

Modélisation boîte noire de la consommation électrique d'une marina.

Sullivan ROYER, Thierry TALBERT, Olivier FRUCHIER, Dorian GACHON

Laboratoire PROMES-CNRS, Université de Perpignan Via Domitia

RESUME – Dans cet article nous réalisons une étude de modélisation de consommation de plusieurs pontons d'un port de plaisance (marina) afin d'en déduire ou non un comportement commun. Le but est de modéliser la puissance consommée par les bateaux amarrés et branchés au port à partir de données relevées par un énergimètre portable.

Mots-clés – Microgrid, consommations, modélisation, prédictions, régression, machine learning.

1. INTRODUCTION

L'électricité est une source d'énergie présente dans la vie quotidienne et ne cesse de croître à cause de l'éclairage, des systèmes de chauffage et climatisation, des appareils construits pour améliorer notre qualité de vie...[1] Cette hausse de la consommation touche tous les secteurs et n'épargne pas les marinas. Celles-ci s'agrandissent, se munissent de véhicules électriques (bateaux, autos, vélos...) pour leur propre service technique et pour les plaisanciers. Évidemment ces derniers s'équipent aussi d'appareils consommateurs d'électricité pour leur confort, leur transport, etc. De ce fait, il est nécessaire d'étudier et de changer les modes de consommation voire de les contrôler [2]. De plus, une hausse de la consommation implique une hausse de la production d'électricité qui a pour conséquence d'accélérer le réchauffement de la planète ou encore de modifier le climat. C'est pour contrer ces effets que les gouvernements et l'Union Européenne ont fixé des objectifs de production et de consommation d'énergie en 2007 [3] puis 2010 [4] pour l'horizon 2020 et en 2014 [5] pour l'horizon 2030. Ces objectifs sont notamment définis dans un « paquet climat-énergie » et parfois appelés par la suite « objectifs 20-20-20 » :

- réduire de 20% les émissions de GES par rapport à 1990 ;
- atteindre l'objectif d'économiser 20% de la consommation énergétique européenne par rapport aux prévisions pour 2020 ;
- adopter l'objectif contraignant d'utiliser 20% d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie de l'UE d'ici 2020.

La marina souhaite participer à ses objectifs en maîtrisant sa consommation d'énergie pour commencer puis en installant des systèmes de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable. Elle compte rendre ses plaisanciers acteurs en intégrant des technologies innovantes de gestion de l'énergie et devenir ce que l'on appelle un microgrid. Il est difficile d'en donner une définition précise car beaucoup d'organismes ont leur propre vision (exemple en France avec ERDF, CRE). Cependant, ils présentent un enjeu commun : intégrer un maximum de production décentralisée, en particulier des EnR, et intégrer la présence de batteries et d'automates/algorithmes de pilotage [6][7]. Ainsi notre travail est de modéliser la charge du réseau, analyser son type et son comportement afin de prédire sa consommation.

La première partie de l'article décrit la marina, la deuxième partie traite de la phase de modélisation de la charge alors que la troisième présente les résultats. Naturellement, la fin de l'article

comprend la conclusion et les perspectives de ce travail.

2. DESCRIPTION DE LA MARINA

Dans sa gestion au quotidien, la Régie du port met en place de nombreux services afin de limiter au maximum l'impact environnemental de la marina. Un dispositif de comptage par pontons et quais, ainsi que leur raccordement à un système de télégestion pour connaître les consommations a été installé récemment. L'aire de la marina est découpée en quatre zones, chacune est intégrée à un Tableau Général Basse Tension (TGBT) qui fait le lien entre l'arrivée du réseau de distribution et le réseau du client. Le premier poste de transformation, TGBT 1, adapte la tension pour six pontons nommés de 0 à 5 (voir Fig. 1). En tête de chaque ponton, on retrouve une armoire électrique contenant les disjoncteurs différentiels situés en amont des bornes du ponton en question ainsi qu'un disjoncteur dit général permettant de couper toutes les bornes du ponton simultanément.

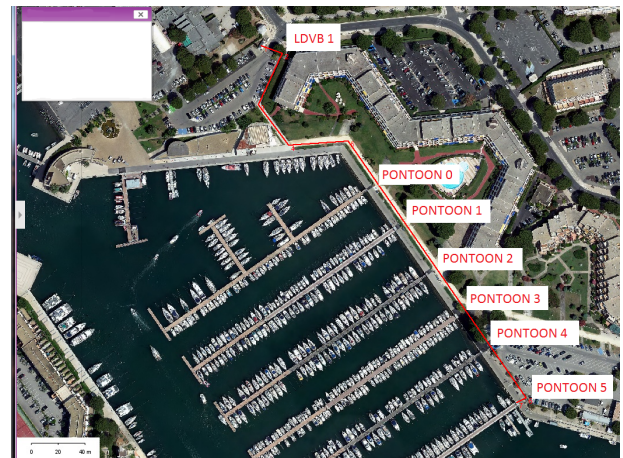


Fig. 1. Cheminement des câbles du TGBT 1 aux pontons 0 à 5 (fait sous veremap).

3. MODÉLISATION DE LA CHARGE

La charge correspond aux besoins des consommateurs. On la modélise en formulant la relation mathématique qui lie la tension aux puissances active et réactive consommées. Un modèle de charge fait partie d'une des deux catégories suivantes : statique et dynamique qui en bref, traduisent respectivement le régime permanent et les régimes transitoire et permanent. Pendant des années les charges ont été modélisées comme des constantes, ne dépendant pas du temps. Les charges étaient souvent représentées par leurs puissances active (P en VA) et réactive (Q en VAR), ou par leur impédance (Z en Ω) lors des études de stabilité. Deux modèles standards ont été créés, le modèle polynomial ZIP et le modèle exponentiel, qui dans certains cas, ces modèles peuvent inclure une dépendance en fréquence [8][9][10][11][19].

Les caractéristiques des charges ont un impact sur la stabilité du système réseau électrique. Des études ont été menées pour représenter et prédire les charges mais leur modélisation s'avère compliquée ; il existe un trop grand nombre d'appareils de consommation comme les lampes fluorescentes et incandescentes, l'électroménager, les appareils de CVC, les moteurs, etc. Surtout que certaines charges dépendent de facteurs tels que le temps (heure, jour, saison) ou les conditions météorologiques par exemple. Pour simplifier cette modélisation, des types de charges ont été créés en fonction de caractéristiques électriques similaires ou d'un usage similaire. On divise les charges selon les types : résistives, inductives et capacitatives ou en une combinaison des trois. Ils correspondent respectivement à des charges de chaleur, de lumière et mécaniques [12][13].

Il y a deux approches pour déterminer les caractéristiques des charges : l'approche basée sur les mesures et l'approche basée sur les composants ; connues respectivement comme approches « Top-down » et « Bottom-up » dans la littérature [22].

3.1. Approche mesures

Nous avons choisi cette approche parce qu'elle utilise les mesures effectuées au niveau des sous-stations, afin de déterminer les caractéristiques des charges qui décrivent comment les puissances active et réactive réagissent à la tension et à la fréquence. Nous avons planifié des scénarios en fonctionnement normal ou des expériences pour exciter le système, avec des perturbations intentionnelles par exemple. Et on termine par l'identification des paramètres à l'aide de méthodes d'identification (voir la section appropriée plus loin dans l'article). L'avantage de cette méthode est la disponibilité des données réelles du système étudié [14]. Pour l'obtention de mesures d'énergie et de puissance, nous avons utilisé un énergimètre PCEPA 8000. Il permet de relever toutes les grandeurs liées à l'électricité comme les tensions simples et composées, les courants de ligne, les puissances et facteurs de puissances. L'appareil de mesures a été placé dans le TGBT 1 au niveau du disjoncteur correspondant au ponton considéré.

3.2. Procédure de modélisation

La procédure est réalisée sous Matlab et peut se résumer en trois étapes (voir aussi Fig 2) :

1. conception des signaux d'entrées/sortie depuis les données expérimentales ;
2. identification des paramètres du modèle grâce à un algorithme ;
3. validation du modèle.

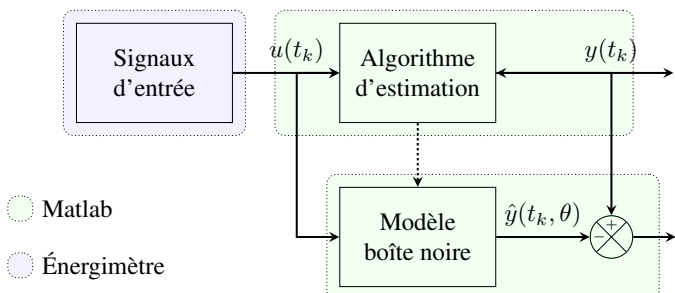


Fig. 2. Procédure de modélisation données de l'énergimètre avec Matlab. $u(t_k)$ est le signal d'entrée, $y(t_k)$ le signal de sortie, $\hat{y}(t_k, \theta)$ la sortie du modèle.

3.2.1. Entrées/sortie

La sortie du modèle est la variable que nous cherchons à modéliser et à prédire, donc la puissance consommée par les pontons. Cela peut être la puissance active ou apparente. Quant aux entrées, elles doivent avoir une forte influence sur la sortie et

être disponibles. Puisque les puissances dépendent mathématiquement des grandeurs de tension et de courant, ces dernières sont choisies.

3.2.2. Algorithme d'estimation

L'algorithme d'estimation consiste à déterminer les paramètres du modèle depuis les données expérimentales pour construire le meilleur modèle possible. La Fig. 3 montre de façon simplifiée le concept d'identification des paramètres (par exemple une charge).

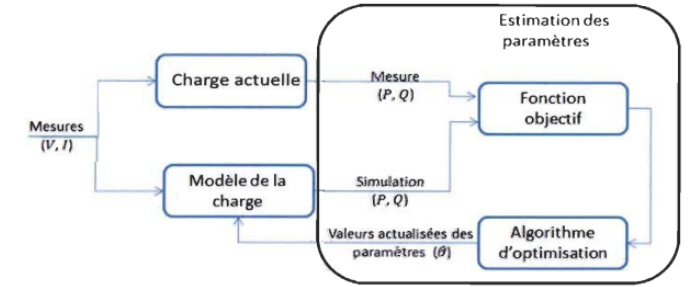


Fig. 3. Schéma du concept d'identification des paramètres [15].

Les algorithmes d'estimation des paramètres utilisés sont basés sur la minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre la valeur mesurée et la valeur estimée, ainsi la fonction objectif (ou fonction de coût) est :

$$J = \min_{\theta \in Z} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[\left(P(k) - \hat{P}(k) \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$J = \min_{\phi \in Z} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[\left(Q(k) - \hat{Q}(k) \right)^2 \right] \quad (2)$$

où θ est le vecteur des paramètres à estimer, N est le nombre total de données, Z est l'espace des paramètres, $P(k)$ et $Q(k)$ sont les valeurs des puissances active et réactive mesurées et $\hat{P}(k)$, $\hat{Q}(k)$ sont les valeurs des puissances active et réactive estimées.

3.2.3. Validation du modèle

Une méthode simple est la validation croisée : les données disponibles sont divisées en plusieurs jeux. Certains servent à identifier le modèle et d'autres à le valider ; on compare les sorties calculées avec les mesures d'un jeu n'ayant pas été utilisé pour l'estimation. Les résultats sont déclarés satisfaisants si le taux d'erreur est inférieur à 10%. Ils sont jugés satisfaisants parce que les 10% représentent les incertitudes dues aux saisons, aux perturbations aléatoires et autres interférences qui agissent le réseau électrique.

4. RÉSULTATS

À cause du manque d'espace, tous les pontons ne seront pas présentés. Nous avons choisi les résultats de la modélisation des pontons 0, 1 et 3 parce que ce sont ceux qui ont les comportements les plus hétérogènes ; les autres ont des résultats très proches du premier ponton. Les mesures des pontons sont effectuées au niveau des disjoncteurs appelés respectivement Q10, Q12 et Q14 dans le TGBT 1.

4.1. Type de charge

Sur les graphiques de la Fig. 4, sont tracées les trois courbes de puissances des trois pontons. On peut voir que la puissance réactive se situe toujours entre 0 et 1 kVA. Sur les graphiques

des disjoncteurs Q10 et Q12, cette puissance réactive et relativement basse par rapport à la puissance active. En conséquence, la puissance apparente est légèrement supérieure à la puissance active ; ce qui signifie que le comportement de la charge est globalement résistif.

Les charges résistives sont généralement utilisées pour convertir le courant en une forme d'énergie comme la chaleur [16]. Dans une charge résistive, le courant est en phase avec la tension. Elles présentent des caractéristiques d'impédance constantes, avec une consommation d'énergie réactive très faible ou négligeable. Dans ce type de charges, on retrouve les appareils de chauffage pour les cabines, l'eau ou encore la cuisine. Ces charges sont majoritaires dans l'équipement d'un bateau devant les lumières. À ce propos, les lumières peuvent être de type résistif en fonction de leur nature. Les charges qui agissent sur la puissance réactive sont les charges inductives ; Ce sont les charges qui alimentent des moteurs électriques comme les appareils ménagers, les ventilateurs, les aspirateurs et les climatiseurs. On retrouve ce type de charge dans les bateaux de grandes tailles.

Le disjoncteur Q12 affiche un comportement différent où les puissances actives et réactives sont toutes les deux faibles ; il n'y avait pas d'élément fortement consommateur au moment des mesures. Cependant nous notons que la puissance active est légèrement supérieure à la puissance réactive.

4.2. Modèle

Le modèle est estimé à partir des signaux échantillonnés, des mesures des entrées/sortie au temps k . Aussi, la structure est composée de la relation entre ces entrées/sortie, appelée partie déterministe, et d'une partie stochastique qui reflète les incertitudes et les perturbations quand elles existent.

Nous avons opté pour une structure de modèle d'état parce qu'elle est la plus communément employée et convient parfaitement à l'estimation des états en dynamique [17]. Le principe est de prédire le futur de la sortie à partir du passé, du présent et des entrées. La relation entre les entrées, les perturbations et les sorties d'un modèle d'état est donnée par [18] :

$$\begin{cases} x(t_{k+1}) = Ax(t_k) + Bu(t_k) + Ke(t_k) \\ y(t_k) = Cx(t_k) + Du(t_k) + e(t_k) \end{cases} \quad (3)$$

Où $u(t_k)$ est le vecteur des entrées, $y(t_k)$ est le vecteur de la sortie, $e(t_k)$ sont les perturbations et $x(t_k)$ est le vecteur d'état. A , B , C , D sont les matrices du modèle et sont respectivement appelées : matrice d'état, matrice de commande, matrice d'observation et matrice d'action directe. Elles regroupent les paramètres inconnus du modèle dans un vecteur noté θ . Ces modèles présentent l'avantage d'être indépendants de la géométrie du réseau, des caractéristiques des câbles, etc., ne dépendant uniquement de la campagne de mesures de données d'Entrée/Sortie. Ce qui implique comme contrainte que ces données d'Entrée/Sortie doivent être riches en information.

Soit u le vecteur des entrées incluant les tensions composées (entre phases) V_{12} , V_{23} et V_{31} ; les courants de phase C_1 , C_2 et C_3 ; noté $u = [V_{12}, V_{23}, V_{31}, C_1, C_2, C_3]$.

Soit $y = [P, Q]$ le vecteur des sorties ; P et Q étant respectivement les puissances active et réactive totales au disjoncteur, c'est-à-dire la somme des puissances active et réactive de chaque phase (théorème de Boucherot).

La Figure 5 présente de très bons résultats pour la modélisation de la puissance active avec deux coefficients de ressemblance de valeur supérieure à 90 % et un résultat assez bon où le FIT est de 63 %. Cette chute de valeur du coefficient de ressemblance est certainement due à la faible amplitude de la puissance. Il est plus difficile de prédire une consommation minimale que « classique ».

Les valeurs des FIT de puissance réactive sont, elles, très

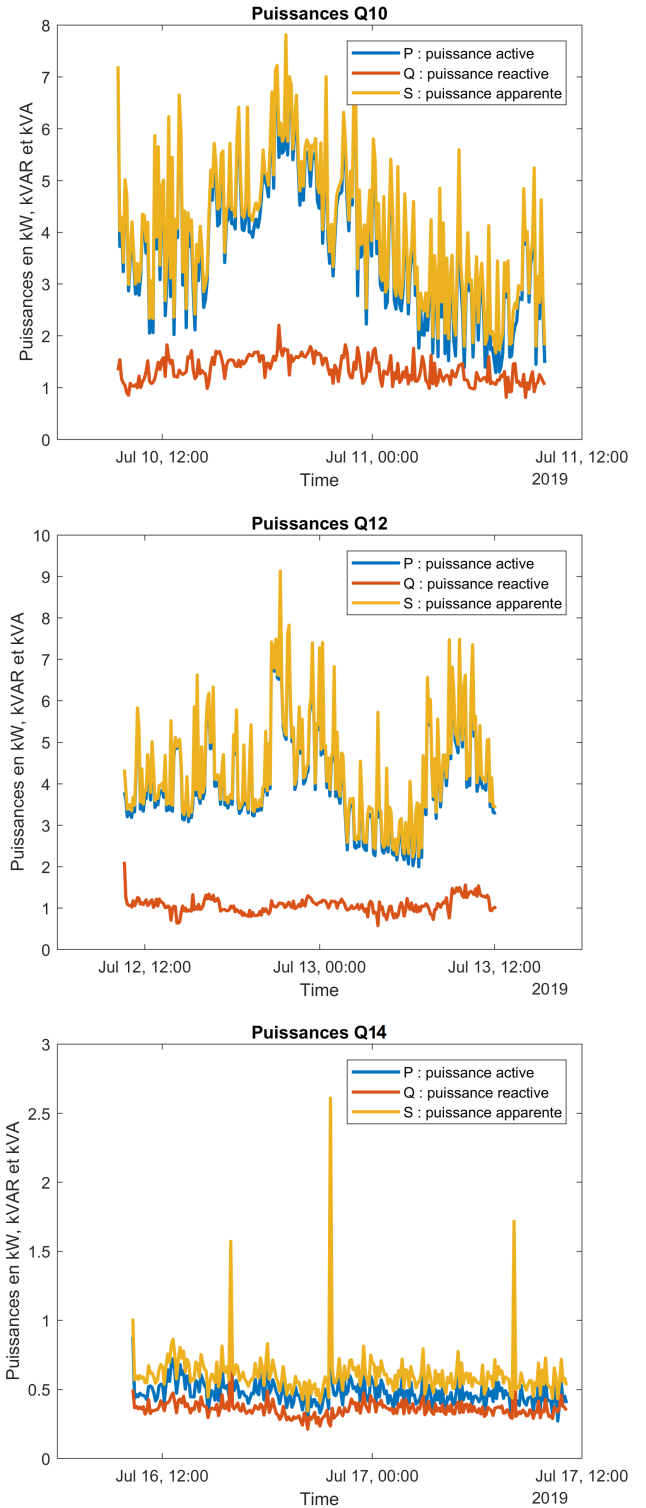


Fig. 4. Puissances et boîtes à moustaches des puissances des disjoncteurs Q10, Q12 et Q14 représentant respectivement les pontons 0, 1 et 3.

faibles : 16 %, 22 % et -20 %. Oui, nous avons même un coefficient négatif. Celui-ci est calculé pour le disjoncteur Q12 où la puissance active a elle aussi un coefficient très bas. Nous sommes actuellement à la recherche des raisons des faibles capacités de prédiction de la puissance réactive, et à la recherche de solutions pour en améliorer la précision comme en sélectionnant et ajoutant d'autres données en entrée du modèle.

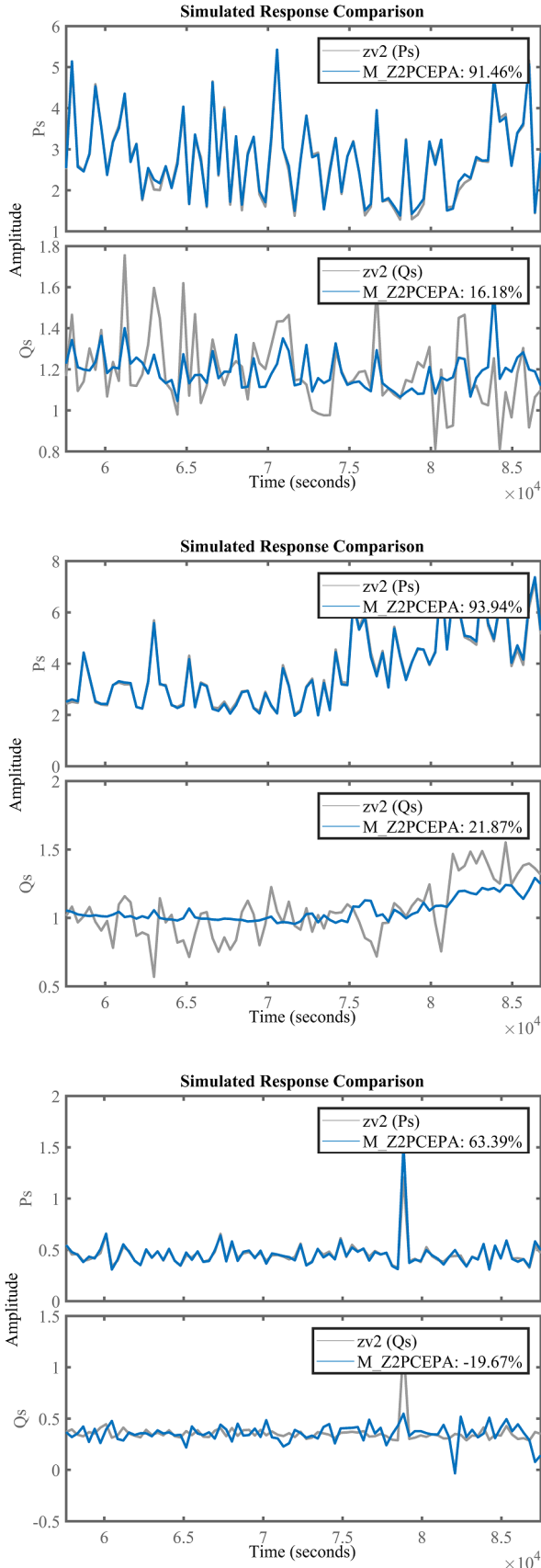


Fig. 5. Modèles de charges, puissances active et réactive de pontons à partir de disjoncteurs ; respectivement de haut en bas : Q10, Q12 et Q14.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La représentation de la charge des pontons présente un comportement majoritairement résistif. Les charges résistives sont généralement utilisées pour convertir le courant en une forme d'énergie comme la chaleur. Dans une charge résistive, le courant est en phase avec la tension. Elles présentent des caractéristiques d'impédance constantes, avec une consommation d'énergie réactive très faible ou négligeable.

Cette étude nous permet de choisir les modèles d'états comme structure et de valider le choix des entrées/sortie. La modélisation de la puissance active est considérée très bonne alors que la modélisation de la puissance réactive est très insuffisante, insatisfaisante.

Comme perspectives, nous voulons tester cette procédure de modélisation depuis des données fournies par un système de compteurs CPL installé dans la marina. De plus, il serait intéressant de comparer ces futurs résultats avec des modèles statistiques déduits des méthodes de forêts aléatoires et algorithmes CART.

Dans ce travail nous avons utilisé l'approche mesures mais l'approche composants développée par EPRI[20][21] mérite qu'on s'intéresse à elle. Elle est moins coûteuse et plus rapide à mettre en place. Cependant elle est moins précise voire moins fiable parce qu'elle réside sur la construction d'un modèle de charge à partir d'informations sur ses parties constitutives. La charge appartient à une ou des classes de charge que sont l'industriel, le commercial, le résidentiel et l'agricole. Chaque classe est déclinée en composition de charge, qui fait référence à un pourcentage de participation d'un composant sur la consommation active. Les informations sur les caractéristiques de chaque charge sont relatives aux caractéristiques physiques et électriques des appareils consommateurs [8]. Ainsi en perspectives, nous imaginons pouvoir utiliser cette approche en établissant un classement consommateur par type de bateau. Un type de bateau serait défini par sa taille, sa puissance moteur, ses systèmes de production et de stockage d'électricité et bien entendu par tout l'équipement communément utilisé à bord.

Des exemples de composants de charge dans la classe de charge résidentielle sont le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS), l'éclairage, etc. Dans ces cas, les facteurs de participation relatifs correspondent à la composition de la charge de la classe de charge résidentielle [20].

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Union Européenne et spécialement le Fond de Développement Régional et Européen qui finance en partie ce projet avec la région Occitanie.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Chiffres clés de l'énergie, édition 2019.
- [2] Clean Energy For All Europeans, European Commission, Brussels, 2016.
- [3] European Commission : An energy policy for Europe, COM(2007) 1 final, 10.1.2007.
- [4] The EU climate and energy package. Brussels, 2010.
- [5] De Paoli, Luigi. (2014). The EU climate and energy policy : What about the new targets for 2030 ?. *ECONOMICS AND POLICY OF ENERGY AND THE ENVIRONMENT*. 27-51. 10.
- [6] Hatziaargyriou, Nikos & Asano, Hiroshi & Iravani, Reza & Marnay, Chris. (2007). Microgrids. *Power and Energy Magazine, IEEE*. 5. 78 - 94.
- [7] Guerassimoff, G., Microgrids : pourquoi, pour qui ?, 2017.
- [8] P. Kundur, Neal J. Balu, and Mark G. Lauby. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [9] Mohsen Guizani, Ammar Rayes, Bilal Khan, and Ala Al-Fuqaha. *Network modeling and simulation : a practical perspective*. John Wiley & Sons, 2010.
- [10] Pierre Escané and Jean-Marie Escané. *Réseaux électriques linéaires à constantes réparties*. Techniques de l'ingénieur, 1999.

- [11] Jean-Claude Sabonnadière. Gestion de l'énergie et efficacité énergétique. Number 4 in Nouvelles technologies de l'énergie. Hermes science, 2007.
- [12] Marija Ilić and Rupamathi Jaddivada and Xia Miao. Modeling and analysis methods for assessing stability of microgrids. IFAC-PapersOnLine, 2017.
- [13] S. Barker, S. Kalra, D. Irwin and P. Shenoy. Empirical characterization and modeling of electrical loads in smart homes, 2013 International Green Computing Conference Proceedings, Arlington, VA, 2013, pp. 1-10.
- [14] Kenan Hatipoglu, Ismail Fidan, and Ghadir Radman. Investigating effect of voltage changes on static ZIP load model in a microgrid environment. In 2012 North American Power Symposium (NAPS). IEEE, sep 2012.
- [15] Gomez, A. D. P. R., Étude sur la modélisation des charges dans un contexte de gestion locale de la demande dans une installation résidentielle. Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
- [16] McKenna, K. & Keane, A., Electrical and Thermal Characteristics of Household Appliances : Voltage Dependency, Harmonics and Thermal RC Parameters. 2016.
- [17] Soliman, S. A.-h. & Al-Kandari, A. M., Electrical Load Forecasting - Modelling and Model Construction, Butterworth-Heinemann (Ed.), 2010.
- [18] L. Ljung, System Identification : Theory for the User, 2nd ed., ser. Prentice Hall Information And System Sciences. Englewood Cliffs :Prentice Hall, 1999.
- [19] C. Concordia and S. Ihara. Load Representation in Power System Stability Studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101(4) :969–977, April 1982.
- [20] Measurement-Based Load Modeling. EPRI, Palo Alto, CA : 2006. 1014402.
- [21] Advanced load modeling, Electrical Power Research Institute (EPRI), Tech. Rep. 1007318, Sept. 2002.
- [22] K Yamashita and S. Djokic and J. Matevosyan and F.O. Resende and L.M. Korunovic and Z.Y. Dong and J.V. Milanovic, Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks – Scope and Status of the Work of CIGRE WG C4.605. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45, 405-410.