

Power-HiL à echelle réduite d'une génératrice EMR : application à un système houlomoteur

Florian DUPRIEZ-ROBIN¹, Guénaël LE SOLLIEC¹, Hélène CLÉMOT², Aurélien BABARIT³, Tuan TRAN-QUOC⁴

¹ CEA-Tech Pays de la Loire, Technocampus Océan, 5 Rue de l'Halbrane, Bouguenais, 44340, France, ² CEA-Tech Pays de la Loire au moment des travaux ³ LHEEA Lab, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, NANTES Cedex 3, 44321, France, ⁴ CEA-LITEN/DTS/LSEI, Technopôle Savoie Technolac, 50 Av. du Lac Léman, Le Bourget-du-Lac, 73370, France

RESUME – Les tests Power-HIL sont de plus en plus utilisés pour la validation des systèmes de conversion d'énergie électrique. Ceux-ci permettent de valider le système complet avant le déploiement dans des conditions réelles, et de le tester dans des conditions extrêmes : conditions météorologiques, état des échanges de puissance et du réseau... Les systèmes de production d'Énergie Marine Renouvelable (EMR) sont en plein développement et nécessitent une consolidation en amont d'un déploiement sur site réel. Le coût de déploiement étant très important, réaliser un maximum de test avant la mise en place en conditions réelles permet de limiter les risques de panne, de non fonctionnement et le coût de réparation/modification. Parmi ces EMR, l'énergie houlomotrice en provenance des vagues a un fort potentiel mondial. L'intégration au réseau de l'énergie houlomotrice est par contre complexe car variable et peut déséquilibrer un réseau électrique faible. Un test Power-Hardware in the Loop permet de valider la commande d'un tel système pour son intégration au réseau électrique. Pour cette étude, le générateur houlomoteur modélisé est le SEAREV développé par le LHEEA, seulement sa puissance unitaire étant de 1,1 MW, une étape de mise à l'échelle s'avère indispensable afin d'être compatible avec les équipements de puissance utilisés pour cette simulation. Elle est réalisée selon le principe de similitude et le théorème de Vaschy-Buchingham. Les résultats obtenus permettent de valider la modélisation et la commande appliquée au SEAREV.

Mots-clés—P-HIL, SEAREV, Houlomoteur, Mise à l'échelle

1. INTRODUCTION

La démarche « Model-based Design » est aujourd'hui couramment utilisée pour améliorer le développement d'un système et son contrôle/commande. Elle consiste à modéliser le système au plus tôt pour tester les choix techniques dès la phase de définition. Il existe alors différentes étapes, du tout simulé (on parle de *Model-in-the-Loop*) vers l'intégration semi-virtuelle de tout ou partie du système afin de valider son fonctionnement avec simulation complète de son environnement (on parle de tests *Hardware-in-the-Loop*). Pour émuler des flux de puissance importants d'une électronique de puissance (par exemple ici une génératrice et son convertisseur), un amplificateur haute tension et haut courant est nécessaire. Il est alors question de Power-Hardware in the Loop (P-HIL). Cette étape de test permet de valider le fonctionnement d'un système et son contrôle en conditions nominales, comme il sera fait dans cet article, ou dégradées.

Les systèmes de production d'énergies marines renouvelables sont en plein essor. Lors de leur développement, une phase de validation est nécessaire pour limiter les risques de dysfonctionnement lors du déploiement en condition réelles. Afin d'émuler l'environnement futur de ces systèmes avec de vrais échanges de puissances et diverses sollicitations externes, les laboratoires de recherche et les industriels passent par une étape de test sur des plateformes de type Hardware in the Loop (HIL). Il s'agit donc d'une simulation temps réel interfaçant un modèle fonctionnant en temps réel avec des équipements réels.

Le système houlomoteur testé dans cet article est le SEAREV [1]. Ce système est intéressant par sa prise directe du moteur électrique sur une masse en rotation (système à entraînement direct). Une première étape nécessaire aux essais HIL est le développement d'un modèle de la chaîne de conversion de la vague au réseau électrique, modèle développé par H. Clémot [2]. La commande développée permet de limiter la puissance absorbée par la partie électrique de SEAREV pour limiter le dimensionnement électrique de celle-ci.

Dans cet article, il vous sera présenté le SEAREV et sa modélisation adaptée au test P-HIL, puis le principe de la mise à l'échelle, et enfin les résultats d'un test P-HIL avec la validation de la commande de limitation de la puissance absorbée.

2. MODÉLISATION & P-HIL WAVE TO WIRE

Le modèle de raccordement d'un générateur SEAREV, présenté en figure 1, est composé :

- D'un système de conversion de l'énergie des vagues en énergie mécanique de rotation : l'enveloppe du système houlomoteur ainsi que sa masse déportée ;
- D'un générateur électrique d'une puissance crête de 1,1MW avec une vitesse nominale de 1rad/s ;
- D'un convertisseur AC/DC élévateur qui permet de piloter le couple du générateur électrique et d'adapter la tension à celle du bus DC ;
- D'un convertisseur DC/AC pour injecter la puissance produite dans le réseau électrique ;
- D'un réseau électrique de raccordement.

Ce modèle a été développé et validé sous Matlab/Simulink [2]. Dans un premier temps, un test SIL (Software in the loop) de simulation en temps réel de l'ensemble

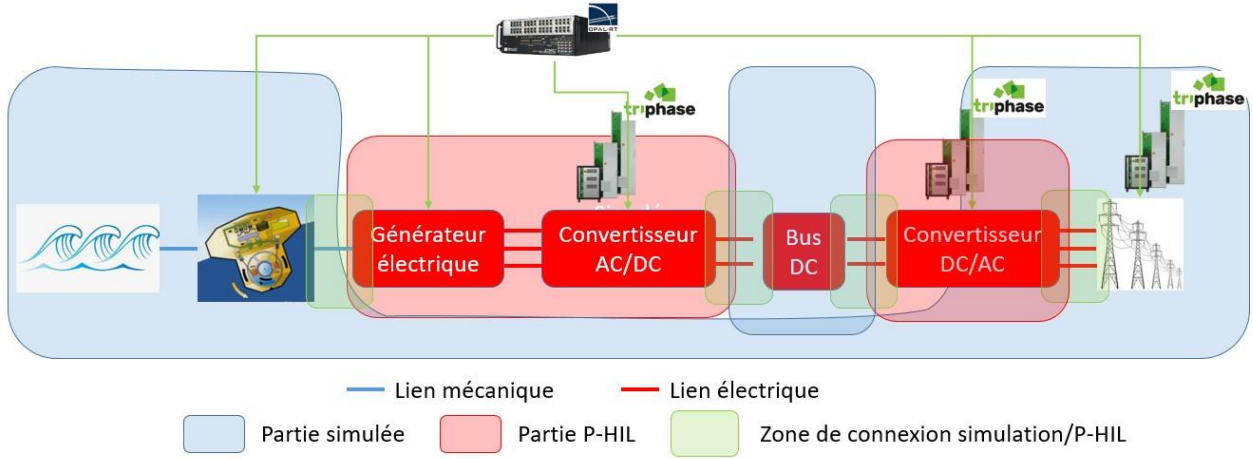


Fig 1: Schéma du modèle P-HIL du système houlomoteur SEAREV

de la chaîne de conversion wave to wire (de la vague au réseau électrique) est effectué à l'aide du logiciel RT-LAB et d'une cible de calcul OP5600 d'Opal-RT et servira de référence. Pour les essais P-HIL, l'objectif est d'émuler sur un banc de test de machine électrique la génératrice et son électronique de puissance afin de valider les algorithmes de contrôle du système avec une simulation de l'intermittence de la ressource et de l'état du réseau électrique. La génératrice de 1.1 MW sera émulée sur le banc machine électrique avec une génératrice d'une puissance de 110 kW pilotée par un étage de conversion de 180 kW. Le calculateur Opal-RT simulera la conversion hydro-mécanique et le réseau électrique, les algorithmes de contrôle/commande sont également prototypés sur le système Opal-RT. L'intégration nécessite une mise à l'échelle des grandeurs entre les modèles et la machine du banc d'essais.

3. MISE A L'ECHELLE

3.1. Méthodologie de mise à l'échelle

La méthodologie de mise à l'échelle utilisée est basée sur le principe de similitude et de théorème de Vaschy-Buckingham [3] : Pour un problème impliquant n grandeurs physiques caractérisées par r unités fondamentales, il existe $p = n - r$ grandeurs adimensionnelles nécessaires pour caractériser le comportement du système.

Dans notre cas, il y a deux zones d'interconnexion entre la partie simulée et la partie émulée en P-HIL :

- entre SEAREV simulé et le générateur électrique émulé;
- entre le convertisseur DC/AC émulé et le réseau électrique simulé.

Le tableau 1 présente les valeurs à modifier pour cette interconnexion. On peut remarquer une variation importante des paramètres sur la première interconnexion, entre le SEAREV et le générateur, en plus d'un gain de 10 entre la puissance nominale de SEAREV et notre banc P-HIL. Sur la seconde interconnexion, seul le courant se trouve augmenté d'un facteur 10.

Ce problème de mise à l'échelle doit être traité comme deux mises à l'échelle séparée : la première est une mise à l'échelle mécanique, la seconde électrique.

Les grandeurs dimensionnées listées précédemment doivent être classifiées en deux catégories :

- 1ère catégorie : r grandeurs pour lesquelles le facteur d'échelle est choisi selon le matériel à disposition, selon

d'éventuelles contraintes, etc. Ces grandeurs sont appelées « grandeurs répétées » car elles sont utilisées pour définir les facteurs d'échelle des grandeurs de la seconde catégorie.

- 2ème catégorie : p grandeurs pour lesquelles le facteur d'échelle est déduit des facteurs d'échelle des grandeurs de la 1ère catégorie.

Tableau 1. Mise à l'échelle pour le test P-HIL

	Mise à l'échelle	SEAREV	Banc P-HIL	Unité SI
Zone de connexion SEAREV/générateur	Couple nominal	2,1M.N.m	800Nm	$kg.m^2.s^{-2}$
	Vitesse nominale	1 rad/s	157 rad/s	s^{-1}
Zone de connexion convertisseur/réseau	Tension	400V _{eff}	400V _{eff}	$kg.m^2.s^{-3}.A^{-1}$
	Courant	1590A	159A	A

Les expérimentations considérées dans ces travaux étant basées sur l'utilisation d'un moteur réel et de convertisseur à échelle réduite, il y a deux zones d'interconnexion ayant chacune un facteur d'échelle.

3.2. Mise à l'échelle entre SEAREV et le générateur électrique

Il y a deux variables nécessaires à la mise à l'échelle : le couple et à la vitesse de rotation du moteur : ce sont les deux paramètres liés à la 1ère catégorie.

Un facteur d'échelle est défini par le rapport entre la grandeur mise à l'échelle et la grandeur d'origine à pleine échelle. Les facteurs d'échelle $S_{\Gamma_{tot}}$ et S_{Ω} liés respectivement au couple des génératrices et à leurs vitesses de rotation, sont définis par :

$$S_{\Gamma_{tot}} = \frac{\Gamma_{tot-R}}{\Gamma_{tot-F}} = \frac{800}{2.1.10^6}$$

$$S_{\Omega} = \frac{\Omega_{tot-R}}{\Omega_{tot-F}} = \frac{157}{1}$$

Avec Γ_{tot-R} le couple réduit, Γ_{tot-F} le couple initial, Ω_{tot-R} la vitesse réduite et Ω_{tot-F} la vitesse initiale. Ainsi, la puissance $P_{\Gamma_{\Omega_{tot-R}}}^*$ de la génératrice est :

$$P_{\Gamma_{\Omega_{tot-R}}}^* = P_{\Gamma_{\Omega_{tot-F}}}^* \times S_{\Gamma_{tot}} \times S_{\Omega} = 0.0598$$



Fig 2: Schéma du modèle P-HIL du système houlomoteur SEAREV

Cette mise à l'échelle est possible à partir de ces paramètres.

3.3. Mise à l'échelle entre l'onduleur AC et le réseau électrique

Il y a une variable nécessaire à la mise à l'échelle : le courant en sortie de l'onduleur : c'est le seul paramètre lié à la 1ère catégorie. En effet la tension en sortie d'onduleur est identique entre le modèle et la plateforme.

Un facteur d'échelle est défini par le rapport entre la grandeur mise à l'échelle et la grandeur d'origine à pleine échelle. Le facteur d'échelle S_I lié au courant de l'onduleur définis par :

$$S_{I_{tot}} = \frac{I_{tot-R}}{I_{tot-F}} = \frac{159}{1590}$$

Avec I_{tot-R} le courant réduit, I_{tot-F} le courant initial. Ainsi, la puissance $P_{I_{tot-R}}^*$ de la génératrice est :

$$P_{I_{tot-R}}^* = P_{I_{tot-F}}^* \times S_{I_{tot}} = 0.1$$

Cette mise à l'échelle est possible à partir de ces paramètres.

3.4. Différence entre les mises à l'échelle

La différence entre ces deux mises à l'échelle est rendue possible par la simulation du bus DC central. Sur la plateforme SEANERGY, ce bus peut être alimenté par une source extérieure.

Dans le cas présent, il y a un rapport de puissance de presque 2 entre les deux mises à l'échelle, donc un apport d'énergie conséquent. Une autre possibilité serait de diminuer la puissance en sortie de l'onduleur pour arriver au même ratio. Ce choix n'est pas idéal car plus le ratio est élevé pour chaque paramètre moins la mise à l'échelle est représentative.

4. PRESENTATION DU BANC D'EXPERIMENTATION

La figure 2 présente le banc d'expérimentation. Il est séparé en deux parties pouvant échanger de la puissance :

- la première partie consiste en quatre émulateurs de sources (courant ou tension). Chaque source peut être pilotée de façon autonome ou en simultané. Dans le cas présent, les sources seront utilisées deux à deux, 2 sources pilotées en tension et émulant le réseau électrique au point de raccordement de l'onduleur, 2 sources pilotées en courant et émulant l'onduleur du générateur houlomoteur ;
- la deuxième partie correspond au banc moteur composé de 2 machines électrique, d'une puissance électrique de 110kW, raccordé mécaniquement. La première, une machine asynchrone, sera pilotée par Opal-RT pour émuler la partie mécanique du système houlomoteur. La seconde, une machine synchrone à aimant permanent, émuler la génératrice de SEAREV.

Ces deux parties sont constituées d'armoires de puissance Triphase et sont pilotées par une cible temps réel Opal-RT. Un schéma de l'installation est présenté en figure 2. Les équipements de puissance Triphase sont des onduleurs triphasés réversibles dont le pilotage est un circuit triphasé passif d'alimentation ainsi que deux circuits triphasés alternatifs. Ces circuits peuvent supporter des tensions de 460 V_{eff} entre charge et puissance de 90 kW chacun. Les circuits triphasés alternatifs sont connectés aux circuits issus du générateur ou au simulateur de réseau.

Le banc moteur est, quant à lui, composé de deux moteurs fonctionnant l'un en face de l'autre : un moteur à induction et un moteur synchrone à aimants permanents. Cette configuration est utilisée pour émuler le PTO du SEAREV (conversion de l'énergie mécanique issue du SEAREV en énergie électrique). La vitesse de rotation, calculée à l'aide du modèle, est imposée au moteur à induction, qui entraîne alors la machine synchrone à aimants permanents. Le couple d'amortissement imposé par cette dernière sur le moteur à induction est aussi dicté par le modèle wave-to-wire et ses régulations. Chacun de ces deux moteurs à une puissance de 110kW, une tension de 400V et un courant maximal de 191 A pour le moteur à induction et 180A pour le moteur à aimants permanents. Le couple est limité à 800Nm pour des vitesses entre 0 et 1500 tours par minute. L'efficacité du moteur à aimants permanents est supérieure à 95%, et celle du moteur à induction est supérieure à 93%. Le contrôle et la communication de ce banc moteur se fait à l'aide d'armoires de puissance Triphase permettant de travailler dans les quatre quadrants (de puissance supérieure à celles présentées précédemment). Ces armoires sont reliées à un bus DC créé par une autre alimentation.

5. RESULTATS

5.1. Différences entre les mises à l'échelle

La figure 3 présente le résultat du suivi de consigne sur la première interconnexion. On peut remarquer qu'une fois que le gain est appliqué, le banc P-HIL permet de répondre comme attendu par la simulation du système à l'échelle réelle. La mise à l'échelle n'empêche donc pas de valider la loi de commande qui est bien respectée. Dans le cas présent, une validation de l'écrtage de la puissance par un écrtage du couple du moteur électrique. A fortiori, cette intégration à l'échelle réduite permettra de réaliser au banc une analyse de sensibilité du système et son contrôle. Des résultats supplémentaires seront ajoutés pour la deuxième zone de connexion.

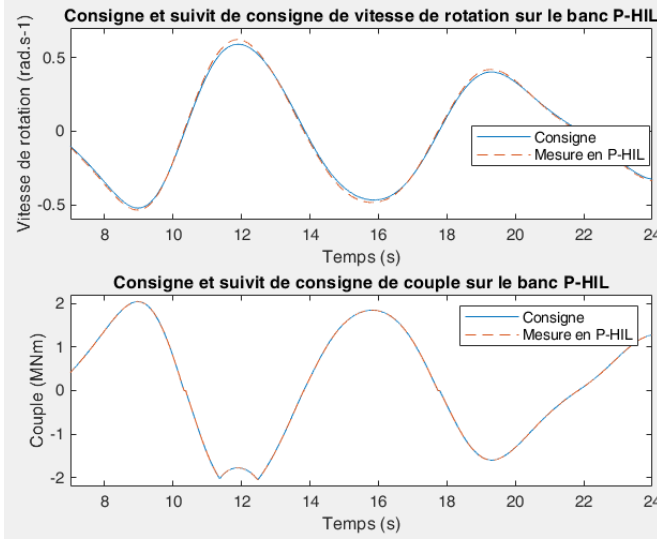


Fig. 3. Comparaison de la consigne et de la mesure sur le banc P-HIL pour la commande du moteur mise à l'échelle

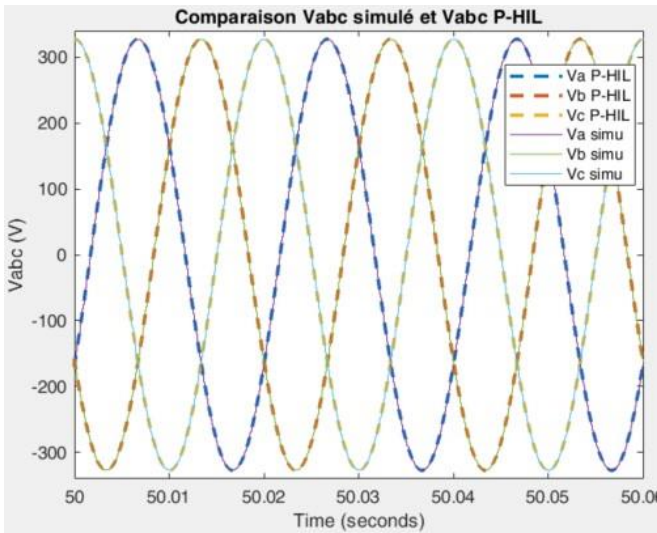


Fig. 4. Comparaison de la consigne et de la mesure sur le banc P-HIL pour la commande de l'onduleur

La simulation et l'émulation P-HIL ont exactement le même résultat à l'échelle du moteur électrique, mais aussi à celui de l'onduleur. Pour cela, la commande envoyée par Opal-RT à la cible Triphase est avancée du temps de communication aller/retour pour ne pas entraîner de décalage entre la consigne et le retour d'information de Triphase à Opal-RT

5.2. Analyse de l'impact d'un houlomoteur sur un réseau faible

Le modèle de flickermètre utilisé correspond à celui utilisé dans [4]. Il répond à la norme CEI 61000-4-15 [5] avec 6400 classe. La limite de flicker est de 0,35. C'est la limite la plus contraignante du code de réseau électrique.

Le réseau a un angle d'impédance défini par l'équation suivante :

$$\psi_k = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$$

Avec X et R la résistance et la réactance de Thevenin du réseau électrique source.

En plus de cet angle d'impédance, il est nécessaire de connaître le ratio de la puissance de court-circuit du réseau S_{cc} en fonction de la puissance du générateur houlomoteur

$S_{Houlomoteur}$. Les résultats obtenus en P-HIL sont égaux à ceux obtenus en simulation [4]. La figure 5 présente le résultat P-HIL de l'impact de l'ondulation de courant sur la tension en sortie d'onduleur.

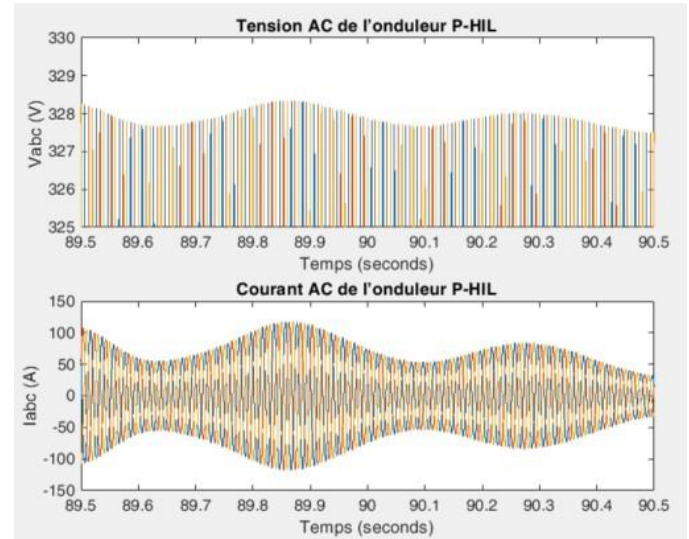


Fig. 5. Impact de la variation de courant sur la tension d'entrée de l'onduleur en P-HIL avec un ratio $S_{cc}/S_{Houlomoteur}$ de 15 et un angle de 50°

Les figure 6, 7 et 8 présentent ces résultats pour des états de mer représentatif :

- d'un état peu énergétique : hauteur de houle $H_s = 2m$ et période de pic $T_p = 4s$;
- d'un état peu énergétique : hauteur de houle $H_s = 2m$ et période de pic $T_p = 4s$;
- d'un état peu énergétique : hauteur de houle $H_s = 2m$ et période de pic $T_p = 4s$;

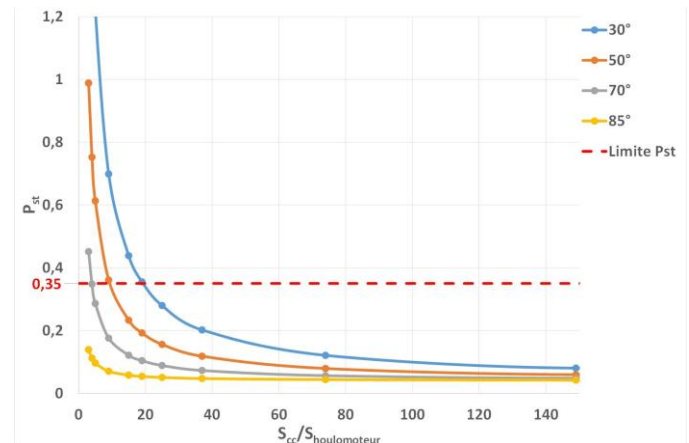


Figure 6 : Flicker pour $H_s = 2$ et $T_p = 4$ pour différent angle d'impédance du réseau

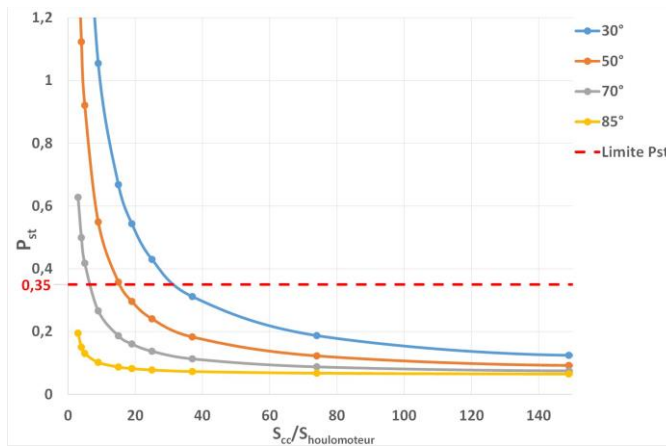


Figure 7 : Flicker pour $H_s = 3$ et $T_p = 9$ pour différent angle d'impédance du réseau

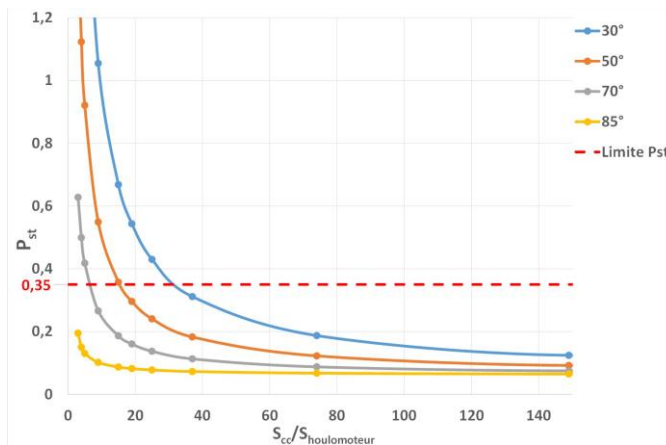


Figure 8 : Flicker pour $H_s = 5$ et $T_p = 6$ pour différent angle d'impédance du réseau

La contrainte en flicker est bien reproduite et ne peut pas être respectée pour chaque état de mer. Pour un état de mer peu énergétique (H_s, T_p)=(2m, 4s), il faut un réseau très faible ($S_{cc}/S_{Houlomoteur}$ inférieur à 15) pour qu'il y ait un risque de flicker et ce quel que soit l'angle d'impédance. Cette valeur de rapport de court-circuit est déjà très faible pour des réseaux ayant

un angle d'impédance inférieur à 50° . Pour un état de mer très énergétique, au contraire, même lorsque ce ratio $S_{cc}/S_{Houlomoteur}$ est très élevé (supérieur à 150), le niveau de flicker calculé est toujours supérieur à la limite.

Un système houlomoteur seul peut entraîner le déséquilibre d'un réseau électrique faible, comme une île ou un bout de ligne, ce qui est courant dans les réseaux électriques de bord de mer. Cet état a été simulé durant la thèse de H Clémot [4], et validé par ce test P-HIL mis à l'échelle.

6. CONCLUSION

Les travaux sur le test P-HIL avec une mise à l'échelle sont peu abordés dans la littérature scientifique. Ces travaux permettent pourtant d'aborder la mise en application d'une problématique avec un réalisme important car traitant différentes difficultés de la montée en maturité d'une technologie : une commande en temps réel, le problème de la conversion analogique/numérique et le problème de l'imperfection des modèles mis en œuvre. A fortiori l'objectif est d'étendre et consolider cette méthodologie pour l'appliquer à toute chaîne de conversion électrique forte puissance.

7. REFERENCES

- [1] Cordonnier, J., Gorintin, F., De Cagny, A., Clément, A.H., Babarit, A. « SEAREV: Case study of the development of a wave energy converter », Renewable Energy, 2015, p 40-52
- [2] Clémot, H., Babarit, A., Dupriez-Robin, F., Tran, T.Q.. « Development of a wave-to-wire model to calculate flicker caused by wave energy converters and study power quality », 2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017; Manchester; United Kingdom; 18 June 2017 through 22 June 2017
- [3] A. Varais, « Modèles à échelle réduite en similitude pour l'ingénierie système et l'expérimentation simulée "temps compacté" : application à un microréseau incluant un stockage électrochimique. », Thèse de Doctorat, Toulouse, INPT, 2019.
- [4] H. Clémot, « Étude de l'intégration des systèmes houlomoteurs au réseau électrique. », Thèse de Doctorat, Nantes, ECN, 2017.
- [5] IEC. Iec 61400-21 part 21 : « Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines. »
- [6] Anne Blavette. « Grid integration of wave energy & generic modelling of ocean devices for power system studies. » PhD thesis, University College Cork, 2013.