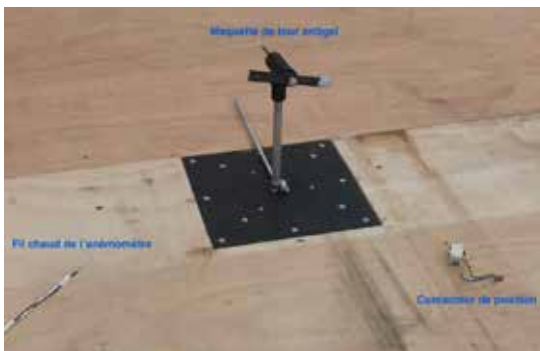


Mesure de l'écoulement généré par une maquette de tour antigel à échelle réduite

Une Tour AntiGel (TAG) est un mât équipé en son sommet d'un ventilateur en rotation, balayant tangentiellement la parcelle environnante d'un jet turbulent rond. Le principe de fonctionnement de la tour est présenté comme mélangeant de l'air froid près du sol avec de l'air plus chaud provenant des parties supérieures de la couche d'inversion thermique nocturne, de façon à augmenter globalement la température de l'air au niveau de la vigne.

Par Johan Carlier, Pierre Regnaud, Philippe Georgeault, Clara Le Cap, Dominique Heitz



Le souffle direct et de courte durée du jet chaud sur le bourgeon à chaque rotation de la tour antigel est également susceptible de participer à son réchauffement.

Dans cet article, nous nous proposons d'aborder l'étude d'un jet rond en rotation au-dessus d'une paroi en réalisant des mesures de laboratoire sur une maquette de tour antigel à l'échelle 1/50. Il s'agit de mesures de vitesse par anémométrie à fil chaud et de visualisation de l'écoulement par caméra rapide. L'objectif ici est de mettre en évidence l'évolution des caractéristiques cinématiques du jet le long de son axe, et la forme spirale de cet axe.

1 - Modèle d'évolution simplifié d'un jet rond dans un repère tournant

L'écoulement issu d'un ventilateur est un jet rond turbulent. Les jets sont très largement documentés [1], pour une large gamme de nombre de Reynolds, et avec la prise en compte de nombreux phénomènes physiques, telles que la flottabilité et la compressibilité. Toutefois, il est surprenant que peu d'études existent sur l'écoulement d'un jet rond en rotation dans un plan [2] et qu'aucune, à notre connaissance, ne considère cet écoulement se développant à proximité d'une paroi. Un jet se caractérise par sa quantité de mouvement initiale M_0 , et son débit initial Q_0 , complétées éventuellement de sa flottabilité initiale F_0 . Lorsqu'il se développe dans un environnement au repos de même densité, le jet conserve le long de son axe x sa quantité de mouvement $M(x) = M_0$ et voit son débit $Q(x)$ augmenter par entrainement de son environnement.

Pour un jet rond, Lee et Chu [1] donnent : $Q = \pi U_c b^2 M_0 = \frac{\pi}{2} U_c^2 b^2$

avec : $U_c(x) = 7M_0^{1/2} x^{-1}$, la vitesse maximale du jet sur son axe;

$b(x) = 0.114x$, le diamètre du jet.

Ainsi, un jet rond a une vitesse maximale sur son axe U_0 qui décroît inversement avec la distance x à l'origine du jet et un rayon b qui augmente linéairement avec cette distance. Si ce comportement est inéluctable au-delà d'une région d'établissement ou de transition d'une longueur de quelques diamètres du jet, l'étendue de cette région et la vitesse d'entrainement de l'environnement ne sont pas universelles. Par exemple, le coefficient d'expansion du jet (0.114 ici) peut dépendre des conditions génératrices du jet (buse, ventilateur, etc).

En considérant un jet rond se développant dans un repère tournant à la vitesse ω , on peut déduire un modèle simple de la forme spirale du jet par effet de rotation.

Soit $U(r)$, la vitesse d'un tronçon du jet d'épaisseur petit, à la distance de l'origine du jet. La position r de ce tronçon transporté à la vitesse $U(r)$ est donnée dans un repère tournant à la vitesse ω par :

$$r(t) = \int_0^t U(r) dt \quad \text{avec } t, \text{ le temps.}$$

La vitesse du tronçon $U(r)$ peut être approchée par la vitesse maximale du jet U_c sur son axe et on obtient ainsi :

$$\left\{ \frac{U(r)}{U_o} = 1 \text{ si } \frac{r}{R_o} \leq a \quad \frac{U(r)}{U_o} = a \left(\frac{r}{R_o} \right)^{-1} \text{ si } \frac{r}{R_o} > a \right.$$

avec :

- $U_o = \frac{1}{2} \frac{M_o}{Q_o}$, une échelle de vitesse caractéristique du jet;
- $R_o = \sqrt{2} \frac{Q_o}{M_o^{1/2}}$, une échelle de longueur caractéristique du jet;
- a , un coefficient traduisant l'étendue de la région d'établissement ($a = 7$ ici).

En pratique, ces échelles sont proches de la vitesse débitante du ventilateur U_q et de l'envergure des pales L_p .

En intégrant $U(r)$, on obtient l'équation de la courbure du jet (ou encore la trajectoire d'un tronçon du jet) dans un repère fixe sous l'effet de la rotation :

$$\{x(t) = r(t) \cos(\omega t) \quad y(t) = r(t) \sin(\omega t)\}$$

avec :

$$\left\{ \frac{r(t)}{R_o} = t \text{ si } t \leq a \quad \frac{r(t)}{R_o} = \sqrt{a\omega(2t - a\omega)} \text{ si } t > a \right.$$

La Figure 1 ci-dessous illustre à gauche la courbure du jet pour

$$a = 7 \text{ et } \omega = 2\pi \frac{Fr_{TAG} L_p}{U_q}$$

en utilisant des valeurs typiques relevées sur les TAG, soit;

- $Fr_{TAG} = 1/470$ Hz, la fréquence de rotation de la tour;
- $L_p = 2.5$ m, la longueur des pales;
- $U_q = 15$ m/s, la vitesse débitante du ventilateur.

Cette figure montre que la courbure du jet est relativement faible en raison de la lente rotation de la TAG par rapport à la vitesse importante du jet. Ce constat plaide en faveur d'une faible influence de la rotation sur la portée du jet. Ce point particulier fera l'objet ultérieurement d'une étude spécifique.

La Figure 1 présente également à droite la décroissance de la vitesse du jet le long de son axe, en représentation adimensionnée. La portée réelle du jet, que l'on peut définir comme la distance à laquelle le jet atteint une vitesse seuil, dépend ainsi des échelles U_o et R_o , lesquelles dérivent directement de la quantité de mouvement initiale et du débit initial M_o et Q_o caractérisant les performances du ventilateur.

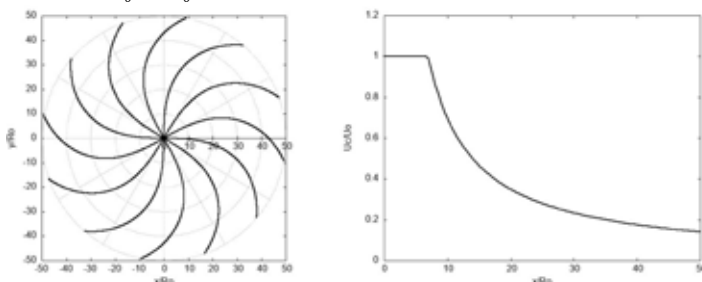


Figure 1 : Modèle adimensionné de l'évolution du jet : à gauche, courbure du jet, et à droite, décroissance de la vitesse sur l'axe du jet pour $a = 7$ et $\omega = \frac{1}{1000}$

2 - Expérimentation sur maquette en laboratoire

Une maquette de TAG à l'échelle 1/50 a été fabriquée par impression 3D dans notre atelier et installée dans notre laboratoire sur un plateau horizontal de 9 m^2 . Le mât mesure 200 mm de hauteur. Les 2 pâles ont un profil NACA 6409 avec une corde de 10 mm et une longueur de 50 mm , soit une envergure totale de 100 mm . Deux moteurs électriques 24 V , situés sous le plateau assurent la rotation des pales et du mât et sont commandés indépendamment l'un de l'autre. Un contacteur au pied de la TAG bascule à chaque tour effectué et permet d'en déduire l'orientation instantanée de la TAG et donc du soufflage. Deux types d'expériences ont été réalisés. Le premier est une visualisation de l'écoulement par caméra. Le second est la mesure de la vitesse de l'écoulement par anémométrie à fil chaud.

2.1 VISUALISATION DE L'ÉCOULEMENT

Un générateur de fumée ensemence l'air avec des particules au-dessus de la maquette. Ces particules sont entraînées à l'aspiration du ventilateur et se concentrent dans le jet. Une rampe de LED éclaire ces particules dans une nappe de lumière rasant le plateau et rend ainsi visible la structure du jet en rotation. Une caméra rapide située à la verticale de la maquette filme la scène. La Figure 2 juxtapose deux photographies : la maquette et l'écoulement généré par celle-ci. Les grandeurs (i.e. la taille du champ de vision) sont adimensionnées par la longueur de la pale. Sur cet instantané, les flèches rouges et bleues indiquent respectivement la direction de soufflage du ventilateur et le sens de rotation de la maquette.

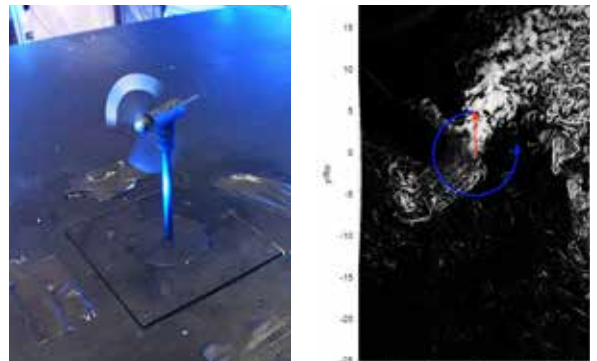


Figure 2 Photographie de la maquette de TAG et visualisation en vue de dessus de l'écoulement généré. La flèche rouge indique la direction du jet à l'instant de la photographie, la flèche bleue indique le sens de rotation de la TAG.

On peut observer l'épanouissement du jet et la forme spirale de son axe, conformément à la modélisation présentée dans la section précédente. Toutefois, le film de l'écoulement (non joint) montre un retour lent de la fumée d'ensemencement vers la maquette, après le passage du jet. Ce retour limite la portée du jet et circonscrit l'apport d'air par la TAG à son environnement. Cette force de rappel peut résulter d'une dépression localisée au niveau de la TAG due à l'air entraîné par le jet et l'aspiration amont du ventilateur.

2.2 MESURE DE LA VITESSE DE L'ÉCOULEMENT

Des mesures de vitesse de l'écoulement ont été réalisées par anémométrie à fil chaud, à différentes positions du capteur et différentes vitesses de rotation d'hélice et de la maquette. Elles sont divisées en deux séries de mesures :

- **1^{ère} série de mesures** : Pour 1 vitesse de rotation d'hélice (4000 tr) et 1 vitesse de rotation de la maquette (0.5 tr/min), la grille de mesure était constituée de 5 distances r à la TAG (200, 400, 600, 800 et 1000 cm) et 9 altitudes z (50, 70, 90, 110, 130, 150, 170, 190 et 210 mm), soit 45 positions de mesures;
- **2nd série de mesure** : Pour 3 vitesses de rotation d'hélice (1500, 2750 et 4000 tr/min) et 3 vitesses de rotation de la maquette 5, 1 et 1.5 tr/min, les mesures ont été réalisées à 5 distances r de la tour (200, 400, 600, 800 et 1000 cm) et, pour chaque distance, à l'altitude où la vitesse est maximale.

Pour chaque point de mesure, la fréquence d'acquisition était de 300 Hz et le temps d'acquisition était de 8 mn (correspondant à plusieurs tours de maquette). Ces mesures ont été utilisées pour calculer la vitesse moyenne de l'écoulement en chaque point de mesure, en conditionnant cette moyenne à l'orientation de la maquette déduit du contacteur.

La Figure 3 cartographie la vitesse moyenne calculée à partir de la 1^{ère} série de mesures. A 4 longueurs de pale de la maquette, on peut observer un jet rond avec un déficit de vitesse en son milieu en raison du sillage du moyeu et d'une vitesse de soufflage plus élevée en bout de pale, soit en périphérie du soufflage. Plus loin, on retrouve une décroissance de la vitesse du jet et une expansion de sa taille, avec toutefois un aplatissement dû à la contrainte du sol (l'écoulement n'est pas libre).

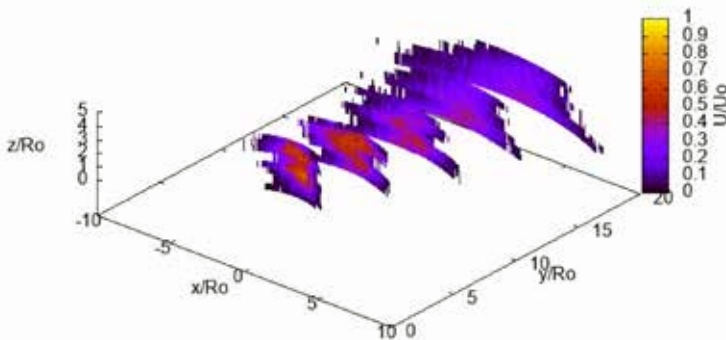


Figure 3 : Cartographie de la vitesse moyenne de l'écoulement.

La Figure 4 a été obtenue à partir de la 2nde série de mesures. Elle montre l'évolution de la vitesse moyenne maximale de l'écoulement en fonction de l'orientation de la maquette et à différentes distances de celle-ci. A chaque position, le pic de vitesse correspond au passage de la rafale de vent généré par la maquette sur le capteur de mesure. Ce pic décroît et s'élargit avec la distance à la maquette, conformément au comportement attendu pour un jet rond. Ces pics sont déphasés par rapport à l'orientation de l'éolienne, du fait de la forme spirale du jet. Contrairement à un jet rond libre, le profil de vitesse n'est pas symétrique (quasi Gaussien), mais présente comme une « traînée » après le passage du pic due à l'interaction du jet en rotation avec le sol. Dans cette expérience, la courbure est amplifiée en utilisant une vitesse de rotation adimensionnée de $\omega_{mag} = 1/130$, 3 fois plus rapide que celle utilisée typiquement sur le terrain ($\omega_{TAG} = 1/450$).

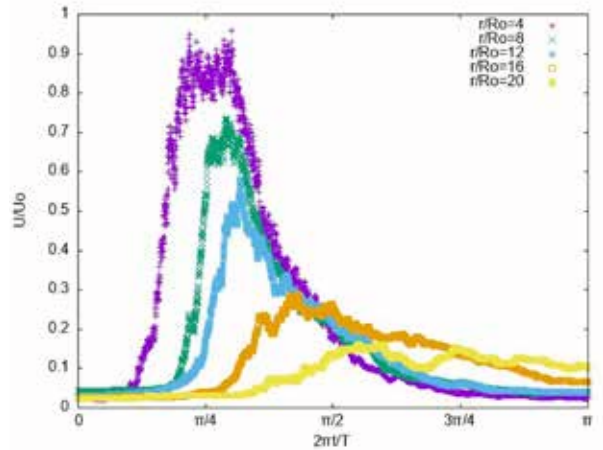


Figure 4 : Évolution de la vitesse moyenne maximale de l'écoulement en fonction de l'orientation de la maquette et à différentes distances de celle-ci



3 Conclusion

Cette maquette de TAG a permis de mettre en œuvre des moyens métrologiques précis de laboratoire sur un écoulement représentatif mais à une échelle bien plus accessible que celles rencontrées dans les parcelles de vignes. Certes, cette représentativité se limite à la cinématique de l'écoulement et ne tient pas compte à ce stade des effets de flottabilité, et au-delà d'effets liés à la météorologie par exemple.

Néanmoins, elle semble suffisante pour reproduire la forme spirale du jet et sa portée. Ce premier résultat est encourageant et nous pousse à poursuivre plus en avant cette approche complémentaire aux expérimentations de terrain pour d'une part prédire le comportement de l'écoulement généré par les différents modèles de TAG et d'autre part d'apporter les éléments nécessaires à la mise en œuvre de simulations numériques. ●

Bibliographie

- [1] J. H. W. Lee et V. H. Chu, Turbulent Jets and Plumes : A Lagrangian Approach, Boston, 2003.
- [2] A. Salan et R. Gebert, «Radial jet in rotating outer flow,» Applied Scientific Research, vol. 41, 1984.