HAL
open science

Microréseaux DC : avantages des réseaux maillés

Hervé Morel, Loïc Michel, Guy Clerc, Pascal Bevilacqua, Mohamed Barara, Vincent Steinmetz, Benoit Peron

To cite this version:

Hervé Morel, Loïc Michel, Guy Clerc, Pascal Bevilacqua, Mohamed Barara, et al.. Microréseaux DC : avantages des réseaux maillés. Symposium de Génie Electrique (SGE'18), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02134229

HAL Id: hal-02134229

https://hal.science/hal-02134229v1

Submitted on 20 May 2019

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.

Microréseaux DC : avantages des réseaux maillés

Hervé Morel[1], Loïc Michel[2], Guy Clerc[2], Pascal Bevilacqua[1], Mohamed Barara[2], Vincent Steinmetz[3], Benoit Péron[3]
[1] Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, Ampère, F-69100 Lyon
[2] Univ Lyon, Lyon 1, Ampère, F-69100 Lyon
[3] CATS, Centum Adetel Transporation Solution, Ecully, France

RÉSUME - L'alimentation des équipements dans le tertiaire par un microréseau DC permet une meilleure disponibilité de l'énergie avec moins de pertes. Dans cette optique, les microréseaux DC présentent de nombreux avantages lorsqu'ils sont maillés. Le papier présente une architecture basée sur des smart-nodes et la stratégie de contrôle des convertisseurs associés. Les premiers résultats seront présentés.

Mots-clés—microréseaux, réseaux maillés, bâtiment, énergie renouvelable.

1. INTRODUCTION

Les microréseaux sont des réseaux électriques à faible échelle, comme celle d'un bâtiment, voire d'un quartier. Aujourd'hui, l'essentiel des travaux sur les microréseaux concerne les microréseaux AC [1], surtout en France. Cela résulte de l'existence de nombreuses infrastructures et normes. Toutefois, les microréseaux DC, sont des alternatives prometteuses aux réseaux de distribution AC classiques notamment pour l'intégration des énergies renouvelables [2], [3]. Ils permettent par exemple de réduire la consommation d'énergie de 25 % lors de l'alimentation directe d'immeubles tertiaires par des panneaux photovoltaïques [4]. Dans ce cadre, les microréseaux maillés constituent a priori une solution intéressante pour le câblage des bâtiments ou des quartiers notamment à cause de la complexité des infrastructures. Le réseau maillé DC peut apporter davantage de redondance, de flexibilité et de disponibilité. En revanche, cela complique, la gestion des flux de puissance et la gestion de la protection.

2. MOTIVATION, VERROUS ET CONTEXTE

Si cette thématique est peu étudiée en France, les microréseaux DC sont largement étudiés dans le monde et en particulier en Asie [5], [6], [7] et [8].

Si les motivations sont souvent sociétales, car les microréseaux DC réduisent les pertes en évitant un passage inutile par un étage AC [4], elles sont aussi économiques en particulier pour les régions où les réseaux électriques sont encore peu développés [7], [8]. Avec la puissance économique déployée dans ces régions, notre conviction est qu'à terme, les technologies de microréseaux DC seront très avantageuses sur le plan économique.

Nous développons de façon plus originale des microréseaux maillés DC [9]. L'intérêt supplémentaire des réseaux maillé par rapport à des réseaux radiaux est la réduction de la quantité de conducteur nécessaire pour alimenter un bâtiment notamment tertiaire, comme le montrera la section 2. De plus, notre conviction est qu'à l'échelle d'une métropole, les smart-cities, les futures charges électriques (charge rapide des véhicules électriques, des utilitaires, du transport en commun ...) et de moyens de production (solaire photovoltaïque) exigeront le déploiement de réseaux MVDC [10] qui seront nécessairement maillés, compte tenu de la complexité des métropoles [11]. Les technologies développées pour les microréseaux DC seront en grande partie applicables aux réseaux MVDC.

Naturellement, l'obstacle économique est réel en Europe compte tenu du fort niveau d'équipement en réseaux de distribution AC.

De plus des verrous scientifiques existent. Pour un microréseau DC et maillé, la surveillance des niveaux de courant transmis dans chaque ligne est critique, notamment au niveau de la sécurité. Le contrôle des flux d'énergie (courant ou puissance) est donc nécessaire.

Enfin, la protection des personnes et des biens doit être définie avec précision. La coupure DC est une difficulté, surtout en haute tension. Comme d'autres [12][13][14], nous pensons que la protection doit être intégrée aux convertisseurs. Sur ces sujets des travaux sont menés en parallèle au laboratoire Ampère [15], [16], mais ils ne seront pas abordés ici.

Nous venons de le voir qu'un réseau maillé DC a de nombreux avantages de structure comme,

- un besoin en masse de conducteur plus faible,
- une redondance de câblage permettant une meilleure disponibilité de l'énergie en cas de panne d'une source ou d'un nœud,
- une flexibilité accrue, par exemple en insérant ou en déplaçant des sources ou des charges.

En revanche, dans un tel réseau maillé DC, il est très utile de contrôler les courants dans les différentes branches du réseau par exemple pour limiter le courant à la capacité du câble. Pour cela nous pouvons utiliser des *control-flow converters* [17].

Ce papier va aborder ces problématiques liées à l'architecture des microréseaux maillés DC, la mise en œuvre d'une maquette 20 kW et les premiers résultats.

3. MAILLAGE DES MICRORÉSEAUX DC

Un bâtiment ou un quartier est souvent un assemblage de formes géométriques régulières. Pour un usage tertiaire, chaque nœud doit potentiellement pouvoir utiliser une même puissance. Nous proposons un modèle simplifié pour analyser les différentes solutions.

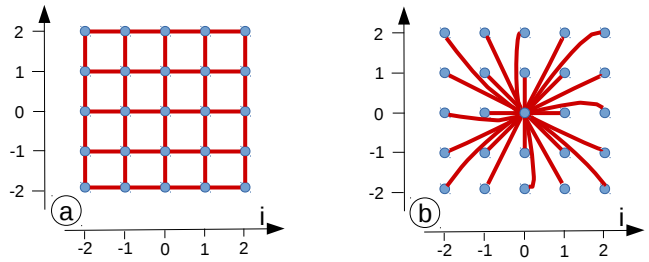

Fig. 1: a) Le schéma d'une structure rue/avenue où les points peuvent être évalués par la distance de Manhattan. b) schéma est plus classique avec une connexion radiale. Le côté du schéma vaut (2n+1)a.

La Fig. 1 compare un maillage régulier de $(2n+1)^2=25$ nœuds régulièrement espacés par la distance a. Le cas de gauche est un maillage régulier de type Manhattan [18] et celui de droite est une connexion radiale plus classique dans les bâtiments.

La longueur de câble pour atteindre le nœud (i,j) à partir du nœud (0,0) dans le maillage radial est donnée par :

$$L(i,j)=a\sqrt{i^2+j^2} \qquad (1)$$

La longueur totale de câble nécessaire au maillage radial est donc donnée par :

$$L_R=\sum_{-n\le i,j\le n} L(i,j)=a\sum_{-n\le i,j\le n}\sqrt{i^2+j^2} \qquad (2)$$

De façon plus simple, la longueur totale de câble nécessaire au maillage Manhattan est donnée par :

$$L_M=a(2n+1)^2 \qquad (3)$$

Le résultat du calcul des longueurs de câbles nécessaires à réaliser les maillages est donné à la Fig. 2.

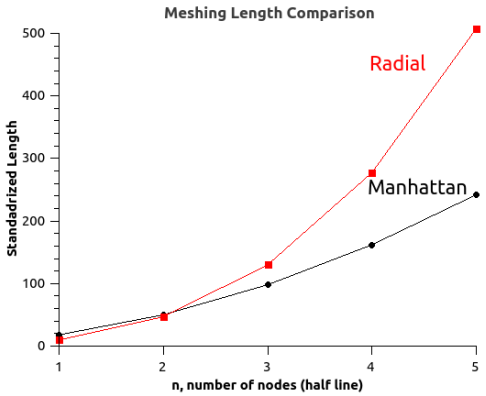

Fig. 2: Comparaison des longueurs de câblage nécessaires à la réalisation des solutions radiale et Manhattan.

Pour n=5, le maillage radial demande :

$$L_R\simeq 507.4\,a \qquad (4)$$

alors que le maillage Manhattan demande :

$$L_M\simeq 121\,a \qquad (5)$$

Le gain pour Manhattan est donc d'environ un facteur 4,2. Considérant le nœud (0,0) comme le nœud source, avec une section de câble identique, le maillage Manhattan permet d'apporter potentiellement 4 fois plus de puissance à tout autre nœud, car chaque nœud (interne) a 4 voisins.

Aussi, il faudrait une section 4 fois plus grande aux câbles de la solution radiale pour apporter potentiellement le même niveau de puissance.

Au total, pour n= 5, soit une structure de 121 nœuds, la structure de Manhattan consomme 4.2 x 4 =16,8 fois moins de conducteurs (par exemple du cuivre).

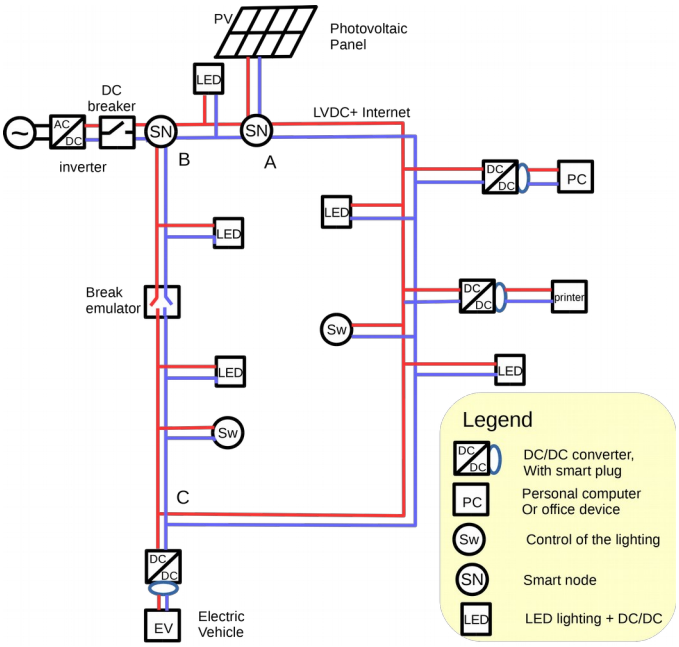

Fig. 3: Prototype de réseau proposé dans le cadre du projet ANR C3µ.

Dans cette analyse simplifiée, l'avantage pour le maillage Manhattan est donc décisif en quantité de cuivre.

Pour finir, sur la quantité de conducteur, un maillage 3D serait manifestement encore plus favorable au réseau maillé.

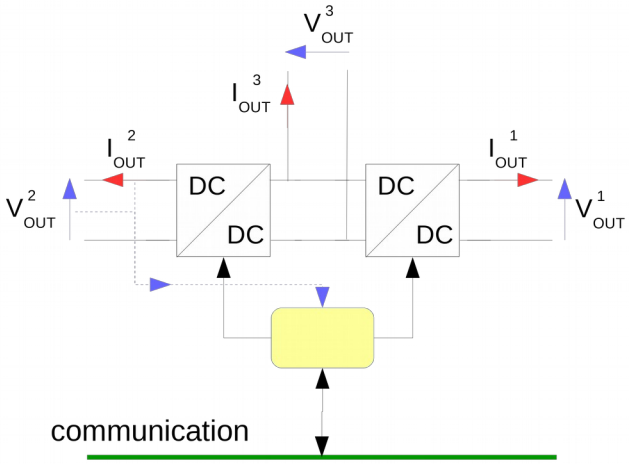

Fig. 4: Schéma de principe d'un smart-node

4. Les solutions technologiques proposées

La réalisation d'une maquette de réseau maillé DC a obtenu le soutien financier d'un projet ANR, C3µ et d'un projet CPER, GD3E.

Le schéma de principe proposé dans le projet ANR est donné à la Fig. 3.

Pour réaliser le contrôle de flux, la solution que nous avons proposée dans C3µ est l'utilisation de smart-nodes (Fig. 4), constitués de deux convertisseurs DC/DC réversibles, pour lesquels le courant ou la puissance dans toutes les branches est contrôlé.

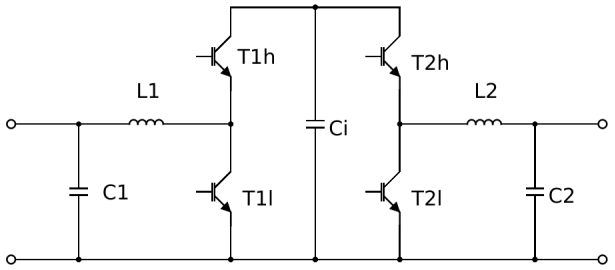

Fig. 5: Convertisseur Split-Pi et les valeurs utilisées C_1=C_2= 7,5 µF, Ci=330 µF, L_1=L_2=700 µH.

Un smart-node aura pour fonction de répartir la puissance dans les différentes branches. Il pourra par exemple, garantir la non-dégradation du câblage associé, mais aussi à terme réaliser toutes les fonctions de protection et notamment la protection contre le court-circuit.

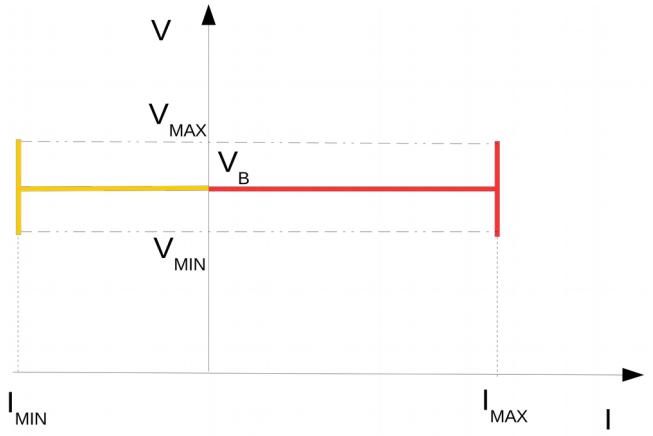

Fig. 6: Stratégie de contrôle des sorties des smart-nodes en régime établi dans le plan courant-tension.

La solution que nous avons choisie pour réaliser un smart-node est l'utilisation de convertisseurs de type split-pi (bidirectional buck-boost converter) [19] (Fig. 5).

L'objectif étant d'avoir un réseau facile à configurer, en particulier, les smart-nodes ne doivent pas avoir d'adaptation à réaliser pour fonctionner.

Aussi, chaque nœud doit avoir une régulation de la tension du bus et les autres branches doivent avoir une régulation en courant ou en puissance.

Nous avons proposé un schéma de régulation unique pour les smart-nodes [9] (Fig. 6), inspiré de la littérature, *voltage margin control* [20].

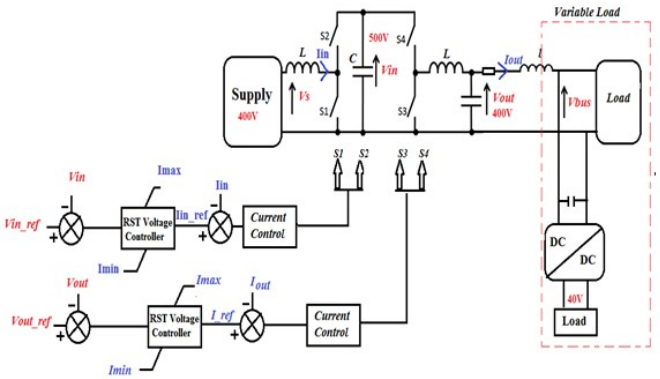

Fig. 7: Schéma de contrôle proposé pour le convertisseur split-pi. La configuration de test a une source de tension à l'entrée et une charge variable à la sortie [9].

Pour réaliser ce schéma, nous avons développé une commande du convertisseur split-pi, présentée à la Fig. 7 ([9]).

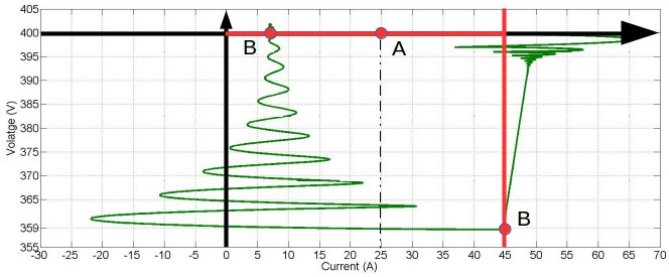

Fig. 8: Résultats de simulation sur la tension et le courant de sortie pour différentes conditions de fonctionnement, dans le plan courant-tension.

Ce schéma a été validé par la simulation puis à échelle réduite dans [16], Fig. 8.

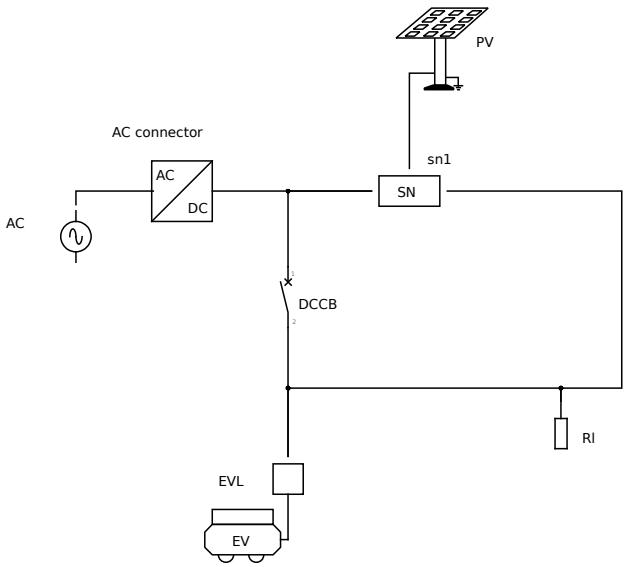

Fig. 9: Maquette visée dans nos projets. Le smart-node est prévu pour assurer 20 kW par branche.

5. Prototype de réseau développé

Dans le cadre du projet ANR/C3µ et du CPER/GD3E, un prototype de microréseau DC maillé a été développé. Les smart-nodes sont réalisés par des convertisseurs split-pi de 20 kW. Ces convertisseurs, basés sur une topologie à commutation douce, ont été fournis par CATS[1] [22].

Dans le projet C3µ, nous devons tester un fonctionnement où la puissance fournie par le panneau photovoltaïque de 20 kW crête alimente un chargeur rapide (20 kW aussi) de véhicule électrique. Les profils temporels du panneau photovoltaïque et de la charge rapide n'ont aucune raison de coïncider. C'est pourquoi notre maquette est connectée au réseau AC par un convertisseur réversible. Le scénario que nous devons étudier part d'une alimentation depuis le panneau photovoltaïque vers le chargeur rapide par les deux branches. Un disjoncteur DC (DCCB) peut ouvrir une branche de la maquette pour simuler la défaillance d'une branche et le smart-node doit automatiquement reconfigurer le transfert d'énergie par la seule branche restant disponible. La charge se poursuivra en mode dégradé. Le smart-node pourra avertir le véhicule électrique du passage en charge à vitesse réduite. Les aspects de communication sont étudiés de par ailleurs dans le projet C3µ.

Notre stratégie de contrôle présentée à la Fig. 6 présente l'avantage de permettre une gestion rapide, en réponse « réflexe », sur l'événement que nous venons de décrire. Les convertisseurs sont regroupés par deux dans un module « noiseless » par la société CATS. Un module convient donc parfaitement pour réaliser notre fonction smart-node et l'un des coeurs du processeur de la carte de contrôle est utilisé en partie pour réaliser notre couche de communication.

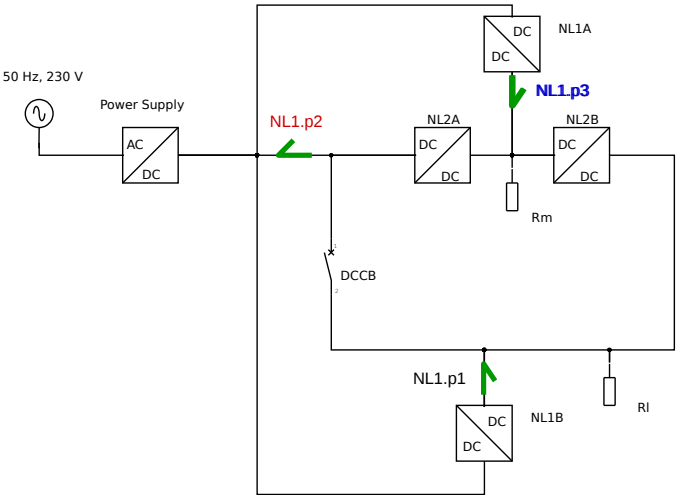

Fig. 10: Maquette réelle assurant l'émulation du schéma de la Fig. 9. Le module NL1 permet avec ses convertisseurs NL1A et NL1B d'émuler les panneaux PV et le chargeur rapide. Le module NL2 permet de tester un smart-node.

En fait, éviter des pertes trop importantes (jusqu'à 20 kW), nous avons émulé les fonctions de panneau photovoltaïque, de chargeur rapide et de connexion réseau en utilisant les convertisseurs d'un module noiseless (NL1, 20 kW) monté en back-to-back comme représenté à Fig. 10

6. Procédure de test

Pour tester de façon progressive les différentes fonctionnalités de la maquette, nous avons conçu une batterie de tests (Tableau 1).

Dans notre maquette nous avons adapté une régulation éprouvée par la société CATS dans un contexte industriel.

La Fig. 11 montre le schéma de principe pour les tests bouclés du Tableau 1.

Tableau 1: Liste des tests de validation

Ref. test	**objectif**	**régulation**
Test 1	Test simple d'un module bouclé comme sur la Fig. 11.	Les tensions v1 et v3 sont asservies
Test 2	Test simple d'un module bouclé comme sur la Fig. 11. Le contrôle en puissance permet des tester le mode émulation.	La puissance p1 et la tension v3 sont asservies
Test 3	Test simple d'un module bouclé comme sur la Fig. 11. La limitation de puissance est testée (Fig. 6).	Les tensions v1 et v3 sont asservies. P1 est limité.

Les figures Fig. 12 et Fig. 13 montrent des résultats de mesure pour le test 2. Ce test permet de valider le fonctionnement en mode émulation (module NL1).

La Fig. 13 montre la consigne de puissance et la puissance mesurée LN1.p1. Les symboles sont définis aux Fig. 10 et Fig. 11.

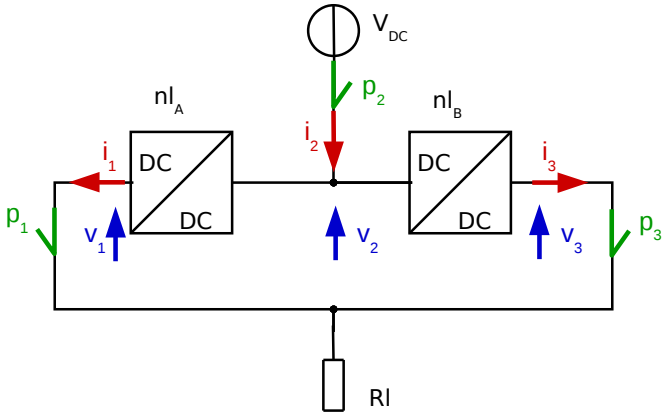

Fig. 11: Schéma unifilaire représentant le principe des tests bouclés.

Nous avons donc testé à environ 6 kW dans ce mode.

Les Fig. 14 et Fig. 15 montrent les résultats du test 3, (Tableau 1), qui permettent une validation partielle du fonctionnement en mode smart-node.

1 CATS : Centum Adetel Transportation Solution

Dans ce dernier cas, la limitation de puissance était supérieure à la consommation (Fig. 6) et n'est donc pas atteinte.

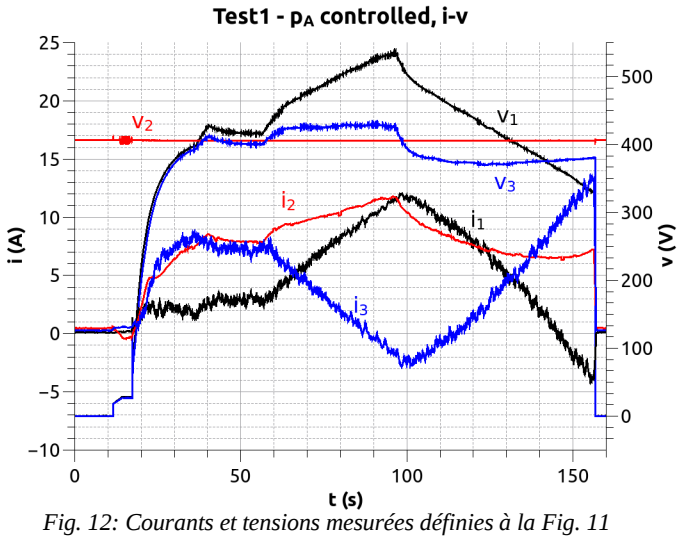

Fig. 12: Courants et tensions mesurées définies à la Fig. 11 correspondants au test 2

Ce test montre donc le fonctionnement non limité en boucle.

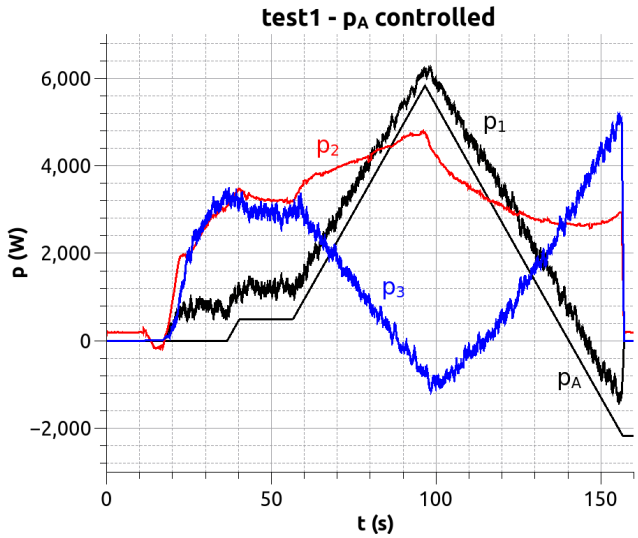

Fig. 13: Consigne de puissance, p_A sur la figure, et puissances mesurées définies à la Fig. 9 correspondant au test 2

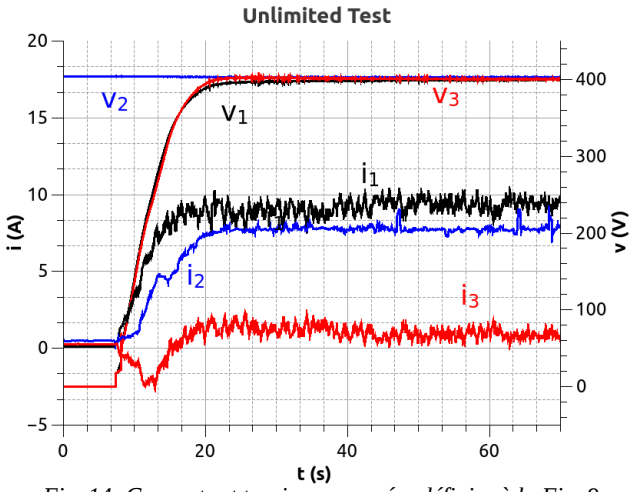

Fig. 14: Courants et tensions mesurées définies à la Fig. 9 correspondant au test 3 avec une limite en puissance supérieure à la consommation (10 kW).

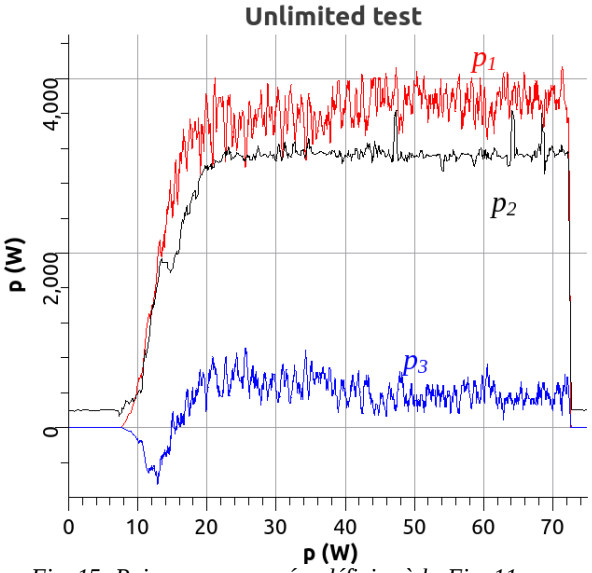

Fig. 15: Puissances mesurées définies à la Fig. 11 correspondant au test 3 avec une limite en puissance supérieure à la consommation (10 kW).

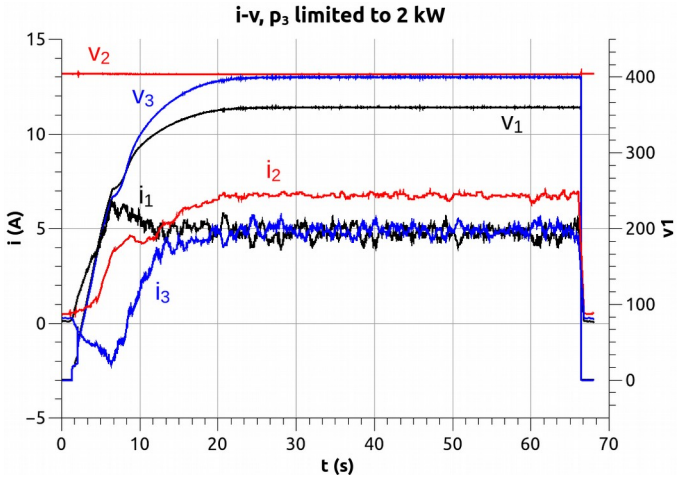

Fig. 16: Courants et tensions mesurées définies à la Fig. 11 correspondant au test 3 avec une limite en puissance de 2 kW pour p_3.

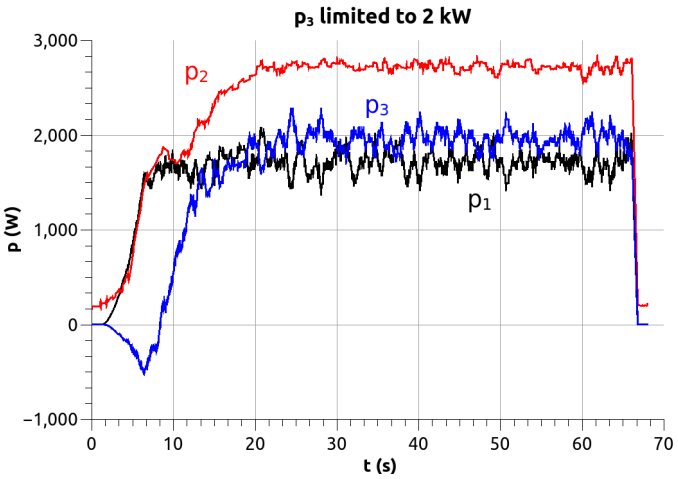

Fig. 17: Puissances mesurées définies à la Fig. 9 correspondant au test 3 avec une limite en puissance de 2 kW pour p_3.

Fig. 18: Courants et tensions mesurées définies à la Fig. 11 correspondants au test 3 avec une limite en puissance de 1 kW pour p_3.

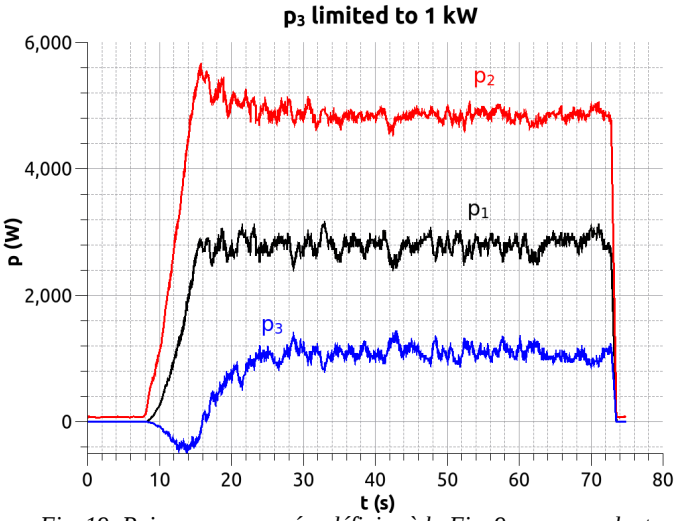

Fig. 19: Puissances mesurées définies à la Fig. 9 correspondant au test 3 avec une limite en puissance de 2 kW pour p_3.

Les figures 16 et 17 montrent les résultats de mesure dans le cas du test 3 avec une limite en puissance de 2 kW. Ce test montre donc le cas où la limite en puissance est atteinte.

Les figures 18 et 19 montrent les résultats de mesure dans le cas du test 3 avec une limite en puissance de 1 kW.

En revanche, les figures 20 et 21 montrent les résultats de mesure dans le cas du test 3 avec cette fois une variation des limites en puissance. Ces premiers résultats obtenus montrent le bon fonctionnement des convertisseurs utilisés dans les smarts-nodes permettant le contrôle des flux de puissance dans le microréseau maillé.

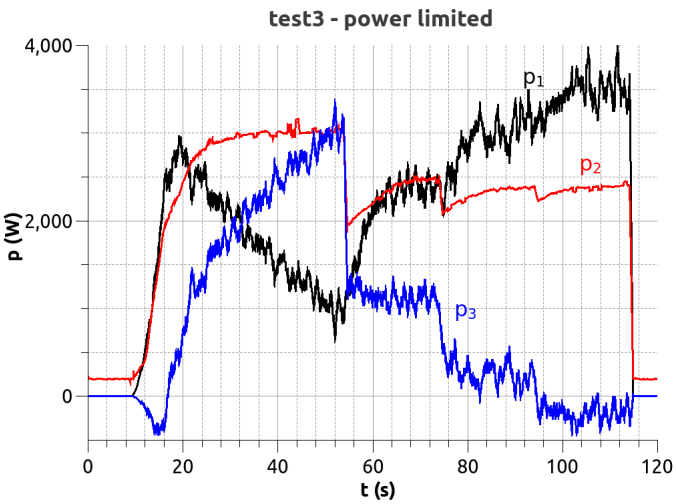

Fig. 20: Puissances mesurées définies à la Fig. 11 correspondant au test 3 avec une limite en puissance variant pour p_3.

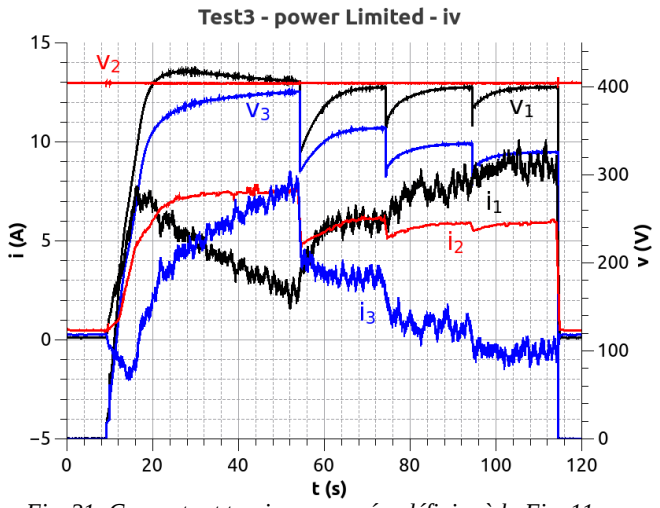

Fig. 21: Courants et tensions mesurées définies à la Fig. 11 correspondant au test 3 avec une limite en puissance variant pour p_3.

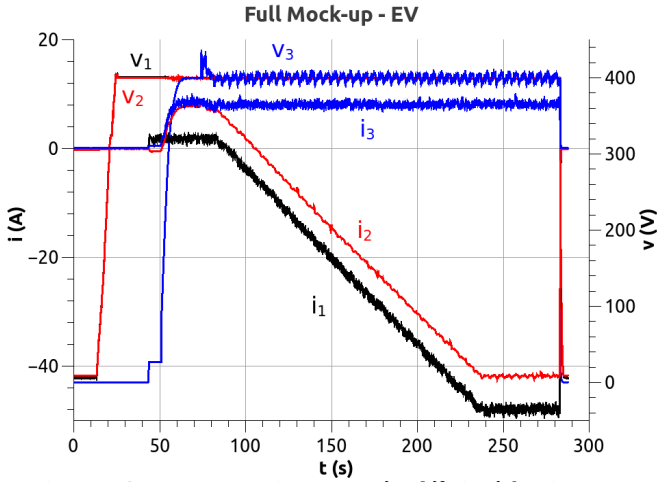

Fig. 22: Courants et tensions mesurées définies à la Fig. 11 correspondant à une charge d'environ 20 kW pour le chargeur rapide

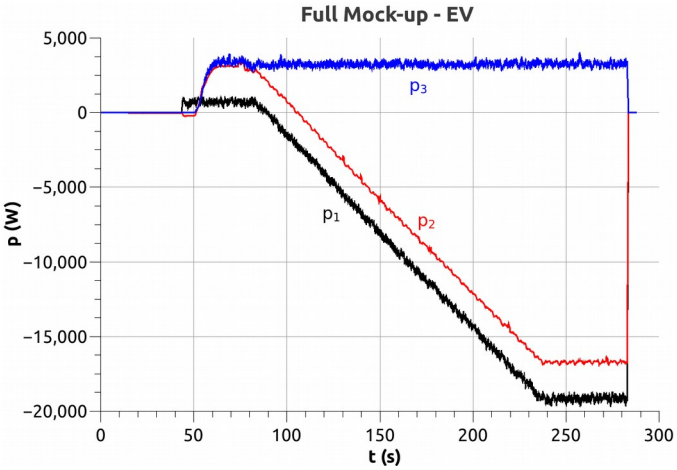

Fig. 23: Puissances mesurées définies à la Fig. 11 à une charge d'environ 20 kW pour le chargeur rapide

7. Essais avancés

Une maquette comportant un émulateur et un smart-node a été mise en œuvre comme cela est montré à la Fig. 10.

Les figures 22 et 23 montrent les résultats de mesures de notre maquette présentée à la Fig. 10 avec une puissance p_1 d'environ -20 kW. Il s'agit donc bien d'une puissance absorbée par l'émulateur (Fig. 10) de chargeur rapide (Fig. 9). Dans ce cas précis, l'essentiel de la puissance serait fourni via l'émulation (Fig. 10) de la connexion AC/DC (Fig. 9), c'est-à-dire d'environ 17 kW.

8. Résultats et conclusions

Nous avons montré les premiers résultats obtenus sur la maquette (Fig. 10). Si nous devons encore adapter la régulation basée sur une solution industrielle, des essais ont été obtenus avec une puissance transférée de 20 kW. De même la stratégie de régulation de la Fig. 6 a été testée sous la forme d'une régulation de tension avec limite en puissance. Nous devrons trancher prochainement sur la meilleure solution : limite en courant ou en puissance.

Nous avons ainsi confirmé l'intérêt d'une solution de type smart-node, qui à terme pourra devenir une solution standard et modulaire, ne nécessitant pas de configuration manuelle. Un autre objectif sera d'étudier la possibilité de réduire fortement le coût d'une telle solution.

L'intérêt d'un smart-node, que nous avons déjà validé en simulation est la reconfiguration automatique en cas de perte d'une branche. Cela permettra d'ajouter un avantage significatif avec une meilleure disponibilité de la puissance sur le réseau. Notre stratégie de contrôle (Fig. 6) a été au moins en partie validée. Elle permet un contrôle générique applicable à tous les smart-nodes d'un réseau.

Naturellement, l'aspect communication devra être testé et un protocole devra être mis en place. Une idée que nous poursuivons est de mettre en place sur le même réseau de

puissance un réseau Ethernet a haut débit par courants porteurs, via les câbles de puissance sous forme de paires torsadés. Cela permettrait de réduire encore le coût global d'une telle installation.

Concernant le protocole de communication, nous considérons deux types d'événements :

- des événements urgents comme la reconfiguration suite à une perte de ligne et la protection.
- Des événements plus lents comme l'information d'une puissance réduite, des informations sur la connexion d'une nouvelle charge sur le réseau, des instructions de puissance, par exemple de l'éclairage à LED, des instructions d'optimisation de la répartition des puissances dans le réseau pour minimiser par exemple les pertes. Sur ce dernier point des travaux sont en cours dans le cadre du projet C3µ.

Les événements réflexes devront être gérés directement par la commande du smart-node. C'est le cas de la reconfiguration du réseau suite à la perte d'une branche, grâce à la stratégie présentée à la Fig. 6. À terme, cela sera aussi le cas des événements de protection.

La gestion des événements plus lents passera par la couche de communication. Dans un premier temps, ceux-ci seront gérés de façon centralisée par un module National Instrument, piloté avec Labview. À terme, nous comptons étudier la supervision décentralisée, c'est-à-dire gérée dans chaque smart-node comme le fait déjà Ethernet [22].

9. Remerciements

Le projet a été financé dans le cadre de l'ANR ANR-15-CE05-0004 et complété par le projet GD3E dans le cadre du CPER (État, région Auvergne-Rhône-Alpes, Métropole de Lyon).

10. References

[1] GUAN, Xiaohong, XU, Zhanbo, et JIA, Qing-Shan. Energy-efficient buildings facilitated by microgrid. *IEEE Transactions on smart grid*, 2010, vol. 1, no 3, p. 243-252.

[2] Krishna Shenai, Ashok Jhunjhunwala, and Prabhjot Kaur "Electrifying India Using solar dc microgrids" IEEE POWER ELECTRONICS MAGAZINE, Vol. 3 No. 4, p. 42, December 2016.

[3] SECHILARIU, Manuela, WANG, Baochao, et LOCMENT, Fabrice. Building-integrated microgrid: Advanced local energy management for forthcoming smart power grid communication. *Energy and Buildings*, 2013, vol. 59, p. 236-243.

[4] Ammous A and Morel H (2014), "LVDC: An Efficient Energy Solution for On-Grid Photovoltaic Applications", Smart Grid and Renewable Energy., April, 2014. Vol. 05(04), pp. 63-76. Scientific Research Publishing, Inc,. [DOI: 10.4236/sgre.2014.54007]

[5] YUBA, Takashi, BAEK, Seungseok, KIRYU, Koichi, et al. Development of plug and socket-outlet for 400 volts direct current distribution system. In : Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on. IEEE, 2011. p. 218-222.

[6] XU, Lie et CHEN, Dong. Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage. IEEE transactions on power delivery, 2011, vol. 26, no 4, p. 2513-2522.

[7] Ashok Jhunjhunwala, Innovative Direct-Current Microgrids to Solve India's Power Woes, IEEE Spectrum, 31 Jan 2017

[8] ZHANG, Fengyan, MENG, Chao, YANG, Yun, et al. Advantages and challenges of DC microgrid for commercial building a case study from Xiamen university DC microgrid. In : DC Microgrids (ICDCM), 2015 IEEE First International Conference on. IEEE, 2015. p. 355-358.

[9] Barara M, Morel H and Guy C (2017), "Control Strategy Scheme for Consistent Power Flow Control in Meshed DC Micro-grids", In COSYS-DC, International Conference on Components and Systems do DC Grids. Grenoble, France, March, 2017

[10] ECHTERNACHT, David, STAGGE, Hanno, PRIEBE, Jens, *et al.* Modelling, Planning, Design and Evaluation of DC-Distribution Grids. In : *International ETG Congress 2015; Die Energiewende-Blueprints for the new energy age; Proceedings of.* VDE, 2015. p. 1-7.

[11] ZHANG, Weichao, LIANG, Haifeng, BIN, Zhou, *et al.* Review of dc technology in future smart distribution grid. In : *Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE*. IEEE, 2012. p. 1-4.

[12] Dushan Boroyevich, Use of SiC Devices in Medium-Voltage Converters, CPES Workshop WBG Power Electron. Adv. Distrib. Grids, Apr. 2016, US

[13] PAPADAKIS, Haris. Protection of HVDC grids using DC Hub. Master thesis, TU Delft Electrical Engineering, 2017.

[14] KENZELMANN, Stephan. Modular DC/DC converter for DC distribution and collection networks. PhD Dissertation, EPFL, 2012.

[15] Thi Thuong Huyen MA, Evaluation of DC supply for efficient energy delivery in domestic appliance, PhD, Lyon 1, April 5, 2018.

[16] H. Morel, Coupure et protection des microréseaux DC, état de l'art et évolution, La coupure électrique: problématiques, solutions et enjeux technologiques, Journées EEA/SEEDS, 12 et 13 mars 2018, Toulouse.

[17] W. Chen et al., "A Novel Interline DC Power-Flow Controller (IDCPFC) for Meshed HVDC Grids," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 4, pp. 1719-1727, Aug. 2016.

[18] NIST, Manhattan distance, https://xlinux.nist.gov/dads/HTML/manhattanDistance.html

[19] CROCKER, Timothy Richard. *Power converter and method for power conversion*. U.S. Patent No 6,914,420, 5 juill. 2005.

[20] NAKAJIMA, Tatsuhito et IROKAWA, Shoichi. A control system for HVDC transmission by voltage sourced converters. In : Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE. IEEE, 1999. p. 1113-1119.

[21] Thi Thuong Huyen Ma, Hamed Yahoui, Fedia Baccar El Boubkari, Hervé Morel, Hoang Giang Vu, Nicolas Siauve, Building a Matlab/Simulink Model of SiC JFET for the investigation of Solid State DC Breaker, CoSys-DC, Grenoble, 14-15 march 2017, France.

[22] PERON, Benoit et MAGNIEZ, Joseph. Hybrid Power Cell using Si IGBT & SiC MOSFET. In : PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of. VDE, 2017. p. 1-8.

[23] Phil Carroll, THE ENERNET, THE CONVERGENCE OF THE ENERGY GRID AND THE INTERNET? Finley Engineering, Consulted On 2018.