

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 135 (2009)
Heft: 11: Design renouvelable

Artikel: Développement aérodynamique de petites éoliennes urbaines
Autor: Fiorucci, Stephane
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99761>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Développement aérodynamique de petites **éoliennes urbaines**

Un récent axe de recherche à la Haute Ecole Arc, au sein de la filière ingénierie-design, concerne les applications éco-industrielles de systèmes intégrés d'exploitation d'énergie éolienne à usage domestique : les éoliennes à basse puissance (<1kW) pour une utilisation en environnement urbain. Une application concrète est une petite éolienne individuelle, que l'on achète et installe sur le toit de son logis et dont la gestion s'intègre au fonctionnement de l'habitat, par exemple en couplant son apport énergétique à la consommation électrique d'une pompe à chaleur ou, plus simplement, en réinjectant le courant produit dans le réseau électrique.

Bien que le rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère atteigne une puissance de 10^{17} W, la puissance solaire spécifique moyenne récupérable au sol n'excède pas 200 W par mètre carré de surface, une infime fraction, dont seuls 1,5% sont ensuite convertis en vent. Ce dernier est donc un sous-produit de l'énergie primaire du soleil. Le soleil fournit 99,98% de l'énergie thermique disponible sur notre terre, les 0,02% restant provenant du noyau terrestre.

La terre est donc une gigantesque machine thermique perpétuelle, dont la source chaude est l'hémisphère irradié et la source froide l'hémisphère obscur. Le fluide de travail est l'air, qui transfère la chaleur entre les masses chaudes et froides de densités différentes. Les mouvements globaux de ces masses d'air naissent d'abord par la différence de température entre l'équateur et les pôles, puis sont entretenus par la rotation de la terre autour de son axe. Ces mouvements globaux conjugués, subséquents à l'énergie cinétique contenue dans l'air, génèrent les cyclones et les anticyclones qui se succèdent perpétuellement dans l'atmosphère.

Potentiel d'implantation en milieu urbain

Comme chacun peut le constater, l'intensité des vents en milieu urbain est relativement faible (3m/s de vent moyen annuel en Suisse, toutes régions confondues). Leur anisotropie les rend difficilement exploitables si le système éolien ne

s'adapte pas en permanence aux variations d'intensité et de direction du vent. Ces irrégularités spatiales et temporelles d'intensité des vents en ville sont difficilement captables; la valeur moyenne du vent est utile surtout à titre statistique, mais entre peu en considération lors de l'optimisation de la vitesse de démarrage du rotor éolien. Enfin, une éolienne bien intégrée devrait passer inaperçue, visuellement et acoustiquement.

Au niveau des performances, la part récupérable d'énergie cinétique du vent, convertie en énergie mécanique puis électrique par le système éolien, dépend significativement des dimensions des pâles du rotor. En effet la loi de Betz, valable pour une éolienne à axe horizontal (colinéaire à la direction du vent, par opposition aux systèmes à axe vertical perpendiculaire au vent), montre que la puissance que l'on peut extraire de l'énergie cinétique du vent est fonction du diamètre de l'éolienne élevé au carré et de la vitesse du vent au cube. Enfin, le rendement de la chaîne cinématique de transmission de puissance et celui de la génératrice électrique prennent toute leur importance, car les puissances extraites sont relativement faibles en regard des pertes mécaniques et électriques.

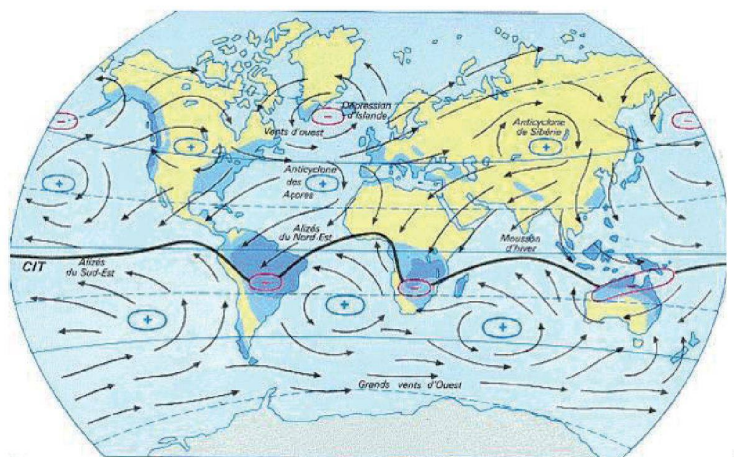
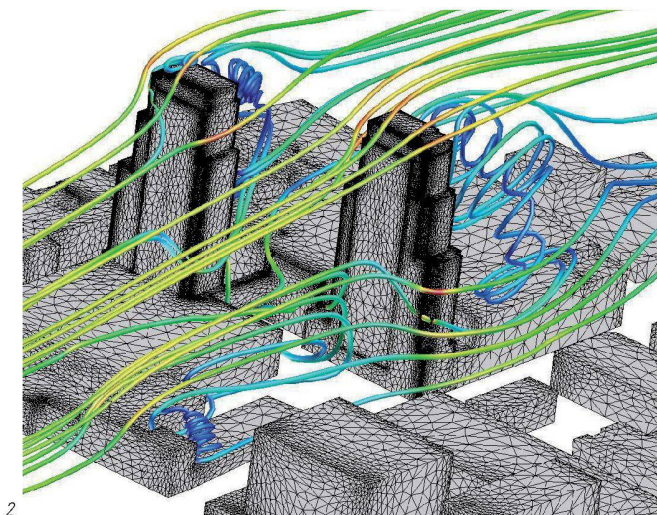


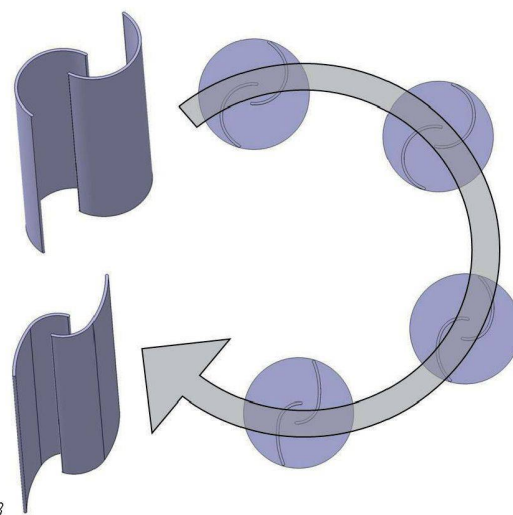
Fig. 1 : Carte mondiale des vents de surface et répartition des zones de basse pression / haute pression (Document Apéro-Energie, St-Imier, 2007)

Fig. 2 : Simulation numérique des lignes de courant sur une ville pour un vent d'ouest, tourbillons à l'aval des immeubles et mise en évidence du maillage surfacique des bâtiments (Document Newmerical Technologies, Canada, 2003)

Fig. 3 : Schématisation du processus d'adaptation de la géométrie des pales d'une éolienne générique, le paramètre-cible étant la minimisation de l'intensité turbulente à l'aval du rotor (Document HE-Arc Le Locle, 2008)



2



3

Délocalisation des sources de captage

Le travail en cours à la HE-Arc consiste à développer des systèmes éoliens au design novateur, efficaces par vents très faibles, tout en répondant aux contraintes légales d'intégration dans le paysage urbain. Ces systèmes éoliens doivent également être cohérents avec le concept de développement durable, autrement dit, répondre au cahier des charges d'une industrialisation à faible consommation d'énergie grise – énergie globale consommée lors du cycle de vie complet du produit, de sa fabrication jusqu'à sa mise au rebut.

L'idée sous-jacente consiste à multiplier les sources éoliennes domestiques en proposant des systèmes à faible coût d'installation et de dimensions réduites, qui permettent soit une réinjection dans le réseau électrique, soit une réduction de la facture d'électricité de l'habitation, avec une durée d'amortissement et un investissement raisonnables.

Un projet de ce type, actuellement en cours avec un industriel Suisse, prévoit la phase d'essai d'un prototype de système éolien dont l'aérodynamique est développée à la HE-Arc. L'objectif est la mise en production d'ici 2011.

Méthodologie de conception aérodynamique

Le point de départ du développement repose sur l'analyse de produits existants, desquels on extrait différentes configurations possibles. Les premières réflexions aérodynamiques sont basées sur la combinaison de systèmes éprouvés.

On commence par définir une matrice de fonctions-objectifs, avec des valeurs chiffrées, qui est appliquée à l'ensemble des systèmes existants sur le marché dans le but de quantifier leurs performances. Puis, on élabore de nouveaux paramètres technologiques corrélant ces performances entre-elles, avec

des facteurs de pondération afin de donner le juste poids aux paramètres que l'on juge les plus significatifs. Enfin, on choisira la combinaison possédant le potentiel le plus élevé; par exemple le système le moins bon – donc possédant la plus grande marge de développement – sur lequel on greffera l'agrégat aérodynamique qui a montré le plus grand saut qualitatif en termes de performances d'un second système retenu par la matrice des fonctions-objectifs.

On considérera toujours, en arrière-plan, les aspects de fabrication, de choix des matériaux, de conception de la transmission de puissance et d'esthétique.

Simulation numérique

Les essais expérimentaux en soufflerie permettent de caractériser les performances aérodynamiques du système en fonction de la vitesse du vent. On s'intéresse notamment au couple fourni à l'arbre, à la traînée de forme générant le sillage turbulent à l'aval du rotor de l'éolienne, à la traînée visqueuse provenant des frottements de l'air sur les pâles du rotor, ou encore aux effets non stationnaires dus à la rotation des pâles.

Le développement du système impliquant de tester et de valider une série de prototypes en soufflerie ou, plus idéalement, directement sur le terrain, il convient d'avoir une idée assez précise de l'aérodynamique attendue. Afin de réduire cette phase expérimentale, extrêmement consommatrice en temps, on déploie la simulation numérique des fluides (CFD), consistant à résoudre numériquement les équations régissant l'écoulement.

La CFD est une branche du calcul par ordinateur qui s'est considérablement « démocratisée » cette dernière décennie,

Fig. 4 : Vue de la maquette numérique du modèle générique d'éolienne, tableau contenant les paramètres externes qui guident la géométrie, vue 3D de l'éolienne et impression par prototypage rapide du modèle (HE-Arc Le Locle, 2008)

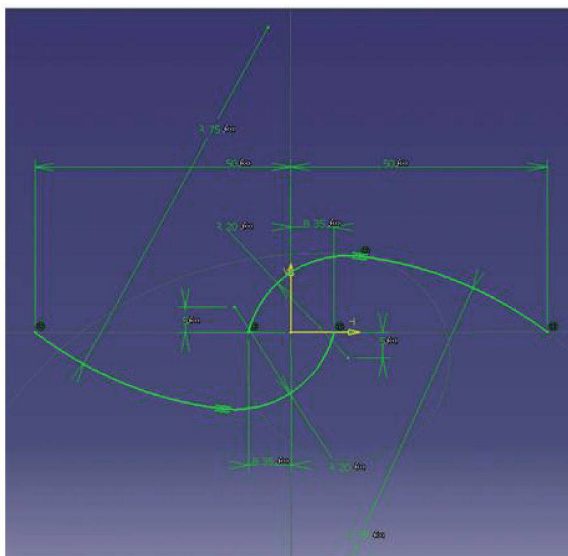
en passant de l'utilisation pour la recherche fondamentale à une utilisation industrielle. Il est possible aujourd'hui de simuler un écoulement relativement détaillé autour d'une géométrie donnée en un temps raisonnable sur un PC classique; alors qu'un tel calcul nécessitait plusieurs jours sur un cluster de plusieurs machines, pour obtenir un résultat comparable au niveau de la précision globale. Par ailleurs, la CFD permet de simuler le système implanté dans son environnement, donc d'évaluer l'influence du toit sur lequel est montée l'éolienne, ou encore l'effet des maisons aux alentours.

D'une manière plus générale, lors de la simulation numérique de l'écoulement d'air autour du système, on peut soit déployer un algorithme d'optimisation automatique basé sur la minimisation d'une variable choisie préalablement, par exemple la distribution de pression sur une surface, soit réaliser ces itérations en évaluant soi-même les modifications à apporter à la forme des pâles, en interprétant successivement les solutions numériques obtenues.

La méthode utilisée ici pour développer l'aérodynamique de notre système est la seconde, relativement classique, qui s'appuie sur un processus itératif de modification de la géométrie, dont le principe est montré sur la figure 3. On travaille ici principalement sur la forme des pâles, jusqu'à ce que les performances simulées numériquement atteignent les objectifs fixés dans le cahier des charges.

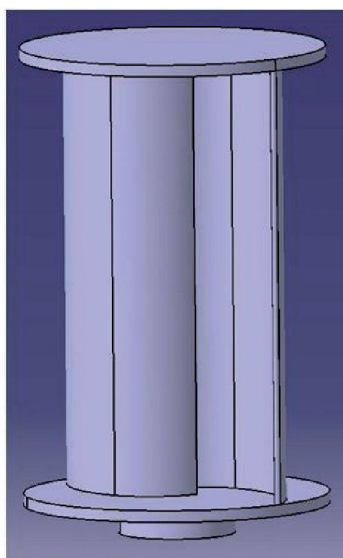
Construction de la maquette numérique

La construction de la maquette numérique est guidée par une base de données externe, à partir de laquelle les principaux paramètres géométriques commandent les modifications de la forme. A chaque calcul de CFD succède une modification de la géométrie dans le but d'améliorer l'aérodynamique. Au lieu de redessiner « à la main » dans la CAO chaque nouvelle modification, on fait directement varier les paramètres externes, qui se répercutent automatiquement sur une nouvelle CAO prête à être calculée par la CFD. Le processus est illustré en figure 4, où l'on voit l'évolution de



	A	B	C	D	E	F
1	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Décalage (e)	Décalage courbe int (mm)	Courbe ext (mm)	Courbe int (mm)
2	150	100	16.7	5	75	20
3						
4						
5						
6						
7						

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Hauteur	Diamètre	e	Déc courbe 1	Courbe int	Courbe ext	Fonctionne
2	1	150	100	16.7	0.01	29.25	0.5	ok
3	2	150	100	16.7	0.01	40	0.1	ok
4	3	150	100	16.7	0.01	40	20	ok
5	4	150	100	16.7	5	40	20	ok
6	5	150	100	16.7	8	40	20	ok
7	6	150	100	16.7	5	40	29	ok
8	7	150	100	16.7	5	150	29	ok
9	8	150	100	16.7	5	150	20	ok
10	9	150	100	16.7	5	75	20	ok
11	10	150	100	16.7	5	75	29	ok



Haute école Arc Ingénierie

La Haute Ecole Arc regroupe les forces des hautes écoles spécialisées (HES) des cantons BE francophone/JU/NE. Fortement intégrée dans la région, la HE-Arc dispose d'une solide assise pour développer de véritables relations de confiance avec ses partenaires industriels.

La filière Ingénierie-Design, née en 2006, forme des spécialistes dont le rôle est de participer à la création et au développement de produits dont les fonctions, l'esthétique et l'ergonomie satisfont simultanément les attentes des utilisateurs.

Après trois ans d'études à plein temps et obtention des crédits européens (ECTS) attestant l'acquis de formation, le candidat décroche le titre de Bachelor HES en ingénierie-design, alliant des compétences d'ingénieur concepteur à celles de designer industriel.

Fig. 5 : Simulation numérique d'un écoulement d'air venant de la gauche. Vue en coupe de la section de l'éolienne avec répartition du champ scalaire de vitesses ; mise en évidence de la nappe tourbillonnaire et du détachement de vortex dans le sillage à l'aval de l'éolienne (HE-Arc Le Locle, 2008)

la forme des pâles en fonction de la répartition de pression sur leur surfaces intérieures.

La HE Arc dispose également d'installations de prototypage rapide, notamment une imprimante 3D permettant de réaliser des prototypes en plâtre imprégnés de résine acrylique, afin de se faire une idée très précise de l'objet.

Différentes méthodes d'ingénierie numérique

La CFD est déployée ici selon deux approches différentes, selon deux classes d'analyse numérique. Dans le cadre d'un projet de développement aérodynamique d'éoliennes, on utilise la CFD comme outil de simulation itérative industrielle, telle une « soufflerie virtuelle », pour réduire les besoins en essais expérimentaux et par conséquent entraîner une diminution des coûts tout en répondant aux besoins de la production. On peut voir, en figure 5, quelques étapes successives de l'écoulement d'air venant de gauche et entraînant en rotation horaire une éolienne à axe vertical de type Savonius : le développement de la nappe tourbillonnaire avec les champs de pression (rouge = haute pression, bleu = basse pression) est bien mis en évidence. Mais ceci fait qu'on génère, à chaque calcul, une importante base de données largement sous-exploitée, de laquelle seulement une fraction d'informations est effectivement utilisée.

La seconde approche tend donc vers une meilleure exploitation de ces informations numériques, menant à un outil d'analyse prévisionnelle qui permet d'interroger l'écoulement de façon plus détaillée que ne le fait la soufflerie qui conduit, à terme, à la mise en place d'une simulation « prévisionnelle ». Cette dernière se distingue de l'analyse itérative industrielle du fait que, sachant ce que l'objet en question doit réaliser comme fonction aérodynamique – donc connaissant les propriétés de l'écoulement à l'amont et à l'aval – on obtienne la géométrie, qui n'est autre que la conséquence ayant mené à l'écoulement préalablement défini. C'est une classe d'analyse basée sur une extrapolation comportementale du fluide, autour d'une géométrie encore inconnue

L'ingénierie numérique réalisée à la HE-Arc trouve un terrain d'application dans la conception d'éoliennes à basse puissance, destinées à l'habitat urbain, avec ses diverses contraintes et implications technologiques, juridiques et esthétiques. Un projet actuellement en cours avec un industriel suisse confirmera l'approche et permettra de renforcer les liens avec la manufacture dans un domaine en plein essor.

Stephane Fiorucci, Prof. HES
Filière Ingénierie-Design / Unité EDANA
Haute Ecole Arc Ingénierie
Av. Hotel-de-Ville 7, CH – 2400 Le Locle

