



**HAL**  
open science

## Vers un guide de bonnes pratiques pour l'optimisation d'éolienne à axe horizontal

Thomas Amoretti, Florian Huet, Pierre Garambois, Lionel Roucoules

### ► To cite this version:

Thomas Amoretti, Florian Huet, Pierre Garambois, Lionel Roucoules. Vers un guide de bonnes pratiques pour l'optimisation d'éolienne à axe horizontal. S-MART 2023 : 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04397929

**HAL Id: hal-04397929**

**<https://hal.science/hal-04397929>**

Submitted on 16 Jan 2024

**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.

## Vers un guide de bonnes pratiques pour l'optimisation d'éolienne à axe horizontal

T. Amoretti <sup>a,\*</sup>, F. Huet <sup>a</sup>, P. Garambois <sup>a</sup>, L. Roucoules <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers, LISPEN, HESAM Université  
2, cours des Arts et Métiers, 13617 Aix-en-Provence, France

\* e-mail : thomas.amoretti@ensam.eu

### 1. INTRODUCTION

Depuis les années 1970, la part de l'énergie renouvelable non hydraulique dans la production mondiale d'électricité ne cesse d'augmenter. En effet cette dernière passe de 36 TWh soit 0,6 % de la production d'électricité en 1973 à 2 909 TWh soit 10,8% en 2019 [1]. Dans cette production, l'énergie d'origine éolienne a une part prépondérante. Elle s'élevait à 1421 TWh en 2019 soit 49% de l'électricité renouvelable [2]. Le recours à l'énergie éolienne s'explique par ses bonnes performances en terme de facteur d'émission (de l'ordre de 14,1 gCO<sub>2</sub>eq/kWh) comparativement aux autres sources de production d'électricité [3]. Cependant, cette technologie est soumise à la variabilité de sa source d'énergie primaire (le vent) ainsi qu'à des problèmes d'efficacité de conversion (facteurs de charges assez faibles) et des limitations d'exploitation (surface occupée). La question de l'efficacité de conversion de l'énergie éolienne se prête particulièrement bien à l'exercice d'optimisation et de nombreuses publications voient le jour sur le sujet dans le but d'étudier et d'optimiser les systèmes de récupération d'énergie éolienne. La Figure 1 souligne le nombre croissant d'articles se rapportant à la thématique de l'optimisation éolienne depuis les années 1970 (Données issues de la base de données de Scopus) et montre une accélération soutenue au début des années 2000 dans le domaine.

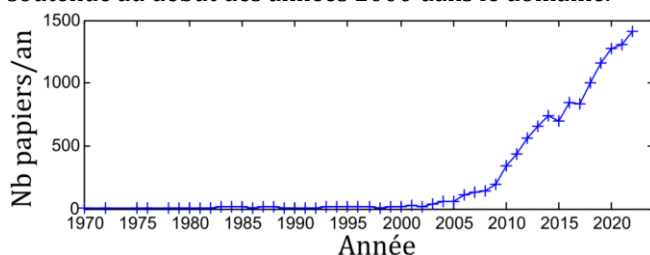


Figure 1 : Évolution du nombre de citations par an sur le sujet : « wind turbine optimization »

La multiplication des études sur le sujet entraîne un grand nombre de cas d'application et de méthodologies souvent hétérogènes. La comparaison des résultats entre les papiers est difficile étant donné la différence des méthodes employées.

L'objet de cette communication est de proposer un cadre permettant d'établir une comparaison entre les différentes approches d'optimisation de l'éolienne à axe horizontal (nous ne traiterons pas de parcs éoliens). Par benchmark on entend ici la proposition d'indicateurs communs servant de référence de comparaison aux résultats d'optimisation de différents articles. Ces derniers peuvent traiter tout ou partie des critères d'évaluation définis, l'objectif étant ici de comparer les méthodes de ces travaux. Le benchmark proposé ici ne concerne pas les algorithmes d'optimisation ou les modèles d'éoliennes mais est bien centré sur la méthode globale d'étude et d'optimisation de l'éolienne, le but n'étant pas de comparer les résultats d'optimisation obtenus mais les méthodes d'obtention desdits résultats.

Le processus d'optimisation d'une éolienne peut être représenté par la Figure 2 :

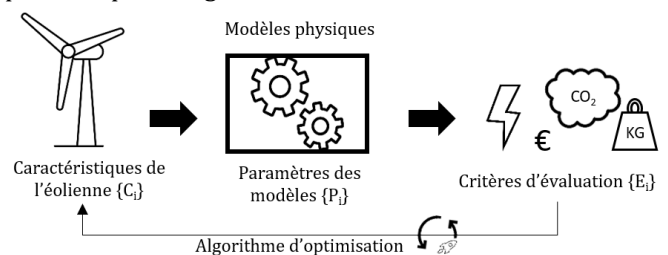


Figure 2 : Représentation schématique du processus d'optimisation

Le principe de base de l'optimisation est de vouloir trouver le meilleur objet (éolienne) possible pour des performances données. La valeur d'un objet est évaluée selon un ou plusieurs critères d'évaluation (ou objectif

d'optimisation). La relation entre ces critères et les caractéristiques intrinsèques de l'objet est donnée via un modèle représentatif de l'objet. Le modèle physique est lui-même régi par un ensemble de paramètres qui lui sont propres. Les inconnues du problème sont ici les caractéristiques de l'éolienne laissées variables. Les benchmarks sur les éléments constitutifs (modèles, algorithmes...) des études sortent du cadre de cette publication. Pour des études sur les différents modèles aérodynamiques voir D. Simms *et al.* [4] qui compare différents modèles avec une expérimentation de référence réalisée par la NREL ou B. Plaza *et al.* [5] pour un projet européen similaire. Pour un benchmark des performances des algorithmes d'optimisation en tant que tel voir les travaux de T. Bartz-Beielstein *et al.* [6].

Dans un premier temps nous développerons la notion de benchmark utilisée ici. Dans un second, temps nous essayerons d'identifier des catégories communes aux mises en œuvre d'optimisation d'éolienne et analyserons les principaux objectifs d'optimisation employés à ce jour. Un cadre de comparaison sera alors proposé avec plusieurs cas d'étude de l'optimisation éolienne. On ouvrira enfin une discussion autour des pratiques de recherche concernant l'optimisation éolienne.

## 2. CARACTERISTIQUES DU BENCHMARK POUR L'OPTIMISATION D'EOLIENNE

### 2.1. Notion de benchmarking en recherche

La notion de benchmark s'est développée en 1989 avec la publication d'un livre par R. Camp : « Benchmarking: The Search for Industry Best Practices that lead to Superior Performance » définissant une méthodologie dans l'amélioration par la comparaison [7]. Une proposition de définition du benchmarking est proposée par J. Moriarty et C. Smallman : « Le benchmarking est un processus téléologique conduit par des exemples, processus opérant dans une organisation avec pour objectif de changer intentionnellement d'une situation donnée vers une meilleure situation » (traduit de l'anglais) [8]. Cette définition rapproche les termes de benchmarking et d'amélioration continue, l'amélioration étant ici consécutive à l'observation d'exemples de bonnes pratiques. Cette méthodologie a, dans un premier temps, été cantonnée au secteur de la gestion et de l'entreprise avant d'essaimer dans le domaine universitaire et plus particulièrement au sein de la recherche scientifique.

Certains domaines scientifiques ont une longue habitude de la pratique du benchmark. Par exemple pour le domaine de l'informatique et plus particulièrement de l'apprentissage machine, les algorithmes de classification non supervisés se réfèrent très régulièrement à la base de donnée Iris de Fischer datant de 1936 [9]. Cette base commune permet de comparer la capacité de classification des algorithmes proposés pour les différentes espèces de fleurs.

Dans le domaine de la recherche en sciences de l'ingénieur plusieurs auteurs se réapproprient la notion de benchmark pour l'appliquer dans leur propre domaine d'étude. Par exemple, R. Piquié en conception [10] ainsi que O. Sigmund en optimisation topologique [11] proposent des outils et bonnes pratiques afin de fournir un cadre de comparaison aux nombreux articles de leurs domaines respectifs. Ce recours au benchmarking provient dans ces deux cas du double constat d'un nombre croissant de travaux proposés ainsi qu'une absence de cadre clair dans le domaine, ce qui conduit à une grande difficulté dans l'évaluation de l'apport des articles. C'est cette acception du benchmark comme proposition de cadre de comparaison qui sera suivie dans le présent article. La question soulevée ici est la suivante : Quel cadre et bonnes pratiques scientifiques pour la comparaison des méthodes d'optimisation d'éolienne à axe horizontal ? C'est ce que nous allons développer par la suite.

### 2.2. Catégories de données de l'optimisation éolienne

Au sein du processus d'optimisation, l'objet d'étude se compose de différentes caractéristiques comme par exemple la taille des pales, les profils aérodynamiques implantés le long de la pale, les matériaux de pale ou encore le type de génératrice utilisée. Les caractéristiques ne sont pas forcément des données purement matérielles ou statiques, elles peuvent aussi comprendre la stratégie de contrôle de l'éolienne (angle d'incidence des pales et/ou charge électrique variables en fonction du vent) ou encore le profil de vent auquel est soumise l'éolienne. Ces caractéristiques peuvent être de différentes natures. Les premières sont les « inconnues » du problème, ce seront les caractéristiques qui vont pouvoir varier afin de donner les résultats optimaux. Ce sont ces caractéristiques que nous cherchons à déterminer. Par exemple on veut trouver la taille de pale idéale de l'éolienne. Il existe également des caractéristiques « connues » du problème. Ces dernières servent à définir le cadre d'étude. Par exemple l'éolienne évolue dans un profil de vent donné et une stratégie de pilotage est sélectionnée en vue d'obtenir le maximum d'énergie sur un temps donné (ici objectif d'optimisation). Une caractéristique peut changer de catégorie. Il est ainsi possible de chercher à déterminer la meilleure stratégie de pilotage pour une éolienne de taille de pale fixe et avec le même profil de vent. On voit que les caractéristiques taille de pale et stratégie de pilotage ont changé de rôle entre les deux optimisations.

Les critères d'évaluation de la performance de l'éolienne ainsi définie peuvent être de différentes natures. Cette diversité de critères d'évaluation est détaillée dans la section suivante. Les valeurs de ces critères d'évaluation sont déterminées à partir des résultats de simulation issus des modèles physiques représentant le comportement d'une éolienne donnée. Par exemple il faut un modèle mathématique qui peut être analytique ou encore issu de calculs CFD pour déterminer

l'énergie produite par une éolienne de rayon donné avec tel profil de vent et telle stratégie de pilotage.

L'algorithme d'optimisation sert quant à lui uniquement à ajuster de manière intelligente les caractéristiques « inconnues » d'une éolienne. On peut par exemple chercher à étudier l'ensemble de combinaisons possibles de caractéristiques « inconnues » afin de déterminer celle maximisant le critère choisi ou on peut utiliser des méthodes de descente de gradient pour arriver plus rapidement à un résultat. Les intervalles dans lesquels ces inconnues peuvent être cherchées (ou espace de recherche) sont déterminés par des contraintes propres au problème. Par exemple on peut vouloir restreindre la taille de pale étant comprise entre 2 et 10 mètres ou vouloir que la contrainte mécanique maximale sur la pale soit inférieure à la limite élastique du matériaux (contrainte calculée à posteriori via un modèle, se ramenant *de facto* à limiter la taille de la pale).

### 2.3. Critères d'évaluation couramment employés

A. Chehouri *et al.* [12] répertorie des études d'optimisation d'éoliennes. Ces travaux font ressortir les principaux axes d'optimisation traités avec en figure de proue le coût de l'énergie (Cost of Energy, CoE), la production énergétique du système (Annual Energy Production, AEP) mais également la masse du système et notamment de la partie comportant les pales. Les critères mentionnés sont parfois la combinaison de plusieurs indicateurs (énergie produite et coût pour le CoE). Nous scinderons les caractéristiques des performances éoliennes comme ceci :

- Evaluation de la production énergétique
- Evaluation du coût
- Evaluation de la résistance structurelle

Chacun de ces domaines peut lui-même être subdivisé en un certain nombre de points. L'évaluation de la production énergétique peut à la fois se faire du point de vue de la puissance extractible (coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne) que de celui de l'énergie produite selon un laps de temps en prenant en compte le profil de vent sur ce temps donné. Du point de vue du  $C_p$  même il est possible d'extraire différents critères de performance comme le  $C_p$  maximal d'une éolienne ou encore la forme de la répartition du  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique de l'éolienne (rapport entre la vitesse tangentielle en bout de pale et la vitesse du vent incident, noté  $\lambda$ ).

Les coûts peuvent être de différentes natures. On pense bien sûr principalement au coût financier, mais il peut aussi s'agir de coût au sens de flux physiques tels que la quantité d'un matériau utilisé, le coût énergétique de fabrication ou encore l'empreinte carbone (équivalent CO<sub>2</sub>) rejetée. Ces deux derniers peuvent faire partie d'un ensemble plus large prenant en compte les différents impacts environnementaux liés à l'éolienne. L'échelle temporelle sur laquelle se base un critère est également à prendre en compte. Par exemple l'étude de l'ensemble du cycle de vie de l'objet éolien peut modifier la valeur des coûts calculés et introduire de nouveaux critères. Une

analyse de cycle de vie de l'éolien menée par l'ADEME en 2015 répertorie les différents impacts environnementaux de la filière éolienne française avec par exemple le calcul de l'utilisation de la ressource en eau ou bien l'utilisation des sols [13].

Dans son étude, A. Chehouri avance principalement le poids de la pale comme critère d'optimisation structurelle. Mais d'autres critères peuvent être pris en compte comme la résistance en fatigue [14] ou encore la charge aérodynamique appliquée sur la pale [15].

Un autre point qui peut être ici abordé est celui concernant l'impact de l'éolienne sur son milieu direct comme l'écoulement de vent autour de l'éolienne ce qui peut influencer la disposition des éoliennes au sein d'un parc ou au sein d'un territoire [16].

Enfin des problématiques d'intégration au réseau électrique peuvent également faire partie des critères d'évaluation étudiés [17].

## 3. BENCHMARK PROPOSE ET DISCUSSION

Dans la partie précédente nous avons vu que pour effectuer une étude d'optimisation éolienne, l'auteur doit indiquer les éléments suivants :

- Les critères d'évaluation à optimiser
- Les caractéristiques inconnues du problème
- Les caractéristiques connues
- La description des modèles ayant permis d'obtenir les valeurs associées aux critères d'évaluation
- Les contraintes limitant les plages de recherche des caractéristiques inconnues

### 3.1. Comparaison de différents travaux portant sur l'optimisation d'éolienne

Nous allons proposer plusieurs études de référence se positionnant sur différents critères d'évaluation afin d'avoir différents exemples de méthodologie d'optimisation. Ces critères seront consignés dans le Tableau 1. Le Tableau 2 présente les caractéristiques inconnues et connues permettant de définir entièrement l'objet étudié. Le Tableau 3 quant à lui présente les contraintes associées à l'espace de recherche des caractéristiques inconnues. Enfin le Tableau 4 présente les principaux modèles utilisés ainsi que des particularités méthodologiques de chaque article.

Le premier article est celui publié par A. Ning *et al.* [18]. Cette publication présente différentes études d'optimisation indépendantes. Les différents objectifs d'optimisation choisis sont listés dans le Tableau 1. Nous allons ensuite nous concentrer sur le 1<sup>er</sup> cas d'optimisation du COE présenté dans l'étude en question pour le remplissage des autres tableaux.

La seconde étude est celle de L. Wang *et al.* [19]. Les objectifs sont cette fois-ci traités en même temps dans une étude multi objectifs. La troisième étude est celle de Kusiak *et al.* [20]. Dans cet article les auteurs cherchent à optimiser la puissance de sortie ainsi que minimiser les vibrations subies par la structure via la stratégie de contrôle de l'éolienne. Enfin dans la dernière étude de Benini et Toffolo [21], les auteurs cherchent à optimiser à

la fois le coût de l'énergie mais également la densité énergétique d'une éolienne (ramenée à la surface du rotor).

Tableau 1 : Critères de performance investigués

	PE- Puissance de sortie (W)	PE- Coefficient de puissance Cp	PE -AEP (kWh)	C - CoE (\$/kWh)	RS - Masse rotor	RS - Masse totale	RS - Vibration de l'arbre de transmission	RS - Vibration de la tour	H - Masse totale /AEP	IL - Densité énergétique
Ning et al. [18]		X/H	X	X	H				H	
Wang et al. [19]	0					0				
Kusiak et al. [20]	0						0	0		
Benini [21]				0						0

PE : Production énergétique  
C : Coût  
RS : Résistance structurelle  
IL : Impact sur le milieu local

X : optimisation mono-objectif  
O : optimisation multi-objectifs  
H : Hybride : Optimisations mono-objectif menées successivement ou multi-objectif pondéré

Tableau 2 : Caractéristiques des éoliennes étudiées

	CI- Cordes le long de la pale (m)	CI- Angles le long de la pale (rad)	CI- Epaisseur de l'enveloppe (tête de longeron) (m)	CI- Epaisseur du profil (m)	CI- Vitesse spécifique ( $\lambda$ )	CI- Angle de calage en fonction du temps (rad)	CI- Couple sur l'arbre mécanique en fonction du temps (N.m)	CI- Vitesse linéaire en bout de pale (m/s)	CI- Ratio rayon pale/rayon moyen	CF- Stratégie de contrôle	CF- Diamètre (m)	CF- Profils le long de la pale	CF- Matériaux	CF- Puissance nominale génératrice	CF- Distribution de vents	CF- Données aérodynamique (fluide)	CF- Données aérodynamique (profils)	CF- Nombre de pales	CF- Distribution épaisseur enveloppe	CF- Angle conicité (rad)	CF- Angle lacet (rad)	CF- Vents de démarrage et arrêt (m/s)
Ning et al. [18]	X	X	X		X					X	X	X	X	X	X	X	X					
Wang et al. [19]	X	X		X						X	X	X	X	X	X	X	X					X
Kusiak et al. [20]						X	X								X							
Benini [21]	X	X						X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X

CI : Caractéristique inconnue  
CF : Caractéristique fixée (connue)

Tableau 3 : Contraintes appliquées

	S- Déformation maximale	S- Flambement enveloppe en tête de longeron	S- Déflexion du bout de pale à la vitesse nominale (m)	S- Fréquence naturelle pale (Hz)	S- Fatigue du pied de pale (Pa)	S- Effort maximal (N)	S- Contrainte maximale (Pa)	S- Epaisseur d'enveloppe (m)	P- épaisseur (m)	P- Angles (rad)	P- Cordes (m)	P- Couple (N.m)	P- Ratio de rayons (pale/moyeu)	SO- Vitesse max bout de pale (m/s)	A- Vitesse rotation max (tr/min)	A- Taux max variation angle entre deux pas temps	A- Taux max variation angle entre deux pas temps	A- Coefficient induction axiale
Ning et al. [18]	X	X	X	X	X									X				
Wang et al. [19]						X	X		X	X	X				X			
Kusiak et al. [20]										X		X				X	X	
Benini [21]								X					X	X				X

S : Structurale  
P : Plage de valeur fixée  
SO : Sonore  
A : Autres

Tableau 4 : Méthodologie des études et modèles

	CPE- Performances aérodynamiques	CPE- Performances mécaniques	CPE- Autres pertes	AS- Calcul contraintes et déformations	AS- Inerties et rigidités	AS- Modèle vibration (arbre + tour)	CC- Financier	M- Calcul éolienne étalon	M- Description paramétrage algorithme d'optimisation	AO - Algorithme d'optimisation utilisé
Ning et al. [18]	X	X	X	X	X		X	X	Descente de gradient (Matlab)	CPE : Calcul production énergétique AS : Analyse structurelle CC : Calcul du coût H : Hybride M : Méthodologie AO : Algorithme d'optimisation
Wang et al. [19]	X			X					NSGA-II modifié	NSGA-II : Non-sorted Genetic Algorithm 2
Kusiak et al. [20]	X					X		X	SPEA	SPEA : Strength Pareto Evolutionary Algorithm
Benini [21]	X						X	X	MOEA	MOEA : Multi Objective Evolutionary Algorithm (développé par les auteurs)

### 3.2. Discussion

On peut voir à travers ces tableaux des similitudes mais également des différences dans la manière avec laquelle les études d'optimisation éolienne sont menées. Le tableau 1 nous montre qu'il existe différents critères sur lesquels se basent les auteurs pour juger de l'amélioration de leur éolienne. Ces critères sont de différentes natures mais un même critère peut être utilisé de différentes manières (optimisation mono-objectif/multi-objectif/hybride). Le second tableau nous montre que les caractéristiques inconnues de l'éolienne sont plutôt propres à chaque auteur, en fonction de l'objectif d'optimisation qu'il s'est fixé. Néanmoins les caractéristiques connues sont globalement communes à tous les auteurs : tous ont besoin de définir certains aspects de l'éolienne, même fixes, afin de pouvoir utiliser les modèles physiques de calcul de performance. On remarque qu'aucun auteur ne mentionne les caractéristiques aérodynamiques propres au fluide utilisé (masse volumique, viscosité) ce qui a pourtant un impact sur les résultats obtenus. Le tableau 3 nous montre que les contraintes appliquées à la recherche d'optimum sont assez différentes en fonction des auteurs. Enfin la table 4 nous montre que des éléments communs sont utilisés (choix de l'algorithme, choix du modèle physique, description du paramétrage de l'algorithme) mais que les algorithmes spécifiques utilisés sont très différents aussi bien pour le modèle que pour l'optimisation.

La nature des modèles utilisés peut être variable depuis le modèle créé par l'auteur jusqu'à l'utilisation d'un modèle open source. Il est parfois compliqué pour certaines études d'entrer dans le détail de la paramétrisation des modèles utilisés. Parfois les plages de contraintes des caractéristiques à optimiser sont fournies sans discussion particulière à ce sujet. De plus, la finesse des modèles requière une définition plus ou moins précise du cadre d'étude. Il y a donc également une grande diversité dans les méthodologies utilisées pour obtenir les courbes aérodynamiques de chaque profil de pale dans le cas de profils non standards ou la définition

précise de la composition des matériaux composite constituant la pale.

Une seule des études concernées définit une éolienne de référence [18]. C'est à dire la définition de caractéristiques complètes ainsi que du calcul de performances via les modèles développés dans l'article. Dans le cas de A. Ning, l'éolienne de référence est issue d'une étude de performance expérimentale [22]. Ceci permet dans un premier temps de valider les modèles utilisés en comparant l'éolienne calculée à celle de la littérature. Dans un deuxième temps ceci permet de comparer les éoliennes issues du processus d'optimisation avec l'éolienne de référence, permettant de juger de la réelle optimisation du système. Il pourrait également être judicieux de prendre comme référence une éolienne dont les caractéristiques ont été préalablement optimisées dans un précédent article afin de comparer les résultats d'optimisation obtenus avec ceux d'une méthode d'optimisation similaire et ainsi juger de l'apport de la nouvelle méthode.

Il serait intéressant pour l'ensemble de la communauté scientifique d'avoir accès aux codes utilisés pour les optimisations proposées. Ceci permettrait de comprendre en détail le paramétrage du problème et permettrait d'implémenter plus facilement des modifications dans le processus d'optimisation en prenant par exemple en compte un nouveau phénomène dans les modèles physiques sans avoir nécessairement à reconstruire l'ensemble du modèle pour chaque ajout/modification.

Les algorithmes ici utilisés font appel à des processus itératifs. Néanmoins il n'est fait état dans aucun papier d'étude de convergence justifiant que la paramétrisation de l'algorithme d'optimisation est convenable pour le problème en question.

Certains auteurs excluent toutes considérations des aspects mécaniques et électriques de l'éolienne, ces derniers pouvant néanmoins avoir des impacts notamment sur les contraintes de vitesse ou couple maximum admissibles par le système. La question des limites appliquées au système devrait être normalisée puisqu'en fonction des contraintes choisies par l'auteur les résultats de l'études deviennent complètement différents ce qui nuit à la comparaison entre études.

### 3.3. Synthèse

Le travail présenté reprend les différents attributs nécessaires à l'optimisation d'éolienne. L'étape succédant naturellement à ce travail serait de partir d'une optimisation de référence puis mener différentes optimisations en modifiant l'un des attributs (objectifs, modèles ou algorithmes d'optimisation) afin de comparer les caractéristiques trouvées. Pour réaliser ce benchmark à proprement parler, les auteurs ont synthétisés les caractéristiques propres à l'étude de Ning [18] disponibles à l'adresse suivante : [https://github.com/p36cl/base\\_benchmark\\_optimisation\\_eolienne](https://github.com/p36cl/base_benchmark_optimisation_eolienne)

## 4. CONCLUSION

Cet article s'attache à définir un benchmark pour l'optimisation éolienne. Ce dernier présente ici les caractéristiques communes des articles concernant l'optimisation d'éolienne. Ces caractéristiques communes sont la définition des critères d'optimisation, la définition des variables du problème d'optimisation ainsi que des contraintes associées. Cela comprend également la définition de l'ensemble des éléments fixés du problème, ceci permettant la reproductibilité de la démarche. Enfin le dernier point commun de ces études est la définition des différents modèles utilisés. La notion de benchmark est de plus en plus utilisée dans le domaine de la recherche scientifique afin de s'inspirer/ définir les bonnes pratiques pour contribuer efficacement à un domaine d'étude. Les articles choisis ont pour vocation d'être suffisamment divers en termes d'objectifs et de méthodes étudiés pour être représentatifs des études d'optimisation éolienne en général. Ce qui ressort de ce benchmark des méthodes d'optimisation de l'éolien c'est que bien que les objectifs d'optimisation puissent être très différents selon les auteurs, les mêmes objets ont besoin d'être définis par tous (caractéristiques de l'éolienne testée, modèle physique utilisé, etc...).

Ce qui se dégage de cette étude c'est que chaque auteur a tendance à reconstruire l'ensemble des éléments pour mener à bien son optimisation et que tous les éléments de cette reconstruction ne sont pas nécessairement fournis. Cela conduit à une grande diversité dans les études, une difficulté dans la reproductibilité et ne permet pas de juger opportunément de la validité de l'apport propre à l'auteur (par exemple nouveau modèle physique pour l'optimisation ou nouvelle caractéristique éolienne non prise en compte). Tout comme il existe des études expérimentales de référence pour le domaine de la modélisation éolienne, il pourrait être bon d'identifier une ou des méthodes d'optimisation de référence afin d'avoir un protocole d'optimisation clair ainsi qu'une comparaison de résultat possible avec les nouvelles approches proposées. C'est dans une certaine mesure ce que propose Ning dans son article [18].

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par la région SUD, Provence-Alpes Côte d'Azur (France). Les auteurs tiennent à remercier vivement la région SUD pour son soutien.

## RÉFÉRENCES

- [1] IEA, « Key World Energy Statistics 2021 », IEA, Paris, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>
- [2] « Renewable Electricity – Analysis », IEA. <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity> (consulté le 28 novembre 2022).
- [3] « ADEME - Site Bilans GES ». <https://bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element/categorie/71/siGras/1> (consulté le 28 novembre 2022).
- [4] D. Simms, S. Schreck, M. Hand, et L. Fingersh, « NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: a Comparison of Predictions to Measurements », janv. 2001, doi: 10.2172/783409.
- [5] B. Plaza, R. Bardera, et S. Visiedo, « Comparison of BEM and CFD results for MEXICO rotor aerodynamics », *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, oct. 2015, doi: 10.1016/j.jweia.2015.05.005.
- [6] T. Bartz-Beielstein et al., *Benchmarking in Optimization: Best Practice and Open Issues*. 2020.
- [7] R. Mann, « Expert Point of View Note The History of Benchmarking and Its Role in Inspiration », 2015.
- [8] J. P. Moriarty et C. Smallman, « En route to a theory of benchmarking », *Benchmarking Int. J.*, juill. 2009, doi: 10.1108/14635770910972423.
- [9] R. A. Fisher, « The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems », *Ann. Eugen.*, 1936, doi: 10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x.
- [10] R. Pinquière, J. L. Duigou, L. Grimal, et L. Roucoules, « An open science platform for benchmarking engineering design researches », *Procedia CIRP*, janv. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.280.
- [11] O. Sigmund, « On benchmarking and good scientific practise in topology optimization », *Struct. Multidiscip. Optim.*, oct. 2022, doi: 10.1007/s00158-022-03427-2.
- [12] A. Chehour, R. Younes, A. Ilinca, et J. Perron, « Review of performance optimization techniques applied to wind turbines », *Appl. Energy*, mars 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.043.
- [13] « 151126-cycleco-ademe-acv-de-la-production-d'electricite-d'origine-eolienne-en-france.pdf ». Consulté le: 29 novembre 2022. [En ligne].
- [14] W. Hu, K. K. Choi, et H. Cho, « Reliability-based design optimization of wind turbine blades for fatigue life under dynamic wind load uncertainty », *Struct. Multidiscip. Optim.*, oct. 2016, doi: 10.1007/s00158-016-1462-x.
- [15] J. Jeong, K. Park, S. Jun, K. Song, et D.-H. Lee, « Design optimization of a wind turbine blade to reduce the fluctuating unsteady aerodynamic load in turbulent wind », *J. Mech. Sci. Technol.*, mars 2012, doi: 10.1007/s12206-011-1106-4.
- [16] G. Mosetti, C. Poloni, et B. Diaviacco, « Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm », *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, janv. 1994, doi: 10.1016/0167-6105(94)90080-9.
- [17] B. Rabelo et W. Hofmann, « Power Flow Optimisation and Grid Integration of Wind Turbines with the Doubly-Fed Induction Generator », in *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, juin 2005, doi: 10.1109/PESC.2005.1582050.
- [18] A. Ning, R. Damiani, et P. Moriarty, *Objectives and Constraints for Wind Turbine Optimization*, doi: 10.2514/6.2013-201.
- [19] L. Wang, T. Wang, et Y. Luo, « Improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)-II in multi-objective optimization studies of wind turbine blades », *Appl. Math. Mech.*, juin 2011, doi: 10.1007/s10483-011-1453-x.
- [20] A. Kusiak, Z. Zhang, et M. Li, « Optimization of Wind Turbine Performance With Data-Driven Models », *IEEE Trans. Sustain. Energy*, juill. 2010, doi: 10.1109/TSSTE.2010.2046919.
- [21] E. Benini et A. Toffolo, « Optimal Design of Horizontal-Axis Wind Turbines Using Blade-Element Theory and Evolutionary Computation », *J. Sol. Energy Eng.*, nov. 2002, doi: 10.1115/1.1510868.
- [22] J. JM, S. Butterfield, W. Musial, et G. Scott, « Definition of a 5MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development », *Natl. Renew. Energy Lab. NREL*, janv. 2009, doi: 10.2172/947422.