transmission.....	156
Fig. 4.17 : variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 30% de la résistance des fuites.....	157
Fig. 4.18 : Variation de la tension de fin de cycle pour deux éléments supercondensateurs avec une différence de 5% de la tension initiale .....	158
Fig. 4.19 : Synoptique du système de mesure .....	161
Fig. 4.20 : Tension et courant de charge-décharge d'un élément lors des essais .....	161
Fig. 4.21 : Courant estimé en régime permanent en fonction de la tension .....	162
Fig. 4.22 : Tension aux bornes du supercondensateur lors de l'essai d'autodécharge à 58°C .....	163

## *Bibliographie du chapitre 4*

### [C4-1]

P. Barrade, "Series Connection of supercapacitors: comparative study of solutions for the active equalization of the voltages," *Electrimacs*, Montréal, Canada, 18-21 Août 2005.

### [C4-2]

N. Rizoug, P. Bartholomeüs, B. Vulturescu, X. Pierre, P. Le Moigne, "Voltage sharing in supercapacitor modules: Experimental study," *PESC'2004*, Aschen, Allemagne, pp. 690-696.

### [C4-3]

N. Rizoug, P. Bartholomeüs, P. Le Moigne, B. Vulturescu, "Electrical and thermal behaviour of a supercapacitor module: on-line characterization," *ESSCAP'2004*, Belfort, France.

### [C4-4]

J.C. Lassègues « Laboratoire de physico-chimie moléculaire de l'université de Bordeaux1 (France) », "Supercondensateurs," *Techniques de l'ingénieur*, D3 334.

### [C4-5]

P. Desprez, G. Barrailh, P. Lavour, M. Bariand, C. Jehoulet, "SAFT Supercapacitors cells and batteries," *EPE'2003*

### [C4-6]

K. Shukla, S. Sampath et K. Vijayamohanan, "Electrochemical supercapacitors: Energy storage beyond batteries," *Current Science*, vol. 79, n°12, 25 December 2000.

### [C4-7]

NEC/TOKIN, *Devices thru material innovation*, "Super Capacitor thin type," Vol. 2.

### [C4-8]

M. Hahn, M. Bärtsch, B. Schnyder, R. Kötz, O. Haas, M. Carlen (ABB), D. Evard (Leclanché S.A.), "Supercapacitors based on glassy carbon and sulfuric acid-mechanisms of self-discharge," *PSI Scientific Report 2000*, Volume V, General Energy, p. 67, Mars 2001.

### [C4-9]

X. Jiang, J. Polastre, et D. Culler, "Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks," *IPSN '05*, pages 463–468. IEEE, Piscataway, NJ, Avril 2005.

**[C4-10]**

David A. New John G. Kassakian Joel E. Shindall David J. Perreault, “Double Layer Capacitors: Automotive Applications and Modeling,” MIT/Industry Consortium on Advanced Automotive Electrical/Electronic Components and Systems.

**[C4-11]**

C. N. Ashtiani, A. Schell, O. Bische, G. L. Hunt, R. B. Wright, “Ultracapacitor test procedure standards for automotive and industrial applications,” IEEE Power Electronics Society NEWSLETTER, Vol. 17, N° 1, 2005.



# Conclusion générale



# Conclusion générale

---

---

Ce mémoire présente un travail sur le comportement électrique et énergétique des supercondensateurs dans des applications de type traction électrique. Cette étude doit être un outil de compréhension du comportement des supercondensateurs afin de les exploiter dans les applications « courant fort » telles que le transport, les énergies renouvelables.

En premier lieu, la modélisation du composant nous a paru indispensable pour le reste du travail. Pour cela, on a développé deux modèles qui représentent le comportement énergétique et électrique des supercondensateurs. Ces modèles sont basés sur les phénomènes internes qui apparaissent durant les phases de charge/décharge du supercondensateur. Le premier modèle étudié est basé sur le comportement de la ligne de transmission, et est valide pour une fréquence inférieure à la fréquence de caractérisation. Un deuxième modèle, plus simple, a ensuite été déduit du premier. Celui-ci est plus rapide à simuler et représente bien le comportement énergétique. Si les modèles choisis étaient préalablement connus dans la littérature scientifique, l'identification « simple » des paramètres de ces modèles a été un objectif important du travail. C'est pourquoi les différentes approches connues ont été confrontées pour aboutir à une méthode d'identification, associant des mesures temporelles et fréquentielles. Ces méthodes de caractérisation peuvent être mise en œuvre à l'aide du banc de test, sans appareil de mesure supplémentaire, et surtout sans aucun démontage et manipulation d'élément du banc. Ainsi, cette caractérisation a pu être réalisée à l'aide du banc de test et des mesures directes de cyclage automatique et rapide. Les paramètres des modèles ( $r_s$ ,  $R$  et  $C$ ) peuvent être ainsi extraits des cycles de vieillissement, hormis la caractéristique complète  $C(v)$  nécessitant des essais de charge/décharge complets.

La validité de ces modèles a été testée pour un module de supercondensateurs (112F/48V), constitué de 24 composants 2700F/2,3V fabriqués par Maxwell sur un banc d'essai développé au L2EP. Ce dernier permet de faire une caractérisation du module complet et de certains éléments du module. Par ailleurs, ce banc assure une reconstitution des conditions d'utilisation des supercondensateurs dans le domaine de la traction électrique. Afin de minimiser les pertes d'énergie du système, un autre module (100F/56V) a été utilisé comme tampon. Le transit d'énergie entre les deux modules (module testé et celui utilisé comme tampon) est assuré par un hacheur quatre quadrants. Le fonctionnement de manière continue (cyclage 24h/24h) de ce banc nous a obligé à installer un système performant de sécurité afin de surveiller l'échauffement et la surtension des éléments.

Avec le banc de test, on a effectué des premiers tests sur le rendement des supercondensateurs avec différents type de cycle (variation du courant de charge/décharge et la variation du courant efficace). Ces essais ont montré une diminution du rendement avec l'augmentation du courant efficace, et d'autre part, également avec l'augmentation du courant de charge/décharge à courant efficace constant.

En deuxième lieu, on a effectué une caractérisation de quatre éléments du module avec un suivi de l'évolution des caractéristiques de chaque élément en fonction de la température. Cette caractérisation a montré une diminution de la résistance série  $r_s$  et de la résistance de transmission en fonction de la température, avec une variation plus importante pour cette dernière pour la même gamme de température (20°C à 60°C). On a relevé la même tendance pour la capacité avec une faible diminution de cette dernière en fonction de la température. Il a été également remarqué que le vieillissement est moins accentué sur les éléments subissant moins de contraintes thermiques lors du cyclage (éléments 1 et 22). En effet, ces éléments 1 et 22 présentent à température identique une capacité plus grande et des résistances ( $r_s$  et  $R_{eq}$ ) plus faibles que les éléments plus sollicités du centre.

L'observation du vieillissement du module et de l'élément 17 pour les 200.000 premiers cycles a permis de suivre la dégradation des caractéristiques ( $R$ ,  $r_s$  et  $C$ ) des supercondensateurs en fonction du nombre de cycles effectués. Cette dégradation se manifeste par une augmentation des résistances et une diminution de la capacité de stockage. La faible dégradation relevée pour toutes ces caractéristiques témoigne d'une très grande espérance de vie de ces composants et de la nécessité de faire subir au composant des essais très contraignant si on souhaite étudier le vieillissement.

Enfin, un des objectifs initial était d'aborder le problème de mise en série du composant puisque c'est un point clé de son utilisation en Génie Electrique. Les essais de cyclage réalisés sans dispositif d'équilibrage (hormis le système de mesure) ont permis d'observer une dispersion naturelle des tensions dépendant de la localisation du composant dans le module. L'utilisation des modèles développés dans le chapitre 2 qui ont été caractérisés pour des constantes de temps de quelques minutes au plus, n'a pas permis de justifier cette dérive. On a relevé tout de même une corrélation entre les grandeurs ( $R$  et  $C$ ) et la tendance d'évolution de la tension. Comme ces paramètres sont liés au comportement ionique du composant (phénomène de déplacement des ions), il apparaît probable que la compréhension de ce phénomène nécessite la prise en compte des phénomènes de redistribution étroitement lié également au comportement ionique du composant. Cette étude constitue une prochaine étape de travail au niveau du composant.

En conclusion, les travaux et essais réalisés au cours de cette étude ont permis de mettre en évidence l'intérêt du composant mais aussi la difficulté à aborder les phénomènes physiques apparaissant, compte tenu des différentes constantes de temps nécessaires à la prise en compte de tous les phénomènes présents (transmission, redistribution). Par contre, une contrainte clé nous est apparue rapidement du fait de la disposition du module testé, à savoir la contrainte thermique. En effet, l'hétérogénéité des températures dans le module en cyclage a mis en évidence une disparité rapide des caractéristiques de ces composants. Il est clair qu'un des objectifs majeurs pour la mise en place de modules de supercondensateurs de forte longévité est d'intégrer cette contrainte d'homogénéité thermique dès la conception. Dès lors, le vieillissement gagnera nécessairement en uniformité et optimisera la durée de vie du système. De plus, il devrait apporter un meilleur comportement au niveau du déséquilibre naturel et permettre d'optimiser le dimensionnement des dispositifs d'équilibrage nécessaires au fonctionnement sécurisé du module.

Un point qui n'a pu être abordé lors de cette étude concerne le dimensionnement des dispositifs d'équilibrage. Sa résolution avec des dispositifs optimisés (coût, rendement) constitue une perspective de travail complémentaire à l'étude présentée dans ce mémoire.

Différentes perspectives sont à envisager pour améliorer notre approche tant au niveau des modèles que de l'expérimentation de façon à aboutir à une maîtrise du comportement électrique des modules de supercondensateurs :

- intégration de la contrainte thermique,
- prise en compte des phénomènes de redistribution,
- vieillissement accéléré,
- intégration des contraintes spécifiques des applications,
- .....



# Résumé

---

Ce mémoire présente un travail sur le comportement électrique et énergétique des supercondensateurs dans des applications de type traction électrique. Il développe un outil de caractérisation du comportement des supercondensateurs afin de les exploiter dans les applications « courant fort » telles que le transport. Le banc de test développé dans notre laboratoire a permis la caractérisation d'un module de supercondensateurs 112F-48V constitué de 24 composants Maxwell 2700F/2,3V.

En premier lieu, la modélisation du composant nous a paru indispensable pour représenter le comportement de ces composants. Pour cela, deux modèles représentant le comportement énergétique et électrique des supercondensateurs ont été développés. Différentes approches connues ont été confrontées pour aboutir à une méthode simple d'identification, associant des mesures temporelles et fréquentielles.

En utilisant ces modèles, une caractérisation de quatre éléments du module avec un suivi de l'évolution des caractéristiques de chaque élément a été effectuée en fonction de la température. D'autre part, l'observation du vieillissement du module et d'un élément de ce dernier pour les 200.000 premiers cycles a permis de suivre la dégradation des caractéristiques ( $R$ ,  $r_s$  et  $C$ ) des supercondensateurs en fonction du nombre de cycles effectués.

Enfin, un des objectifs initiaux était d'aborder le problème de mise en série du composant afin de l'utiliser en Génie Electrique. Les essais de cyclage réalisés sans dispositif d'équilibrage (hormis les impédances du système de mesure) ont permis d'observer une dispersion naturelle des tensions dépendant de la localisation du composant dans le module.

## Mots clés

---

1	MODULE DE SUPERCONDENSATEURS	5	CARACTERISATION
2	BANC D'ESSAI	6	DESEQUILIBRE DE TENSION
3	CYCLAGE	7	EFFET DE LA TEMPERATURE
4	MODELES	8	VIEILLISSEMENT