

Optimisation des performances d'un dispositif de captation d'énergie éolienne. Approche systémique : aérodynamique d'éoliennes à axe vertical, conversion électromécanique, électronique de puissance et stockage H₂

Contexte général du projet

Les grands challenges technologiques de la lutte contre le réchauffement climatique sont de concevoir des solutions de production d'électricité et de stockage saisonnier de l'énergie durables, sûres, efficaces et économiques. Bien que de nombreuses technologies aient été testées, certaines éprouvées, la production d'électricité à partir de petites éoliennes à axe vertical et le stockage d'énergie sous forme de « Liquid Organic Hydrogen Carrier » (LOHC) ont été occultés, l'un par le développement des éoliennes à pales horizontales de forte puissance et l'autre par le stockage d'hydrogène haute pression.

Le projet EOLOHC a pour but d'évaluer numériquement les performances énergétiques et économiques de ces deux technologies et leur couplage temporel (figure 1). Après l'optimisation expérimentale de l'aérodynamique d'une petite éolienne à axe vertical et l'optimisation numérique de la conversion électromécanique en utilisant des données simulées et par apprentissage, des modèles de systèmes dynamiques seront développés pour être couplés à celui du procédé LOHC. Ce dernier intégrera la boucle : de l'énergie produite par intermittence ou disponible sur le réseau électrique vers l'énergie fournie à la demande par le stockage dans les LOHC ou le stockage de chaleur. Le modèle inclura la production d'hydrogène par électrolyse, l'hydrogénation et la déshydrogénation catalytique des LOHC et la conversion de l'hydrogène en électricité par un ICE-H₂ ou une turbine H₂. Les modèles des éléments de production et de conversion d'hydrogène seront issus de la littérature. Les modèles système dynamiques des réacteurs catalytiques seront des modèles de substitution ou réduits basés sur des modèles physiques numériques développés au cours du projet. Les performances du système global seront évaluées à l'aide d'analyses exergétique et économique pour différents scénarii de vents en entrée, de disponibilité de l'électricité réseau et du coût instantané de l'électricité.

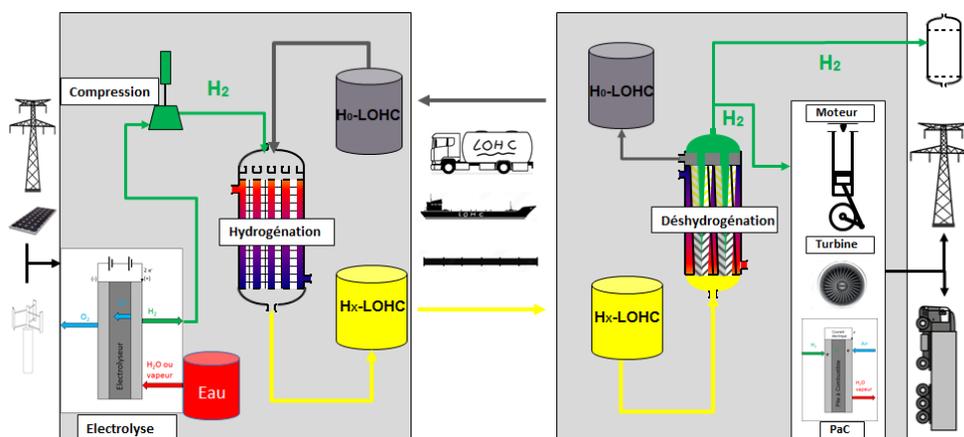


Figure 1: Procédé global de stockage d'hydrogène dans les LOHC.

Objectifs de la thèse

La production éolienne actuelle repose principalement sur le développement de sites de production concentrée (champs éoliens) intégrant des machines de fortes puissance (et donc de grandes dimensions). Ces installations suscitent une forte résistance des populations environnantes qui mettent très souvent en avant le bruit comme gêne potentielle. Ce problème d'acceptabilité tend à ralentir, voire empêcher l'aboutissement de certains projets.

Dans le cadre du projet EOLOHC, financé par l'institut Carnot Ingénierie@Lyon, les laboratoires LMFA et Ampère collaborent sur la modélisation et l'optimisation de petites éoliennes à axe vertical comme source décentralisée de production d'énergie électrique. La thèse vise à définir une méthode d'optimisation globale de l'ensemble éolienne à axe verticale, incluant la génératrice électrique, le convertisseur d'électronique de puissance et le contrôle commande associé, pour un scénario de vent choisi.

Dans le contexte d'une production locale avec des machines de plus faible puissance (et donc de petites dimensions), les éoliennes à axe vertical (ou VAWT pour Vertical Axis Wind Turbine) sont une alternative intéressante aux éoliennes classiques à axe horizontal. Bien que leurs performances soient à priori moins bonnes que celles des éoliennes à axe horizontal, elles présentent néanmoins des avantages quant à leur intégration à petite échelle en environnement urbain. Notamment, ces éoliennes ne nécessitent pas d'être orientées face au vent, conservent de bonnes performances en présence d'écoulement turbulents et peuvent continuer de produire par vent fort.

Bien que les travaux de recherche et développement soient peu nombreux sur les éoliennes à axe vertical, celles-ci connaissent un regain d'intérêt dans la littérature scientifique depuis une quinzaine d'années avec notamment deux types d'application envisagées : l'installation d'éoliennes offshore sur des plateformes flottantes [[De Tavernier2021](#)] et l'installation d'éoliennes de petite taille en environnement urbain [[Mertens2006](#)]. Des travaux récents se sont intéressés à l'effet de certains paramètres géométriques (nombre de pales, cambrure des pales, ...) [[Battisti2016](#), [Miller2021](#)] et des conditions de fonctionnement [[Venkatraman2023](#)] sur les performances aérodynamiques. Les problématiques de développement du sillage [[Ouro2021](#)], qui peut avoir des conséquences sur le placement relatif de plusieurs éoliennes, et d'émission acoustiques [[Weber2015](#), [Venkatraman2022](#)] sont aussi des thèmes de recherche actifs.

Le projet s'intéresse à la modélisation et l'optimisation de la production électrique d'une petite éolienne à axe vertical. Le sujet de ces travaux de thèse étant multidisciplinaire, un travail important de bibliographie devra être réalisé sur les aspects de performances aérodynamiques des éoliennes à axe vertical, de conversion d'énergie, de contrôle commande, ainsi que sur les méthodes d'apprentissage pour la modélisation de systèmes physiques.

Un modèle dynamique des performances aérodynamiques d'une petite éolienne verticale soumis à un scénario de vent (annuel) sera alors développé. A partir de l'étude bibliographique, un ensemble de paramètres d'intérêt d'une éolienne à axe vertical sera défini. L'espace des paramètres choisi sera alors étudié expérimentalement en fabricant un ensemble d'éoliennes à échelle réduite (figure 2, droite), qui seront testées dans la soufflerie anéchoïque du LMFA (figure 2, gauche) sur une gamme de vitesse de vent permettant la remise à l'échelle grâce à des lois de similitude. La puissance mécanique récupérée sur l'arbre de l'éolienne, ainsi que d'autres indicateurs tels que le bruit généré par l'éolienne seront mesurés. Cette base de données expérimentale viendra par la suite alimenter une méthode d'apprentissage supervisée ou non (à définir à partir de l'étude bibliographique) permettant une optimisation de l'éolienne automatique de l'éolienne et de sa chaîne de conversion mécano-électrique (voir paragraphe suivant) pour un scénario de vent choisi.

Parallèlement, un modèle dynamique de la conversion électromécanique sera développé afin de permettre une optimisation du choix (voire du design) de la génératrice associée à son convertisseur d'électronique de puissance et son contrôle commande à partir de scénarios de puissance mécanique délivrable par l'éolienne. Cette modélisation reposera elle aussi sur l'utilisation de méthodes d'apprentissage, mais alimentée ici par une base de données numérique. Cette base de données sera construite à partir de l'utilisation de modèles, dans un premier temps, extensifs de type circuits électriques associés à des algorithmes de contrôle commande. Suivant les temps de calcul obtenus, des techniques de compression de modèles seront utilisées afin de pouvoir générer assez de données en un temps acceptable pour un apprentissage au sein de l'espace des solutions engendrées. On veillera à ce que les techniques de compression aient les paramètres d'entrée requis pour générer les variations attendues pour l'apprentissage (paramètres de la machine électrique et du convertisseur de puissance, loi de commande associée ...).

Ces deux modèles seront alors mis en œuvre dans un modèle dynamique global, permettant une optimisation d'ensemble de l'éolienne soumise à un scénario de vent choisi. L'enjeu est d'être en mesure d'avoir une méthodologie et un outil d'optimisation au niveau système qui soit assez versatile pour envisager à terme des optimisations plus complexes (multi-éoliennes avec optimisation de l'exploitation du site visé (nombre, répartition ...), scénarios d'association de l'énergie électrique produite par le parc d'éoliennes (type de convertisseurs, type de réseau DC ou AC, niveau de tension, etc.).

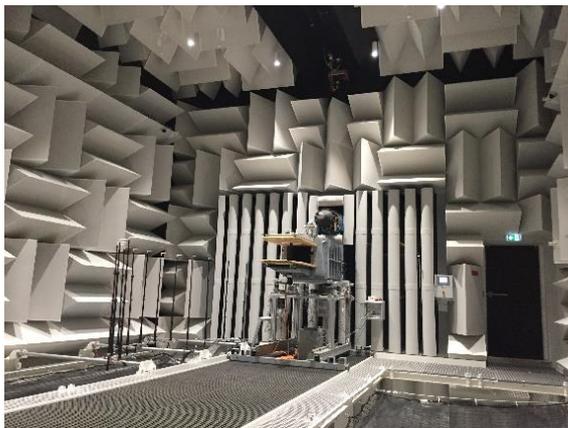


Figure 2 : Soufflerie anéchoïque du LMFA (gauche) et maquette à échelle d'une éolienne à axe vertical (droite).

Originalité

Les activités de recherche prévues sur les petites éoliennes, bien que ces éoliennes connaissent un regain d'intérêt récent dans la communauté scientifique, les travaux récents d'étude des performances de ces dispositifs s'inscrivent rarement dans des programmes de recherche de grande envergure, notamment en ce qui concerne les travaux expérimentaux. On peut citer le projet européen H2020 [ZEPHIR](#) dont une partie du programme est dédié à l'étude de petites éoliennes en milieu urbain. Il est à noter que l'un des partenaires de ce projet impliqué dans des activités de simulation numérique de petite éolienne à axe vertical (Université de Sherbrooke) est membre de l'IRP Jacques Cartier, dont le LMFA fait partie, et dans lequel les petites éoliennes à axe vertical ont été identifiées comme sujet privilégié de travail. Les travaux proposés dans le cadre de ce projet stratégique pourront alors apporter une base de collaboration, notamment grâce à la base de données expérimentale qui serait générée.

L'originalité des travaux proposés ici repose d'une part sur la proposition de réaliser une campagne



d'essais visant à explorer plusieurs paramètres de l'éolienne afin de déterminer l'évolution des performances aérodynamiques, mais aussi le bruit généré par l'éolienne. D'autre part, l'objectif de développer un modèle global dynamique incluant à la fois les aspects aérodynamiques, les aspects de conversion électromécanique d'électronique de puissance et de contrôle associé se démarque aussi des travaux existants, principalement focalisés sur des aspects aérodynamiques sans intégrer d'aspects systèmes et de production dynamique d'énergie à partir d'un scénario de vent.

Verrous scientifiques

Les verrous scientifiques identifiés concernent :

- L'approche d'optimisation pour la partie mécanique des fluides (génération de la base d'apprentissage, interpolation dans cette base ...) dont devra découler le développement d'un modèle paramétrique d'éolienne à axe vertical
- La modélisation paramétrique de l'association convertisseur électromécanique, convertisseur de puissance et contrôle commande associé
- Le couplage de ces deux approches de modélisation pour une optimisation au niveau système incluant la possibilité de prise en compte au sein d'une même optimisation les aspects mécanique des fluides, électrotechnique, électronique de puissance et contrôle commande.

Profil du candidat

Candidat de niveau Master ou équivalent issu d'une formation généraliste ou axée sur la production d'énergie avec un caractère multidisciplinaire incluant des aspects de mécanique des fluides (aérodynamisme) et de conversion d'énergie électrique (conversion électromécanique, électronique de puissance et contrôle commande).

Le candidat a un intérêt pour la modélisation, la conception, ainsi que le travail expérimental.

Contact :

Vincent Clair, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA), vincent.clair@ec-lyon.fr

Christian Vollaire, Laboratoire Ampère, christian.vollaire@ec-lyon.fr