



Louis GALIEGUE



Tom LABROSSE



Mathilde LE MOING

HotÉole : Système de chauffage éolien sans conversion électrique



Prototype de la cuve chauffante

1. Concept

Nous proposons un système éolien original, baptisé HotÉole, permettant de convertir directement l'énergie cinétique du vent en chaleur, sans passer par la traditionnelle conversion électrique intermédiaire. Le système se compose simplement (cf. Fig. 1) d'une éolienne Savonius reliée à un rotor situé au cœur d'un cumulus contenant de l'eau. Ce sont les frottements dans l'eau du rotor entraîné par l'éolienne qui permettent de convertir l'énergie mécanique en chaleur, par simple dissipation. En plus de servir de convertisseur d'énergie, le mélangeur isolé thermiquement sert de système de stockage d'énergie (sous forme de chaleur).

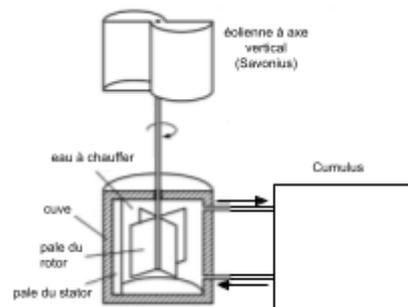


Figure 1: Schéma d'une éolienne chauffante (Article: Direct Conversion of Wind Energy into Heat Using Joule Machine)

Aujourd'hui, les enjeux climatiques ne concernent plus les générations futures, mais nous frappent de plein fouet. Les consciences évoluent (aidées par les dérèglements

météorologiques de plus en plus fréquents) et l'impact de l'homme sur son environnement est dorénavant analysé afin de le réduire : la création du GIEC et les engagements de la COP21 vont dans ce sens. Par exemple, le chauffage résidentiel représente en France près de 10% des émissions de gaz à effet de serre.

Les normes évoluent également et la nouvelle réglementation environnementale RE2020 applicable aux bâtiments neufs impose, non seulement une analyse de l'habitat en cycle de vie pour diminuer son impact sur l'environnement, mais également une amélioration de sa performance énergétique, qui passe en général par une bonne isolation du bâtiment couplée à une autoproduction énergétique. Hélas, la production d'énergie renouvelable actuelle au sein d'un foyer passe en grande majorité par le solaire et on sait que les panneaux photovoltaïques sont gourmands en matériaux dont l'impact environnemental n'est pas négligeable, et le stockage de l'énergie électrique produite passe par l'usage de batteries dont l'impact environnemental est encore pire.

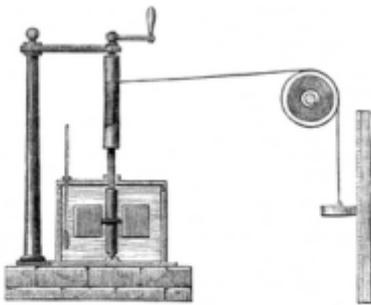


Figure 2: Gravure du dispositif expérimental utilisé par Joule (Harper's New Monthly Magazine, No. 231, 1869)

Notre système permet de répondre de façon responsable aux enjeux environnementaux et pallie les défauts du solaire : c'est un système low-tech (purement mécanique), sobre et low-cost (car constructible avec des matériaux simples, qui peuvent être en partie bio-sourcés et locaux), fonctionnant sans aucun impact environnemental (pas d'émission de gaz à effet de serre...), de jour comme de nuit, et permettant de stocker de l'énergie de façon très propre et très peu coûteuse. L'idée n'est pas nouvelle puisqu'elle reprend le principe de l'expérience de Joule de 1847 (cf. Fig. 2) qui permet de prouver l'équivalence entre travail et chaleur. Elle a été reprise dans les années 1970 suite au choc pétrolier pour chauffer une maison [1], mais on ne trouve pas de système opérationnel ni d'étude de prototype dans la littérature [2].

2. Pré-dimensionnement

Nous souhaitons pré-dimensionner un système permettant de chauffer 200 L d'eau de 50°C en 24 heures, soit fournir une puissance de 480W, pour une vitesse de vent de 3 à 15 m/s. On peut étudier les deux points clefs du système: la partie éolienne en contact avec l'air et la partie mélangeur en contact avec l'eau.

Sur la partie mélangeur, on cherche à évaluer le couple à obtenir à partir de la vitesse de rotation des pales pour obtenir la puissance thermique désirée. On utilise le nombre de puissance N_p qui caractérise la force transmise par les pales du mélangeur : il est comparable à un coefficient de traînée et dépend de la géométrie utilisée¹.

Ensuite, nous voulons trouver la taille de l'éolienne afin qu'elle puisse fournir la puissance nécessaire au frein hydraulique (couple et vitesse de rotation) à partir d'une gamme de vitesse de vent donnée. À l'aide de la définition de la puissance éolienne d'une Savonius et de la courbe de puissance, nous obtenons les dimensions de l'éolienne Savonius pour que notre rotor puisse tourner : un rayon de 1m et une hauteur de 4m permettent de fournir la

¹ R. R. Hemrajani et G. B. Tatterson décrivent la méthodologie dans le chapitre "Mechanically Stirred Vessels" de "Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice", 2003.

puissance thermique nécessaire à une vitesse de vent de 8m/s.

Ce prédimensionnement montre que, pour des conditions de vent régulièrement observées en France, chauffer quotidiennement un cumulus de 200 L au moyen de notre système HotÉole est tout à fait réaliste.

3. Preuve de concept

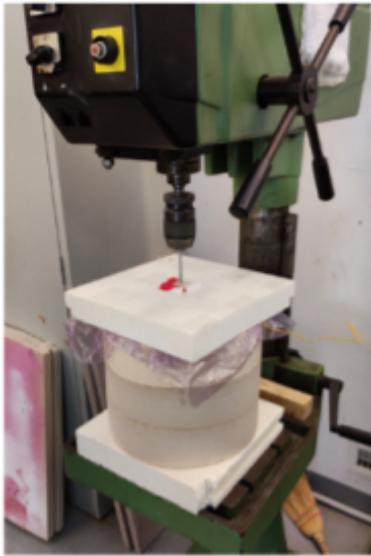


Figure 3: Prototype en expérimentation, monté sur une perceuse à colonne

Le prototype réalisé se concentre sur la partie mélangeur. Il est composé d'une cuve remplie de 6L d'eau et isolée thermiquement (Fig. 3), agitée par un rotor constitué de 4 pales, mis en rotation par une perceuse à colonne qui simule l'action de l'éolienne. Avec ce prototype, peut-on chauffer l'eau de la cuve, et à quelle vitesse?

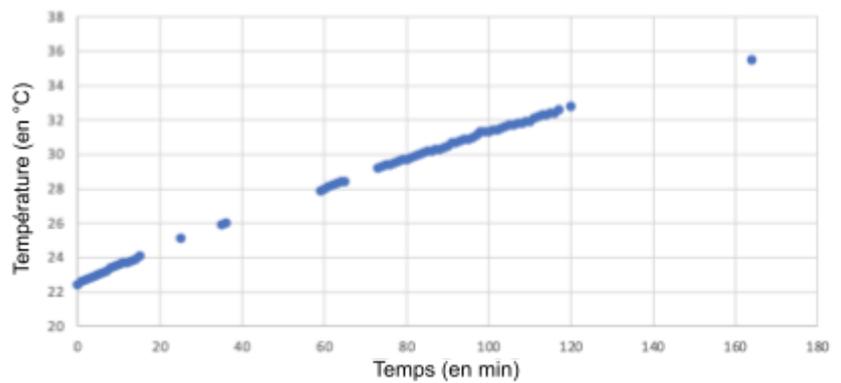


Figure 4

Les résultats de l'expérience, pour une vitesse de rotation de 6 tours/sec sont montrés sur la Fig. 4. Elle a été très concluante avec une élévation de température de près de 15°C en près de 3h, soit un échauffement moyen d'environ 1°C toutes les 10 minutes. Le concept est donc validé : on peut significativement chauffer l'eau en l'agitant. Dans cette expérience, on voit clairement que la température n'avait pas encore atteint une valeur asymptotique. Par des calculs thermiques, nous avons montré que, asymptotiquement, nous aurions pu atteindre une température supérieure à 70°C.

4. Modélisation et caractérisation du mélangeur

4.1 Simulation

L'objectif de la simulation numérique est de quantifier l'élévation de température pour un rotor et une vitesse de fonctionnement donnée. Pour cela nous avons utilisé le logiciel STAR-CCM+ pour y modéliser le rotor dans une cuve remplie d'eau.

Nous pouvons notamment observer le profil des vitesses de l'eau dans un plan de notre mélangeur lorsque celui-ci est actionné (cf. Fig. 5). Cela nous permet d'estimer les turbulences

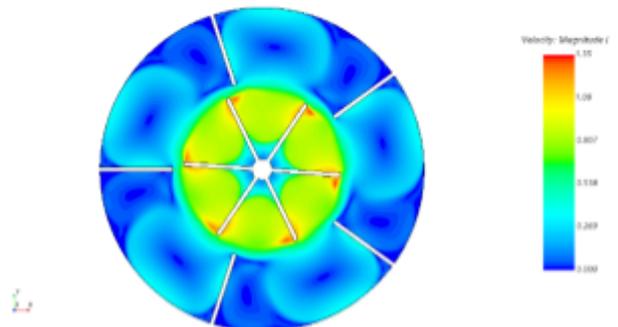


Figure 5: Champs de vitesse résultat dans le mélangeur

présentes dans le système, qui sont à l'origine de la dissipation d'énergie en chaleur.

Cependant, cette modélisation ne permet pas de simuler l'échauffement, pour des raisons de coût de calcul numérique. En effet, pour simuler cet échauffement, la résolution de la modélisation se doit d'être très fine (de l'ordre de 10^{-6} m d'après l'échelle de Kolmogorov) car elle doit simuler la dissipation des tourbillons en chaleur. La taille du maillage empêche une résolution dans des temps raisonnables.

4.2 Fabrication cuve/mélangeur

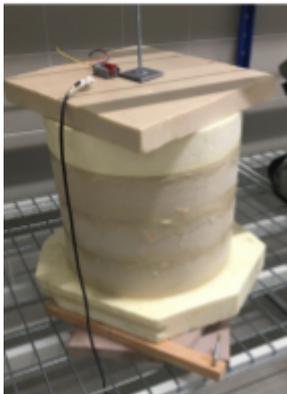


Figure 6: Prototype de la cuve instrumenté

La cuve réalisée est composée de polystyrène afin d'assurer l'isolation thermique (cf. Fig. 6). On laisse passer l'axe tournant sur lequel est fixé le rotor qui vient tourner dans l'eau. Il existe aussi des pales fixes dans la cuve afin d'augmenter les turbulences (cf. Fig. 7).



Figure 7: Intérieur de la cuve avec les pales fixes

Suite à la preuve de concept concluante, nous instrumentons notre mélangeur pour en caractériser les propriétés: température de l'eau, la vitesse de rotation du rotor et couple fourni par le rotor. La température et la vitesse de rotation sont obtenues grâce à une sonde de température et un capteur à effet Hall, l'acquisition étant réalisée au moyen d'un

système Arduino. La mesure du couple est originale, car mesurer directement le couple sur l'arbre, en rotation, est complexe. Nous avons donc mesuré ce couple par réaction: la cuve est placée sur un plateau qui peut tourner librement, et un ressort vient retenir cette rotation. On mesure l'élongation du ressort permettant de retenir le plateau et on en déduit la force correspondante, puis le couple exercé.

4.3 Leviers d'optimisation du système : caractérisation de différents rotors

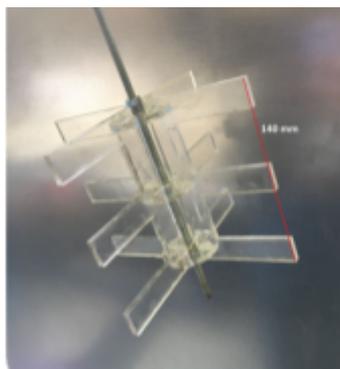


Figure 8: Mélangeur à étages étudié

Afin de pouvoir modifier les caractéristiques de notre système, nous avons étudié deux rotors différents : un constitué de pales pleines (cf. figure 8), l'autre constitué de pales trouées. On peut montrer que la seule propriété importante du rotor est la relation qu'il permet entre le couple qu'on lui applique et sa vitesse de rotation. En effet, pour une éolienne donnée et

une vitesse de vent donnée, c'est cette relation qui détermine la vitesse à laquelle

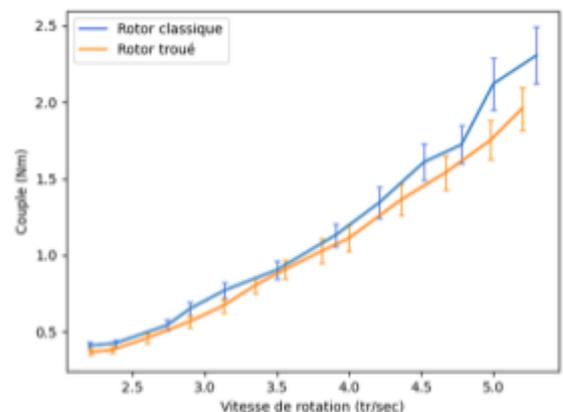


Figure 9: Comparaison du point de fonctionnement selon le rotor (troué ou non)

l'éolienne tourne et donc la puissance du système.

La relation couple/vitesse de rotation pour les deux rotors est montrée sur la figure 9. On observe que les relations diffèrent peu, mais diffèrent quand même : même si un travail supplémentaire est nécessaire pour identifier des géométries de rotor permettant des relations plus variées, l'expérience ici décrite montre que, en modifiant la géométrie des rotors, on peut bien concevoir des systèmes aux propriétés de fonctionnement différentes.

5. Retour sur investissement

On souhaite dans cette partie comparer le coût d'utilisation d'un chauffe-eau électrique classique et de notre système. On considère un ballon de volume $V = 200\text{L}$, que l'on souhaite chauffer quotidiennement de $\Delta T = 50\text{ }^\circ\text{C}$. L'énergie électrique annuelle nécessaire pour cela est : $E = V * c * \Delta T * 365 = 4\,380\text{ kWh}$, avec $c = 4185\text{ J/K/kg}$ la capacité calorifique massique de l'eau. En supposant un prix du kWh de 0,17€ (alors que le prix du kWh sera probablement supérieur dans un futur proche), l'utilisation du chauffe-eau électrique revient à un coût annuel de 745€.

Le coût d'une éolienne low-tech 200W est de l'ordre de 350€ [3]. En estimant la partie mélangeur au même coût, on arrive à un coût complet de notre système de 700€. On obtient donc notre retour sur investissement en approximativement 1 an.

6. Facteurs de réussites et freins

Notre système permet la conversion de la puissance mécanique en puissance thermique.

Les avantages de notre système sont son aspect low-tech (empreinte environnementale faible, coût de fabrication faible, réparabilité...) et le fait que notre système intègre à la fois conversion d'énergie et stockage.

Les freins au développement de notre système sont ceux communs aux projets éoliens individuels: encombrement (et donc difficulté à implémenter en milieu urbain), solution adaptée à un environnement où il y a souvent du vent suffisamment fort.

Nous cherchons à répondre à des problématiques environnementales et un des enjeux majeurs à ce niveau est la durabilité des systèmes installés. Ainsi, il sera indispensable de prendre en compte les dégradations possibles engendrées par l'eau sur le mélangeur lors de la conception et fabrication de ce dernier.

7. Points essentiels

Pour chauffer un ballon d'eau chaude, nous souhaitons proposer une solution à l'impact environnemental aussi réduit que possible: notre système HotÉole permettant de transformer l'énergie éolienne directement en chaleur, sans conversion électrique intermédiaire. La sobriété et le low-tech sont au cœur de notre projet.

Notre solution convient à un usage domestique et pourrait être complémentaire de panneaux solaires. Pour pallier au problème d'intermittence des projets éoliens, notre système intègre naturellement son propre système de stockage : le ballon d'eau chaude.