

DataPower : Des convertisseurs de puissance comme sources de données pour l'apprentissage machine

Emmanuel ROUX-PALOUMO, Thomas WALTER, Luiz F.L. VILLA, Jean ALINEI

¹LAAS-CNRS, ²Université Paul Sabatier

RESUME - Cet article présente le projet DataPower dont l'objectif est d'utiliser des chaînes d'acquisition embarquées de convertisseurs de puissance comme source d'information pour l'apprentissage machine. La première partie du projet est présentée avec la caractérisation d'une chaîne d'acquisition, et les premiers modèles issus de ces données.

Mots-clés—*Electronique de puissance, apprentissage machine caractérisation mesures, convertisseurs reprogrammables.*

1. INTRODUCTION

Les applications basées sur les données ont attiré l'attention de la communauté académique de l'électronique de puissance au cours des dernières décennies [1], avec trois catégories d'applications principales émergeant comme les plus importantes : conception, contrôle et maintenance. Ces applications utilisent l'optimisation, la classification, la régression et l'exploration de la structure des données comme outils axés sur les données. Les systèmes d'IA qui utilisent ces outils sont les systèmes experts, la logique floue, les méthodes méta-heuristiques et les techniques d'apprentissage automatique. Un aperçu statistique des travaux actuels dans ce domaine est donné dans la figure 1, ainsi que la portée du projet DataPower.

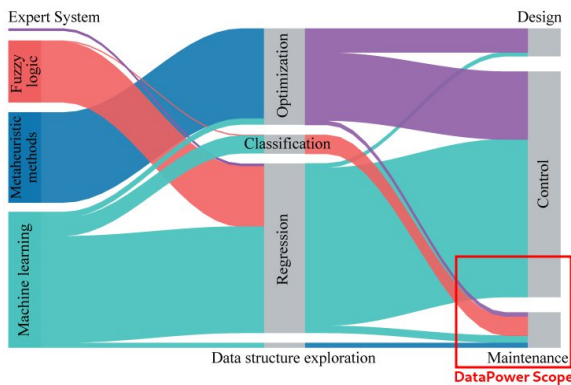


Figure 1 - Vue de la littérature dans les données dans l'électronique de puissance. [1]. Le carré rouge est le cadre du projet DataPower.

Le projet DataPower utilise l'intégration numérique initiée dans le projet OwnTech pour explorer l'idée de combiner des techniques d'apprentissage machine aux données issues des convertisseurs de puissance. Sa première étape est de qualifier la chaîne d'acquisition embarquée sur le convertisseur en tant que source de données pour créer des modèles d'apprentissage.

Cet article présente les chaînes qui seront caractérisées, le montage utilisé pour leur caractérisation et quelques premiers résultats. L'article final présentera des modèles issus de l'apprentissage machine entraînés à partir de données obtenus par les chaînes caractérisées.

2. LE PROBLÈME DES CHAÎNES D'ACQUISITION EMBARQUÉES EN ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Un convertisseur électronique de puissance a un comportement dynamique qui est plusieurs ordres de grandeur plus rapide que les systèmes d'entrée et de sortie auxquels il est connecté. Cette dynamique peut se traduire par des ondulations de tension et de courant qui oscillent à la fréquence de commutation. La chaîne de mesure intégrée dans un convertisseur de puissance est généralement conçue pour mesurer uniquement le comportement moyen de ces variables, car sa bande passante est limitée.

En utilisant la chaîne de mesure embarquée, le projet DataPower cherche à éviter une instrumentation externe dédiée et coûteuse, évitant ainsi des écueils déjà identifiés [2]. Pour palier à ces inconvénients, le projet DataPower propose l'utilisation d'une fusion avancée d'informations à plusieurs niveaux à partir de mesures multi-physiques (tension, courant et température), de la connaissance des conditions de fonctionnement du système (cycle de service, pertes) et de la configuration des cas d'étude (DC-DC, type d'entrée et de sortie). Cette fusion d'informations utilisera ensuite l'apprentissage machine pour estimer les changements dans les paramètres du modèle du cas d'étude [1].

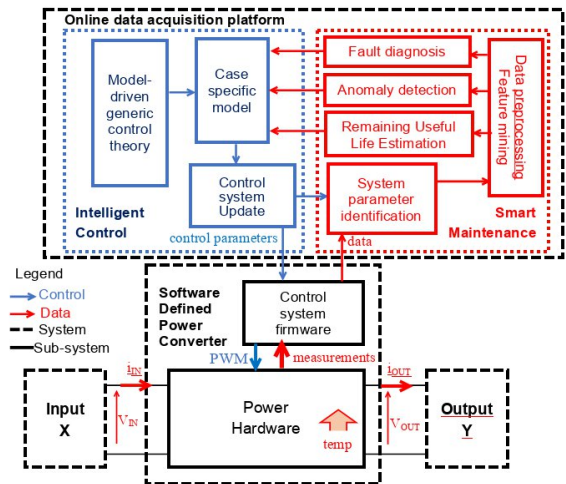


Fig. 2.- Système du projet DataPower

La figure 2 donne un aperçu du système qui sera développé dans le cadre du projet DataPower. Il comprend le convertisseur de puissance reprogrammable du projet OwnTech et sa plateforme d'acquisition de données en ligne.

En termes pratiques, le système fonctionnera comme suit. Le matériel de puissance opérera la conversion de puissance entre une entrée X inconnue et une sortie Y. L'ensemble de

capteurs permettra d'obtenir une observabilité complète du système. Les mesures seront moyennées par le logiciel embarqué du système de contrôle et les données subséquentes seront envoyées à la plateforme d'acquisition de données en ligne fonctionnant sur un serveur distant. La plateforme effectuera un prétraitement par l'identification des paramètres du système, l'exploration des caractéristiques et le prétraitement des données [9]. Ce prétraitement sera suivi par la détection d'anomalies [10], le diagnostic de défauts [10] et l'estimation de la durée de vie utile restante [11]. Le résultat sera utilisé en combinaison avec le modèle spécifique au cas pour créer un correctif par la mise à jour du système de contrôle qui sera renvoyé au micrologiciel du système de contrôle pour améliorer son état de fonctionnement.

Cet article se focalise sur la caractérisation de l'erreur des mesures en fonction des différents point d'opération du système. Cette erreur sera ensuite utilisée pour entraîner des modèles d'apprentissage machine à partir des données issues d'une carte pleinement caractérisée et une autre carte identique.

3. LES CHAÎNES D'ACQUISITIONS

Le matériel de puissance utilisé dans ces travaux est la carte TWIST issue du projet OwnTech dont le schéma est illustré par la figure 3.

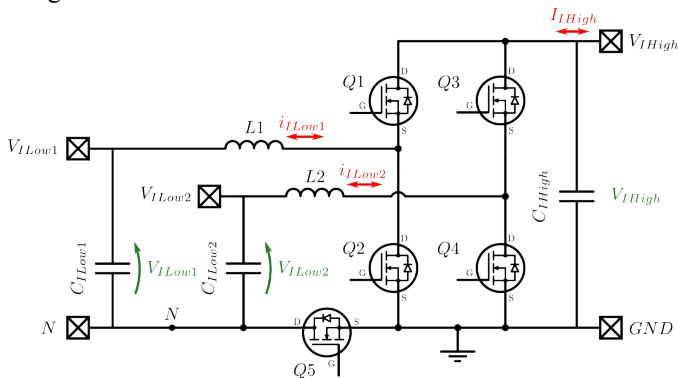


Figure 3 - Le convertisseur bi-directionnel du projet OwnTech

La carte TWIST comprend une chaîne d'acquisition avec 6 mesures différentes listées dans le tableau 1, et 2 mesures de température supplémentaires.

Tableau 1 - Liste de capteurs de la chaîne d'acquisition d'OwnTech

Mesure	Technologie de capteur	Sensibilité	Bande passante
VILow1 - Tension bras 1	Pont diviseur de tension et amplificateur isolé	+/- 80V	~kHz
IILow1 - Courant bras 1	1MHz +/- 20A Capteur à effet hall isolé	+/- 20A	200kHz
VILow2 - Tension bras 2	Pont diviseur de tension et amplificateur isolé	+/- 80V	~kHz
IILow2 - Courant bras 2	1MHz +/- 20A Capteur à effet hall isolé	+/- 20A	200kHz
VIHigh - Tension côté « haut »	Pont diviseur de tension et amplificateur isolé	+120V	~kHz
IHigh - Courant côté « haut »	80kHz +/- 20A Capteur à effet hall isolé	+/- 20A	~kHz

4. LE BANC DE CARACTÉRISATION ET CAMPAGNE DE MESURES

La figure 4 montre le montage utilisé pour cette étude.

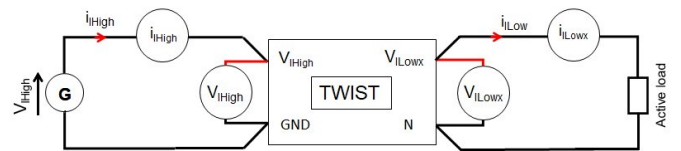


Figure 4 - Montage utilisé pour la caractérisation de la carte TWIST
La figure 5 montre une image du banc de caractérisation.

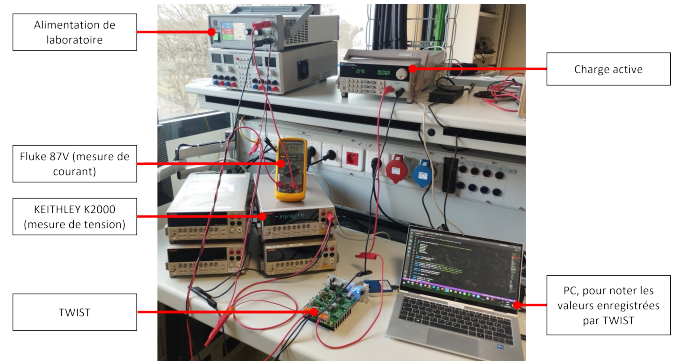


Figure 5 - Banc de caractérisation utilisé

L'objectif de la campagne de mesures est de caractériser l'erreur entre les 6 mesures embarquées et les instruments de référence pour plusieurs points d'opération. Différents comme montre la figure 6. Dans ce cas, l'erreur est calculée comme la différence entre les valeurs de référence et les valeurs des capteurs divisées par les valeurs de références.

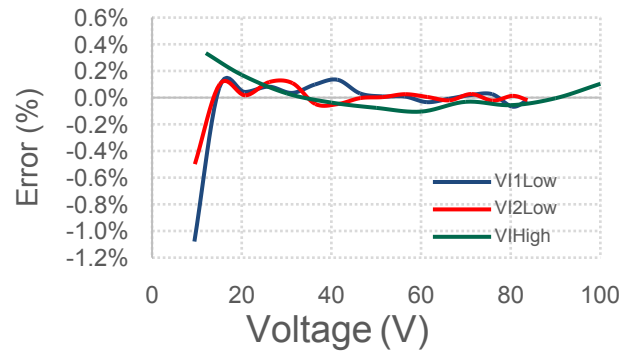


Figure 6 - Erreur absolue pour plusieurs niveaux de tension différents

Un modèle sous matlab a été callibré à partir des mesures obtenus de la carte. Ce modèle pourra être utilisé comme référence pour des modèles entraînés dans des travaux futurs.

5. LA MODÉLISATION DE LA CARTE TWIST SUR MATLAB

La création d'un modèle sur Matlab/Simulink, spécifiquement Simscape « Specialized Power Systems », permet de représenter la carte TWIST et de réaliser des tests en simulation. L'objectif du modèle est d'obtenir les résultats les plus fidèles possibles par rapport au convertisseur de puissance afin de récupérer des données à partir de différentes conditions initiales. Le développement du modèle est basé sur le fonctionnement des convertisseurs DC/DC et DC/AC, du schéma structurel de la carte TWIST, et de résultats obtenus à partir de mesures relevées par la carte. Le choix des valeurs des composants se repose sur les datasheets des fabricants, mais aussi des valeurs mesurées par l'utilisation d'instruments de mesures.

La figure 7 représente le modèle composé de différents blocs de sous-systèmes. Un bloc est utilisé pour la génération

des signaux d'entrée pour le cycle de commutation des interrupteurs.

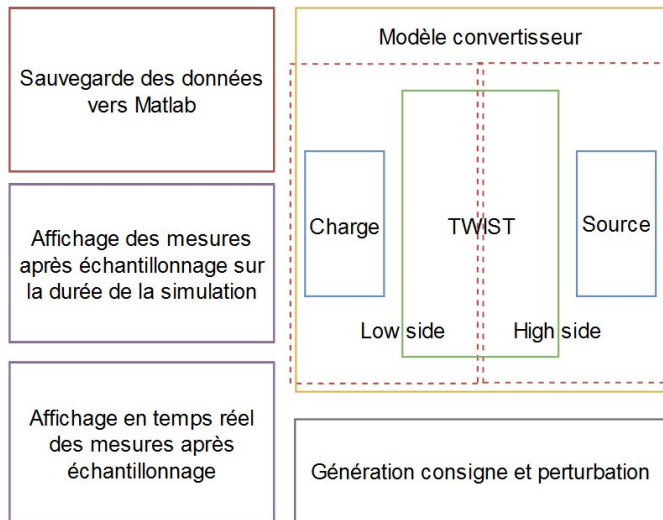


Figure 7 - Schéma bloc du modèle en convertisseur abaisseur de tension sur Matlab/Simulink

L'entrée peut être modifiée afin d'obtenir différentes consignes (échelon ou rampe), mais aussi pour prendre en compte une perturbation contrôlée de l'entrée afin d'observer la dynamique du système. Une partie électronique de puissance permet de modéliser la carte TWIST et ses composants, la source de tension et la charge, tous deux externes à la carte. Cette partie prend aussi en compte la génération du cycle de commutation à partir de la consigne, et des délais d'acquisition des mesures correspondant au même délai présent sur la carte TWIST/SPIN.

Les données ainsi obtenues ont un échantillonnage équivalent entre le modèle expérimental et la simulation, permettant une comparaison fidèle des valeurs obtenues. Deux autres blocs sont utilisés pour la génération d'un fichier de sortie afin de sauvegarder les données de la simulation, mais aussi pour l'affichage des valeurs sur l'intégralité de la simulation.

Ce modèle est accessible sur le dépôt gitlab suivant : https://gitlab.laas.fr/owntech/models/matlab-simulink/-/tree/update_version?ref_type=heads

6. L'ACQUISITION DES DONNÉES SUR TWIST

La carte TWIST comprend deux bras « low side » et un bras « high side ». Les mesures indiquées par le tableau 1 sont chacune lue par deux canaux CAN tel que le canal A du microcontrôleur lit les valeurs de I_{Low} , V_{Low} puis V_{High} , espacés de $5 \mu s$ chacun et de manière cyclique. La récupération des mesures sur le canal C est identique pour I_{2Low} , V_{2Low} et I_{High} . L'acquisition est réalisée par rapport à deux timer « HRTIM » indépendants entre eux pour chaque canal. La figure 8 représente l'ordre d'acquisition des mesures des capteurs.

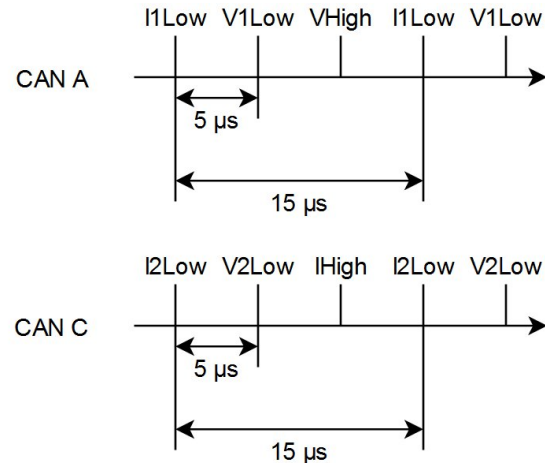


Figure 8 - Cycle de mesure des valeurs relevées par les capteurs

La mesure échantillonnée et sauvegardée est cependant à $50 \mu s$ afin de pouvoir convertir la donnée en base 10 et de réduire la charge de calcul du microcontrôleur, en prenant la dernière valeur mesurée.

Cette acquisition a été retranscrite sur le modèle Matlab/Simulink afin que les résultats de la simulation soient les plus proches et cohérents par rapport au fonctionnement réel. L'enjeu est d'obtenir des valeurs fiables par simulation, permettant d'implémenter un contrôle commande à partir de correcteurs robustes et de permettre une observabilité qui soient efficaces sur la carte TWIST.

7. LES RÉSULTATS OBTENUS EXPÉRIMENTALEMENT ET PAR SIMULATION

Des tests ont été réalisés afin de comparer les mesures obtenues par TWIST et le modèle Matlab/Simulink. Le montage utilisé est montré dans la Figure 9.

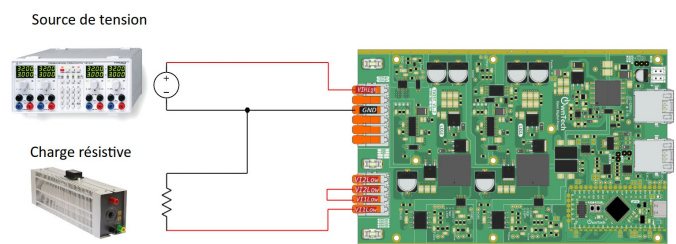


Figure 9-Schéma d'une carte TWIST en connexion Buck (abaisseur)

Tableau 2 - Conditions de test pour la construction du modèle

Variable	Valeurs	Commentaire	Unités
V_{High}	24	Valeur fixe	V
Charge	10	Valeur fixe	Ω
Duty cycle	10 à 90	Valeur variable	%

Les figures 9 à 11 représentent respectivement les résultats obtenus sur les tensions et les courants relevés. Les valeurs des graphiques correspondent à la moyenne des 100 dernières données avec un point de fonctionnement fixe.

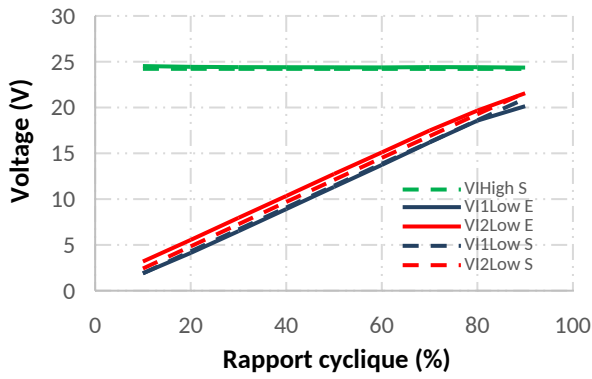


Figure 10 - Comparaison des relevés des tensions. E-Expérimental, S-Simulation

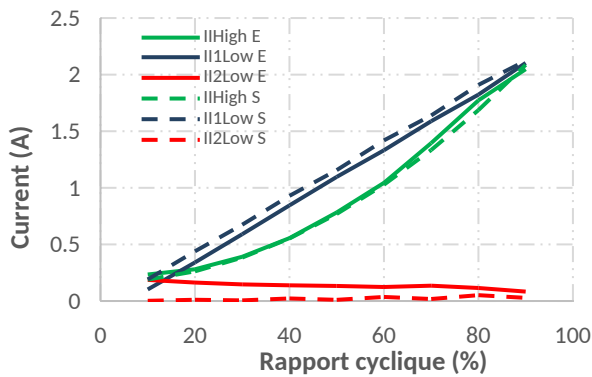


Figure 11 - Comparaison des relevés des courants. E-Expérimental, S-Simulation

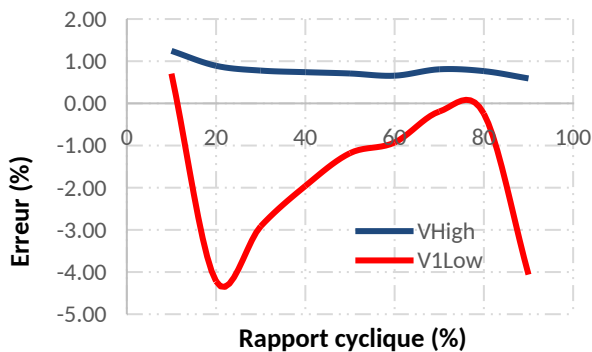


Figure 12 - L'erreur relative des mesures de tension. (E-S)/E

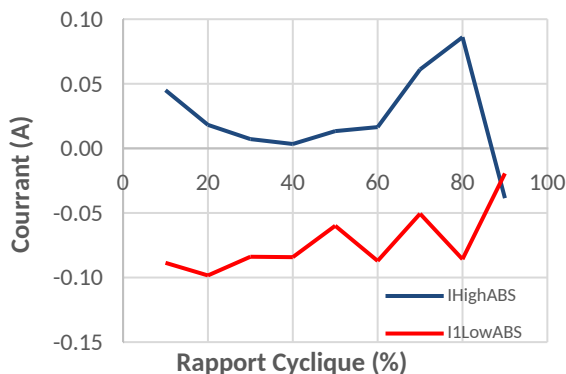


Figure 13 - L'erreur absolue des mesures de courant. (E-S)

Les niveaux d'erreur pou la tension sont de l'ordre du 1% pour le côté High et 0 à 4% du côté low. L'erreur pour le courant est faible et il est plus intéressant de le représenter d'un point de vue absolue. Le courant du côté high et du côté low restent en dessous de 100mA, pour des capteur qui peuvent aller jusqu'à 20A.

La dynamique du système a aussi été observée avec une modification de la consigne du cycle de commutation durant les relevés. Les Figure 14 et 15 présentent les résultats observés correspondant aux valeurs d'entrée « High side » et de sortie « Low side » branche 1 pour un cycle de commutation de 50%, et une perturbation du cycle passant à 60%, avec une période d'échantillonnage de 50 μ s.

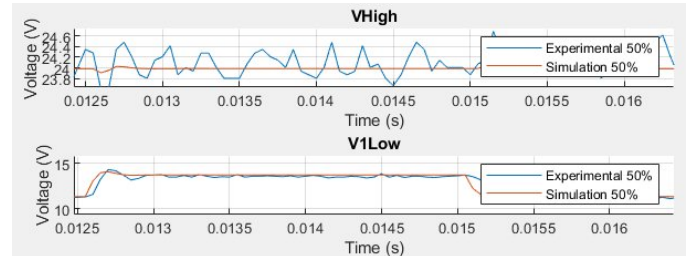


Figure 14-Dynamique des tensions d'entrée et de sortie

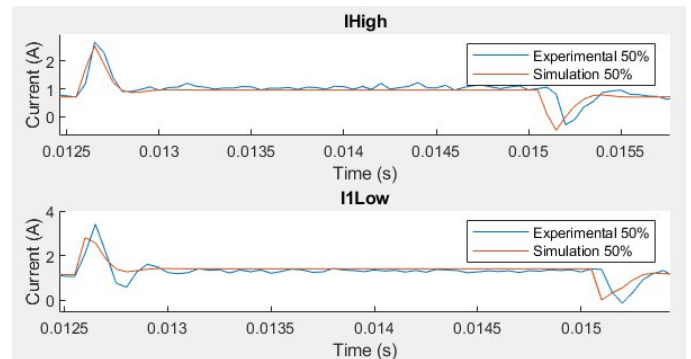


Figure 15-Dynamique des courants d'entrée et de sortie

Le modèle a un comportement dynamique qui s'approche du réel. Des améliorations sont en cours d'étude pour intégrer des aspects de déclenchement du moment de mesure dans le modèle.

8. DISCUSSION

La modélisation sur Matlab/Simulink comporte des axes d'amélioration possibles afin d'obtenir des résultats quasiment similaires aux valeurs relevées par la carte TWIST. Différents points peuvent être améliorés sur la simulation, tels que la prise en compte des pertes de puissance engendrées par les commutations, une acquisition plus rapide des données pour observer une meilleure dynamique, et des ajustements des impédances d'entrée et de sortie afin de corriger les valeurs en régime statique.

Ce modèle sera une base de travail pour la validation des modèles entraînés par des machines à partir des mesures du convertisseur. Les modèles d'apprentissage machine seront ensuite étudiés par rapport au modèle de référence pour des points d'opération pas encore étudiés en pratique. Finalement des mesures seront entreprises pour valider les modèles.

9. CONCLUSION

Cet article présente le projet DataPower qui a pour objectif d'utiliser les mesures embarquées dans un convertisseur de puissance pour caractériser son état de vieillissement. Les

chaînes d'acquisition ont été présentées et leur erreurs caractérisées. Ensuite, un modèle matlab a été paramétré pour reproduire le comportement observé par les capteurs en statique et en dynamique. Les erreurs relatives et absolues ont été présentées pour ce modèle.

Dans les travaux futurs, ces données seront utilisées pour entraîner des modèles d'apprentissage machine qui seront ensuite comparés par rapport à ce modèle étalon, notamment dans des zones de fonctionnement pas couvertes par les campagnes de mesure du convertisseur.

10. REFERENCES

- [1] S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, "An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 4, pp. 4633–4658, April 2021
- [2] Agence Nationale de Recherche. Capteurs Innovants Intégrés et logiciels au coeur d'un dispositif d'électronique de puissance ([link](#))
- [3] W. Q. Chen and A. M. Bazzi, "Logic-based methods for intelligent fault diagnosis and recovery in power electronics," IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 7, pp. 5573–5589, Jul. 2017
- [4] A. Hanif, Y. Yu, D. DeVoto, and F. Khan, "A comprehensive review toward the state-of-the-art in failure and lifetime predictions of power electronic devices," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 5, pp. 4729–4746, May 2019

A power electronics converter has a dynamic behavior which is several orders of magnitude faster than the input and output systems it is connected to. This dynamics can be translated in voltage and current ripples which oscillate at the switching frequency. The measurement chain embedded in a digitally controlled power converter is usually designed to measure only the average behavior of these variables, as its bandwidth is limited. Thus, the entire system is built on a data acquisition chain whose measurements are designed to provide operating conditions information rather than degradation information due to its averaged nature. This is a very challenging issue to be addressed in the DataPower project.

By using the embedded measurement chain, the DataPower project seeks to avoid dedicated and expensive external instrumentation, thus avoiding already identified pitfalls [31, 39]. To offset its shortcomings, the DataPower project proposes the use of advanced multilevel information fusion from multi-physical measurements (voltage, current and temperature), system operating conditions knowledge (duty cycle, losses) and study cases setup (DC-DC, type of input and output). This information fusion will then use machine learning regression to estimate changes in the study case model parameters, which is equivalent to optimizing the parameters of a previously known model [14]. This approach needs a standardized dataset acquisition and a large variety of study cases, both of which are features of the DataPower project.

Figure 3 gives an overview of the system that will be developed in the DataPower project. It comprises the software defined power converter and the online data acquisition platform. The software defined power converter is composed of two subsystems, namely a power hardware and a control system firmware. The online acquisition platform is composed of its intelligent control and smart maintenance subsystems.

The software defined power converter, with its power hardware and control system firmware, is represented as a quadripole, its input X and its output Y. It is equipped with current and voltage sensors connected to both its input and output, together with a temperature sensor that measures the operating temperature of its heatsink. All measurements are represented in red. These measurements are sent to the control system firmware which then calculates the control commands, represented here as the PWM. The measurements are converted to data by the control system firmware and sent to the online data acquisition platform for further processing.

In practical terms, the system will operate as follows. The power hardware will operate the power conversion between an unknown Input X and Output Y. The standard set of sensors will permit to get full observability of the system. The measurements will be averaged by the control system firmware and the subsequent data will be sent to the online data acquisition platform running on a remote server. The platform will perform a pre-treatment through system parameter identification, the feature mining and data pre-processing [9]. This pre-treatment will be followed by anomaly detection [10], fault diagnosis [10], and remaining useful life estimation [11].

The result will be used in combination with the case specific model to create a patch by the control system update which will be sent back to the control system firmware to enhance its operating state.

It is important to note that time-critical fault diagnosis and system control actions take place in the control system firmware. These actions will be dealt with either through linear programming or hardware safety features developed by the OwnTech project.

It is also important to clarify that while the data acquired during the DataPower project can be used for other studies such as the system parameter estimation or fault diagnosis in both input X and output Y, these estimations are beyond the scope of this project.

Data driven applications have attracted the attention of the power electronics academic community in the past few decades [14] with three main application categories emerging as most important: design, control and maintenance. These applications use optimization, classification, regression and data structure exploration as data-driven tools. The AI systems that use these tools are expert systems, fuzzy logic, meta-heuristic methods and machine learning techniques. A statistical overview of the current work on this area is given in figure 1, together with the scope of the DataPower project.

Design applications focus on using AI techniques to optimize power converter design [14]. A notable example of this approach is the work co-supervised by Dr. Villa on the automated design of power electronics converters [6]. Optimization approaches focus on design time reduction. These approaches are focused on automating the design of function-oriented power converters and are a workaround to its fundamental flaw, that each output hardware design has only one target function.

Control applications either uses optimization prior to deployment or regression to correct the control during operation [14]. The ANR has funded a project on robust control associated with data acquisition in the past [29], with interesting results such as a tool to automatically tune complex control systems and theoretical contributions on the impact of asynchronous sampling in control tuning [30]. While promising, these results are generic and not yet applied to power electronics.

Maintenance applications are split into condition monitoring, anomaly detection and remaining useful life estimation [14]. Condition monitoring and anomaly detection use mainly classification, optimization and data structure exploration to classify a power hardware as failed. Remaining useful life estimation uses regression to estimate when the power hardware will fail. In both cases, proper data acquisition is a major issue, prompting work on embedding non-invasive sensors in power electronics. A notable example is the ANR funded CAPTIF project [31] which has attempted creating and embedding sensors on power components with mixed results due to the complexity of the task.

Some important issues in data-driven applications for power electronics are related to information fusion, computational intensity, data intensity, interpretability, privacy and common database access [14]. Information fusion brings together different sources of information into a single application. Computational intensity relates to the need to embed data-driven methods on computationally limited targets such as micro-controllers. Data intensity intends to limit the amount of data needed to train a data-driven application, specially in the case of power electronics where the datasets tend to be very poor. Interpretability uses data-driven methods whose final parameters give some measure of physical interpretation to the user. Privacy issues relate to how to grant anonymity in gathering sensitive data, such as the load profile of a power converter, from multiple sources. The common

database access issue relates to the fact that there is no general database of power electronics systems which can help engineers and researchers to share high-quality datasets.

11. TWR

Puissance High side (entrée) : $P_{High} = V_{High} \cdot I_{High}$

Puissance Low side (sortie) : $P_{Low} = V_{Low} \cdot I_{Low}$

$P_{High_DMM} = V_{High_DMM} \cdot I_{High_DMM}$

$P_{Low_DMM} = V_{Low_DMM} \cdot I_{Low_DMM}$

$P_{High_TWIST} = V_{High_TWIST} \cdot I_{High_TWIST}$

$P_{Low_TWIST} = V_{Low_TWIST} \cdot I_{Low_TWIST}$

Rendement = Puissance sortie/Puissance entrée : $n = P_{Low}/P_{High}$

$Rendement_DMM = P_{Low_DMM}/P_{High_DMM}$

$Rendement_TWIST = P_{Low_TWIST}/P_{High_TWIST}$

Erreur absolue mesure rendement : $err_abs = Rendement_TWIST - Rendement_DMM$

Erreur relative mesure rendement : $err_rel = (Rendement_TWIST - Rendement_DMM)/Rendement_DMM$
 $= err_abs / Rendement_DMM$