

Sur l'écoulement généré par les TAGs

Mesures de terrain 2022

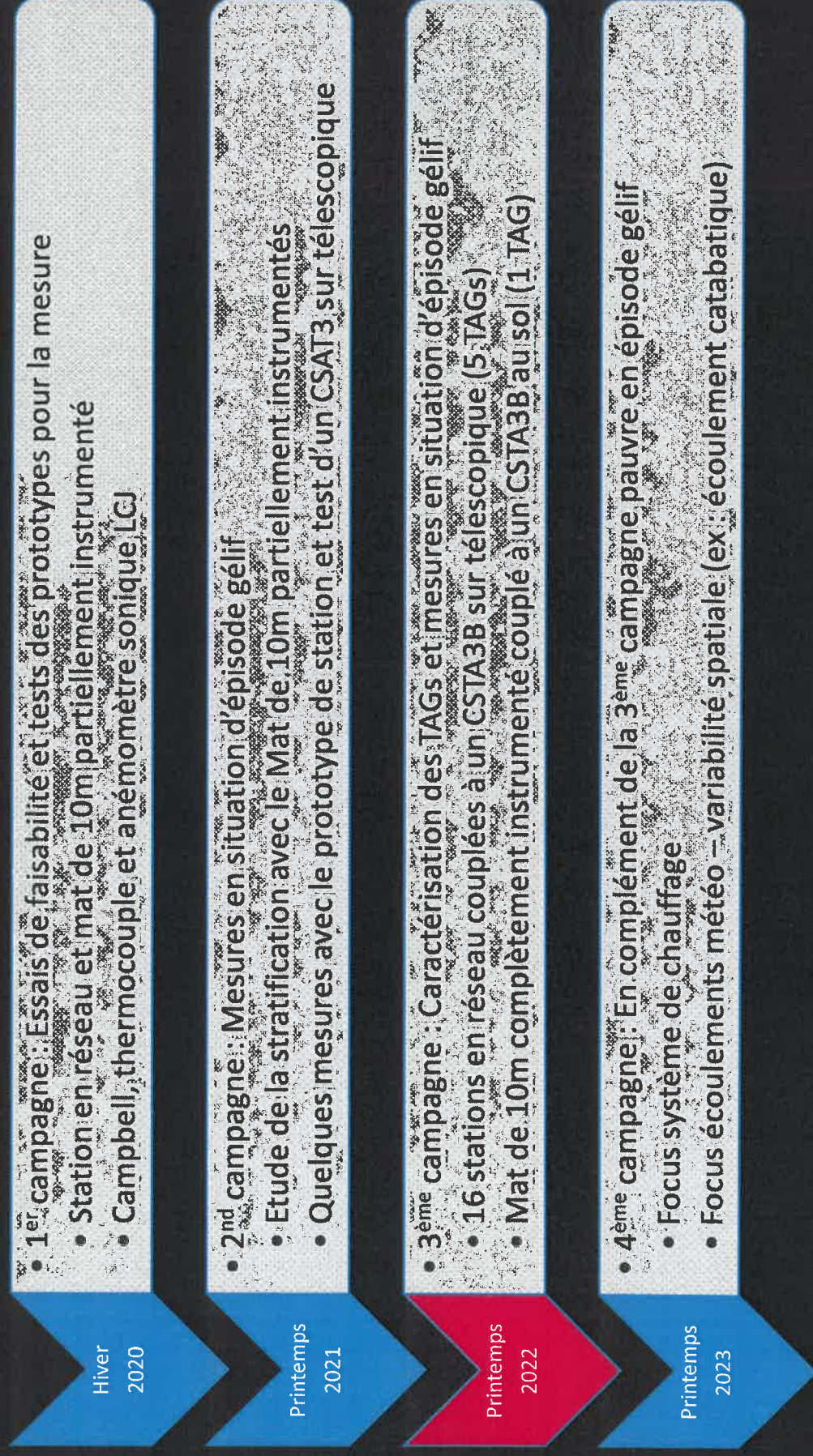
- Premiers résultats
- Bonus : Quelques notions sur les hélices et le jets

Johan Carlier et Clara Le Cap



Journées techniques
20 et 21 juillet 2022

Chronologie des campagnes de mesures à Quincy

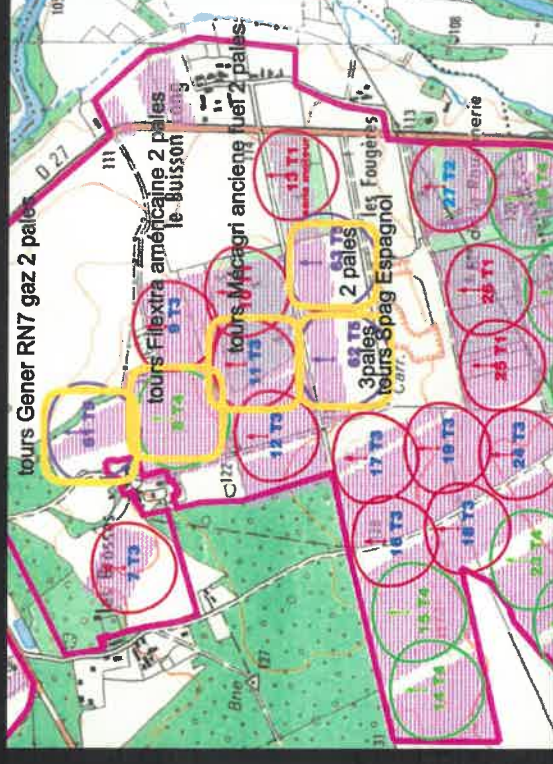


Mesures de terrain 2022

Caractérisation de l'écoulement généré par les TAGs

Caractérisation de l'écoulement généré par les TAGs

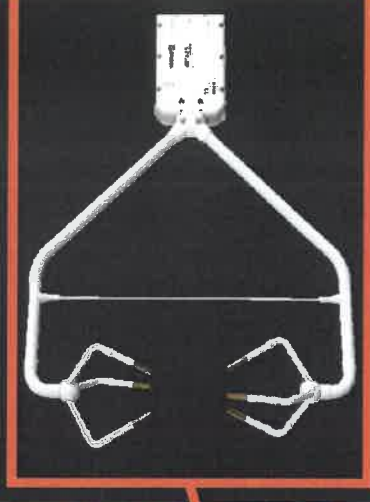
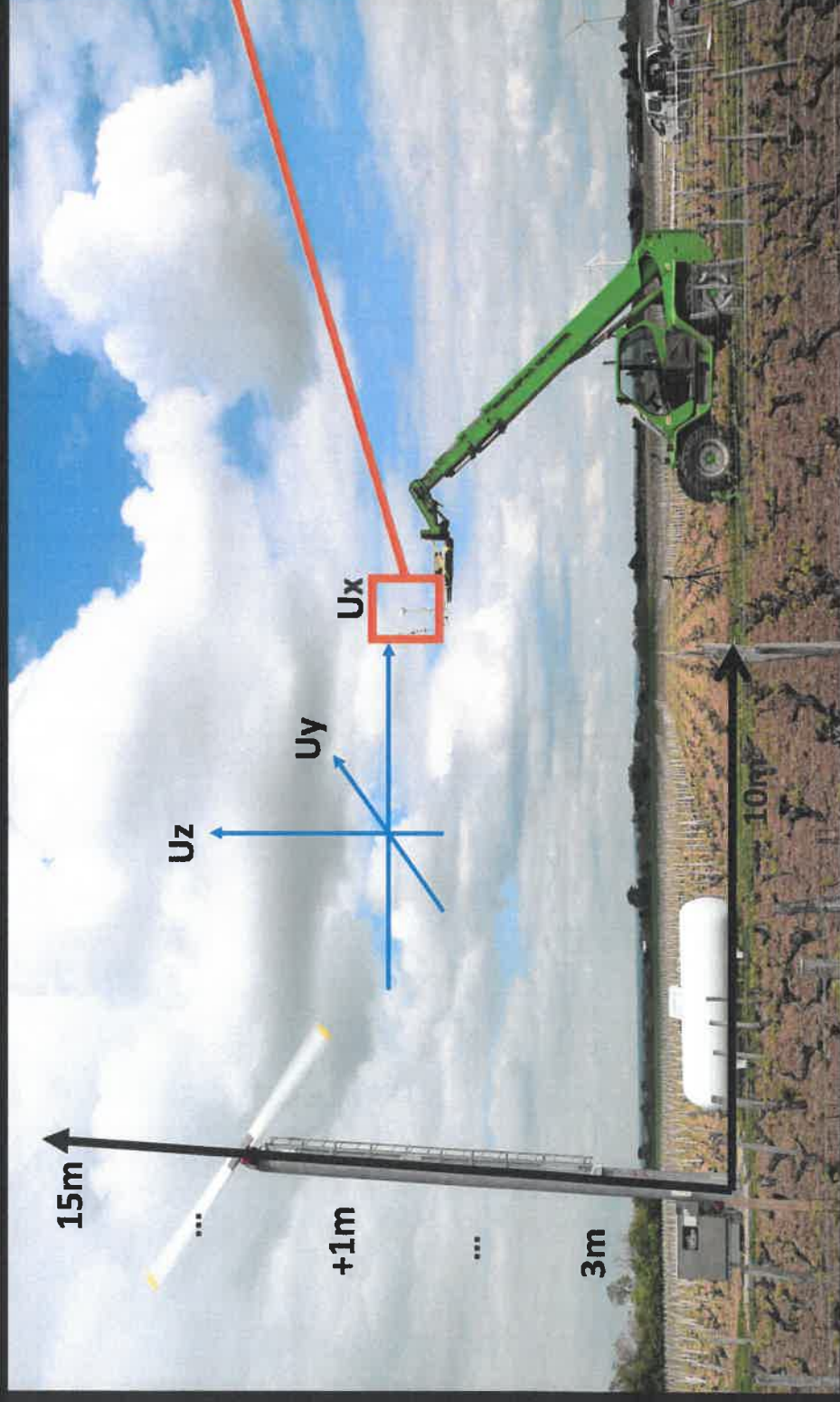
	Orchard Rite	Mecagri	SPAG	SPAG	RN7
Nombre de pales	2	2	2	3	4
Energie	Gaz	Fuel	Gaz	Gaz	Fuel
Vitesse de rotation des pales (rpm)		590	565	565	585
Diamètre de l'hélice (m)	6.05	5.40	4.40	4.40	5.40 à 5.70
Hauteur de la tour (m)	10.7	10.5	11	11	10.50
Inclinaison	8°		7.5°	7.5°	
Protocole	1	1, 2 et 3	1	1	1



- **Protocole 1 : Dédié aux caractéristiques initiales et la portée du jet au niveau de la vigne (pour chaque TAG)**
- **Protocole 2 : Dédié à l'évolution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)**
- **Protocole 3 : Dédié à l'effet TAG, avec ou sans Chauffage, en situation de gel (1 seule opportunité en 2022)**

Mesures de terrain 2022

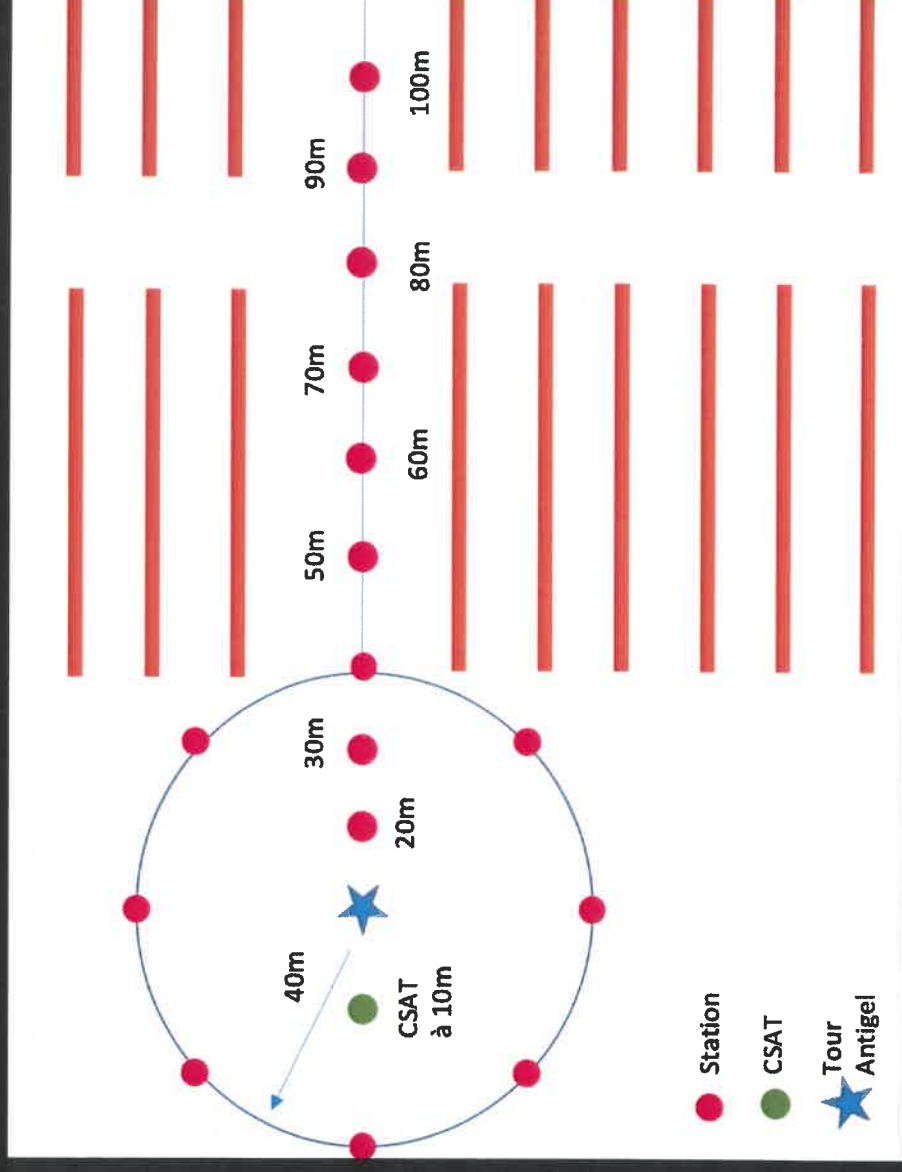
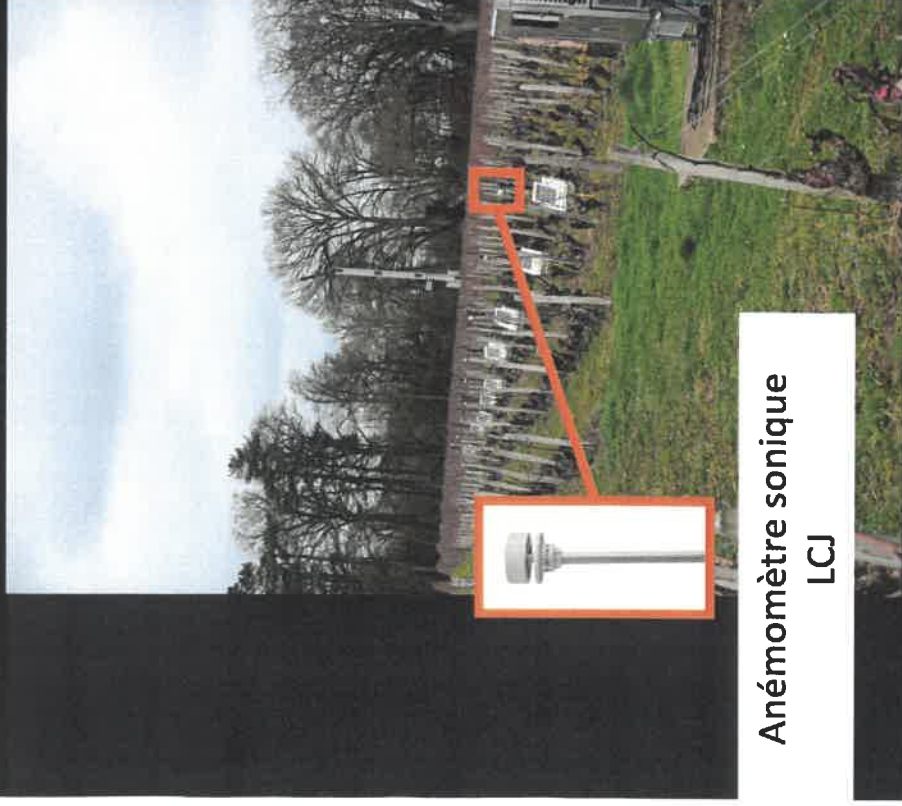
Protocole 1 : Dédié aux caractéristiques initiales et la portée du jet au niveau de la vigne



An m m tre sonique
CSAT3B

Mesures de terrain 2022

Protocole 1 : Dédié aux caractéristiques initiales et la portée du jet au niveau de la vigne



Mesures de terrain 2022

Protocole 1 : Dédié aux caractéristiques initiales et la portée du jet au niveau de la vigne

En résumé :

Métrologie

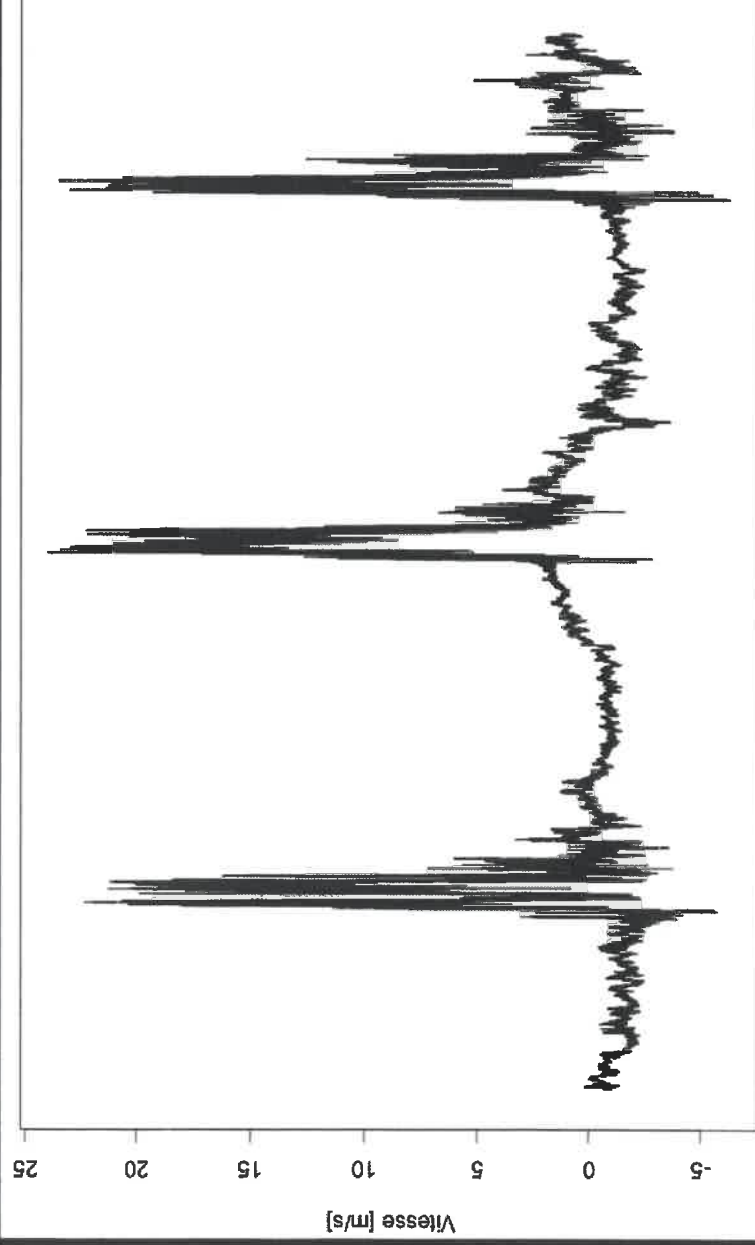
- 1 CSAT3B sur télescopique à 10m de distance de la TAG – acquisition à 100Hz
- 16 Stations disposées autour de TAG – acquisition à 4Hz
- Station météo pour référence disposée à la plus proche parcelle hors du champ d'action de la TAG

Protocole

- De 3m à 15m de hauteur, avec un pas de 1m
- 3 rotations complètes de TAG pour chaque hauteur
- Durée de l'expérience : de 3 à 4 heures

Mesures de terrain 2022

Protocole 1 : Dédicé aux caractéristiques initiales et la portée du jet au niveau de la vigne



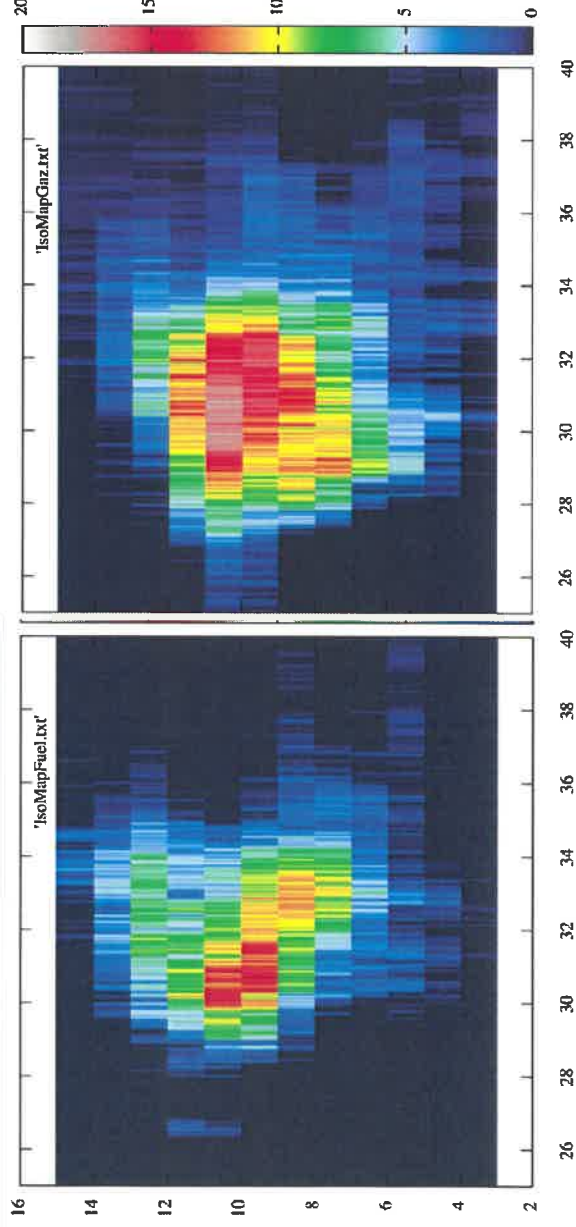
Quelques commentaires :

- Succession de 3 rafales
- Hors rafale = météo vent
- Périodicité d'environ 4mn20
- Double pics « symétrique » à environ 20m/s
- Tête de rafale abrupte
- Queue de rafale agitée
- Variabilité à chaque rotation

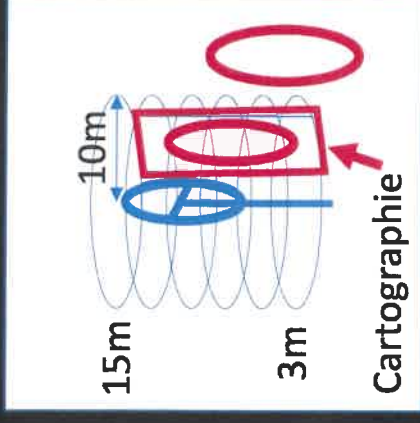
Mesure de vitesse (CSAT3B) à 10 m la TAG et à 10m de hauteur

Mesures de terrain 2022

Protocole 1 : Dédié aux caractéristiques initiales
et la portée du jet au niveau de la vigne



Cartographie de vitesse moyenne (CSAT3B)   10 m la TAG

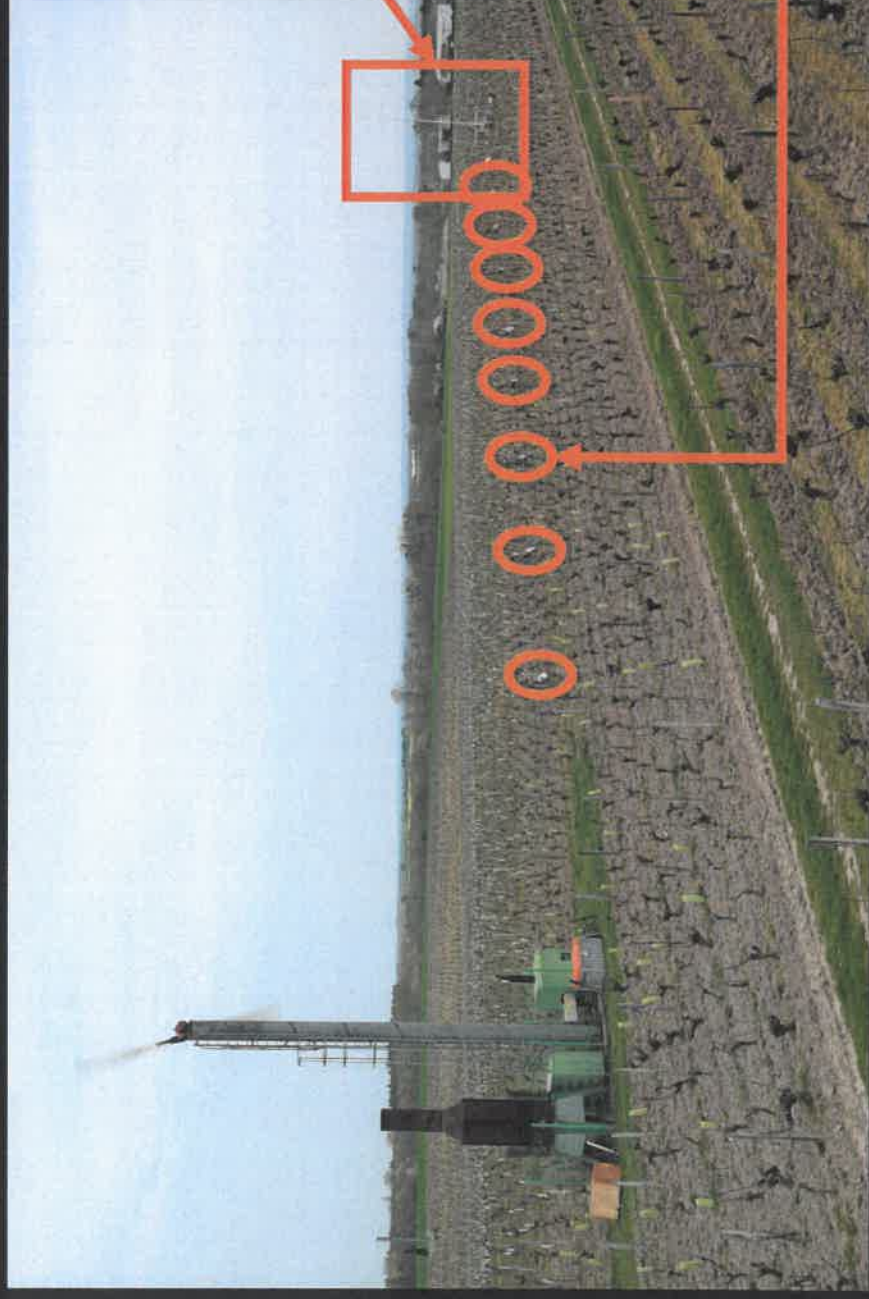


Quelques résultats:

- Convergence insuffisante
- Axisymétrie en question
- Flux de masse $\approx 500\text{kg/s}$ ($400\text{m}^3/\text{s}$)
- Flux de QdM $\approx 5000\text{N}$

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédié   l volution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)



Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédié à l'évolution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

En résumé

Métérologie

- Mat de 10m instrumenté- acquisition à 4Hz
- 16 Stations disposées autour de TAG – acquisition à 4Hz
- Station météo pour référence disposée à la plus proche parcelle hors du champ d'action de la TAG
- 1 CSAT3B à 1m de hauteur, accompagnant le mat – acquisition à 100Hz

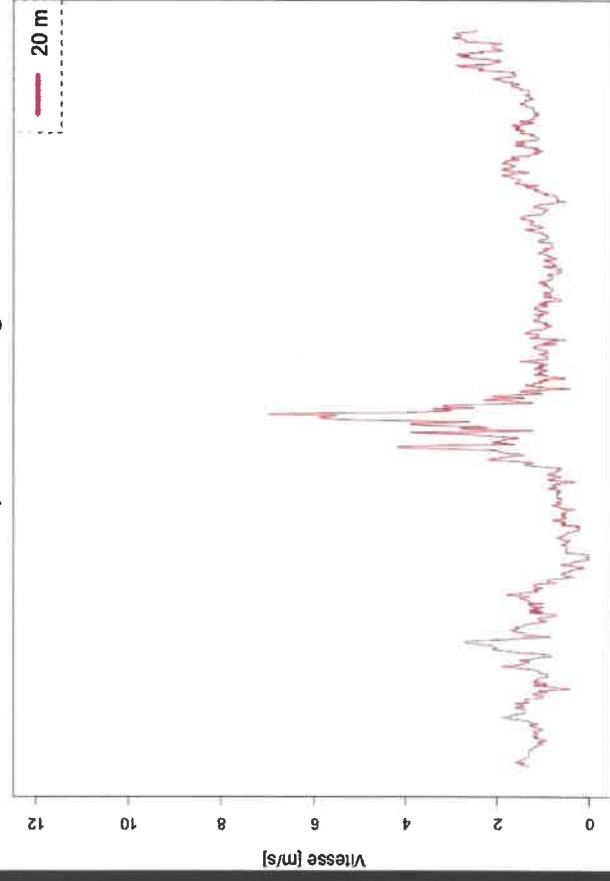
Protocole

- De 30m à 100m de distance, avec un pas de 10m
- 8 rotations complètes de la tour antigel pour chaque distance
- Durée de l'expérience : de 6-7 heures

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédié à l'évolution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

Passage d'une rafale devant un rang de vigne équipé de 9 stations de mesures réparties sur sa longueur

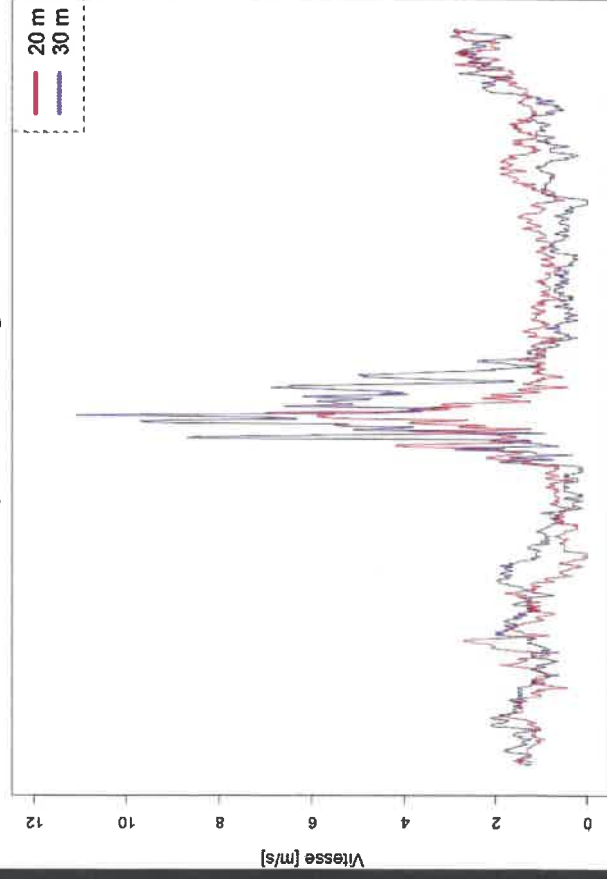


Mesure de vitesse (LCJ) à différente distance de la TAG et à la cime des vignes

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédié   l volution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

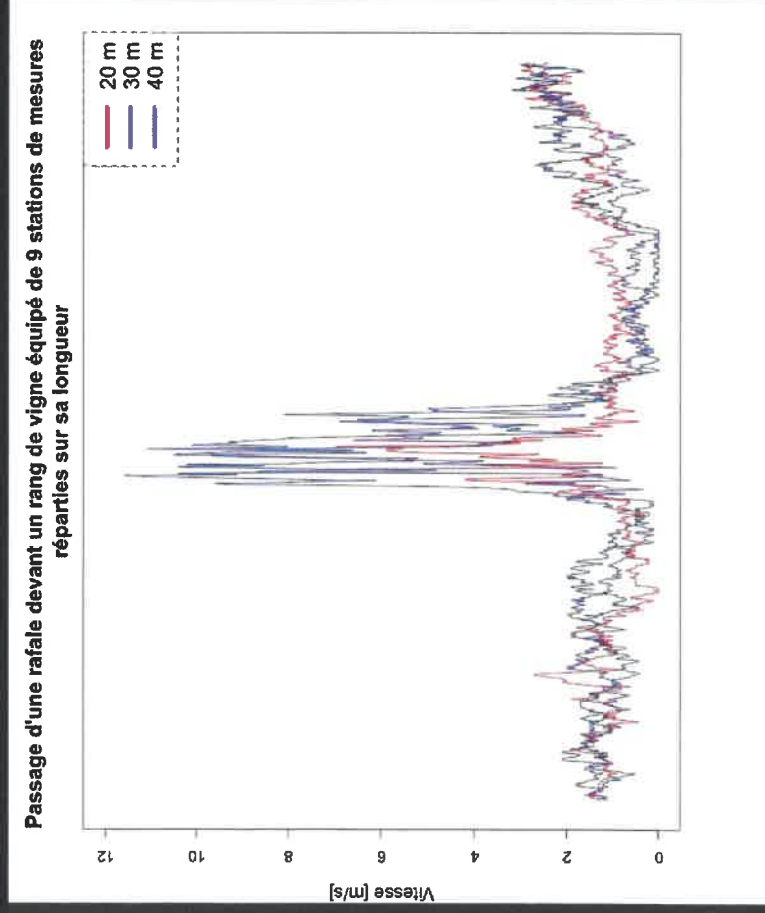
Passage d'une rafale devant un rang de vigne équipé de 9 stations de mesures réparties sur sa longueur



Mesure de vitesse (LCJ)   différente distance de la TAG et   la cime des vignes

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédicé à l'évolution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

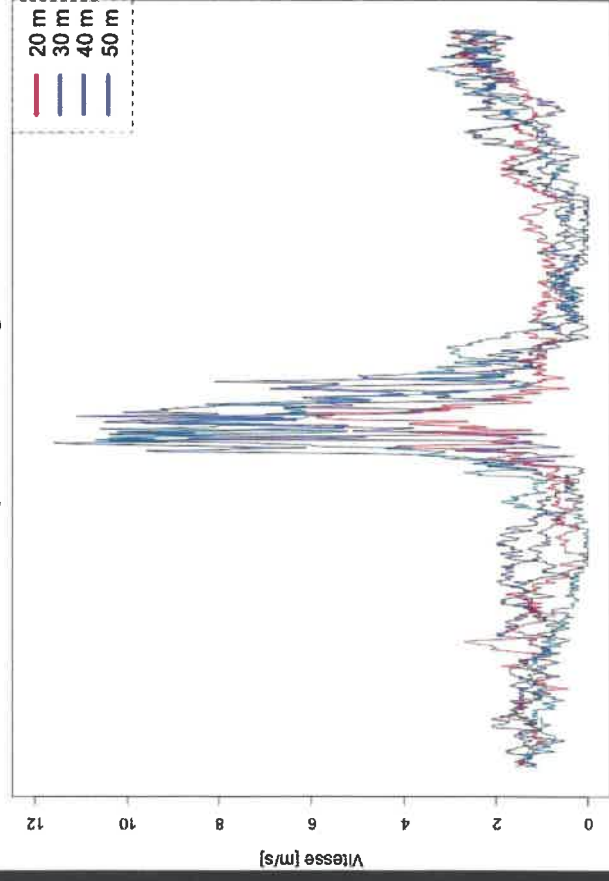


Mesure de vitesse (LCJ) à différente distance de la TAG et à la cime des vignes

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédicé à l'évolution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

Passage d'une rafale devant un rang de vigne équipé de 9 stations de mesures réparties sur sa longueur

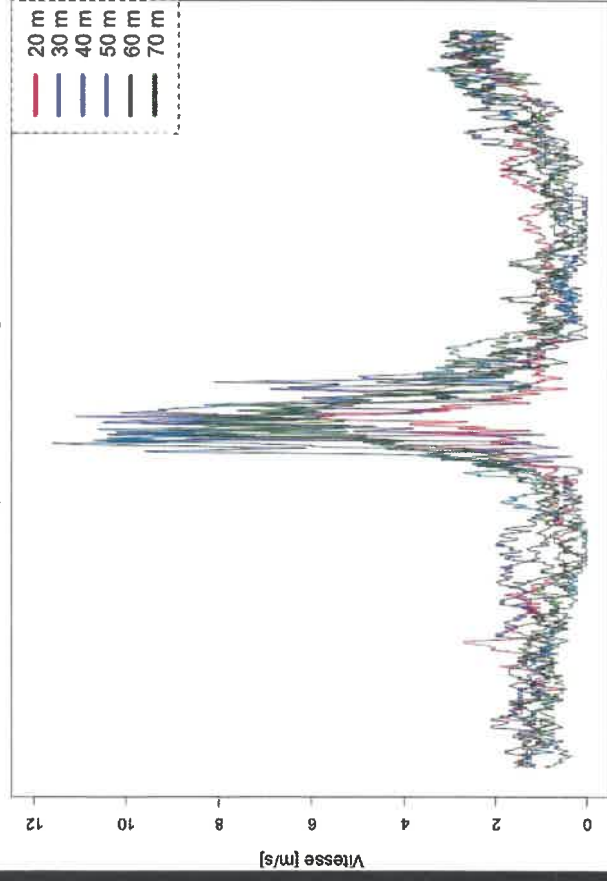


Mesure de vitesse (LCJ) à différente distance de la TAG et à la cime des vignes

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédié l  volution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

Passage d'une rafale devant un rang de vigne  quipp   de 9 stations de mesures réparties sur sa longueur

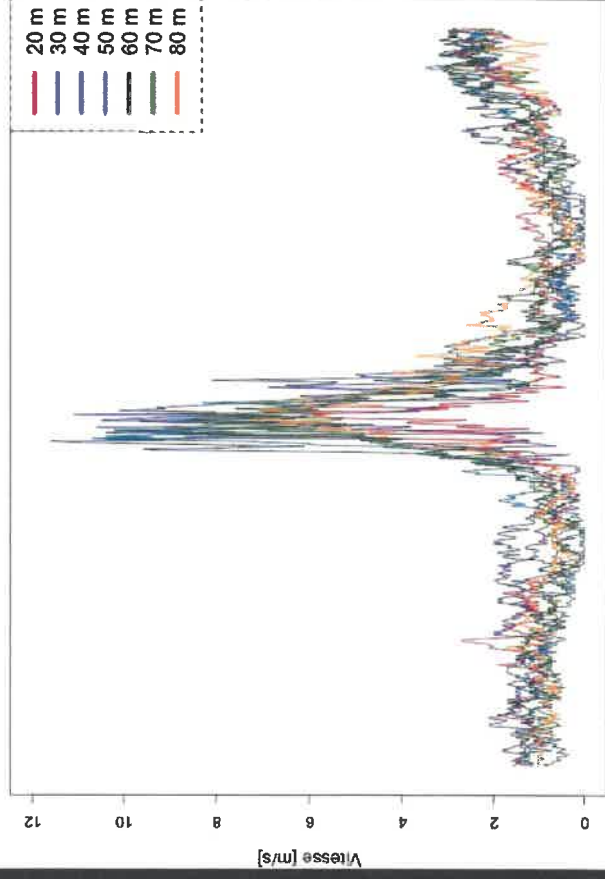


Mesure de vitesse (LCJ)   différente distance de la TAG et   la cime des vignes

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédicé à l'évolution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

Passage d'une rafale devant un rang de vigne équipé de 9 stations de mesures réparties sur sa longueur

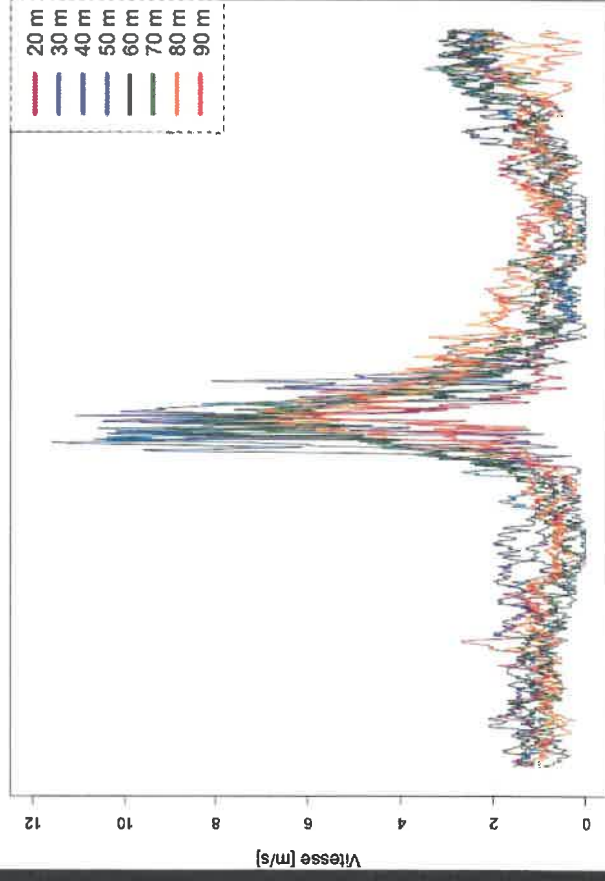


Mesure de vitesse (LCJ) à différente distance de la TAG et à la cime des vignes

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédié l  volution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

Passage d'une rafale devant un rang de vigne  quipp   de 9 stations de mesures réparties sur sa longueur

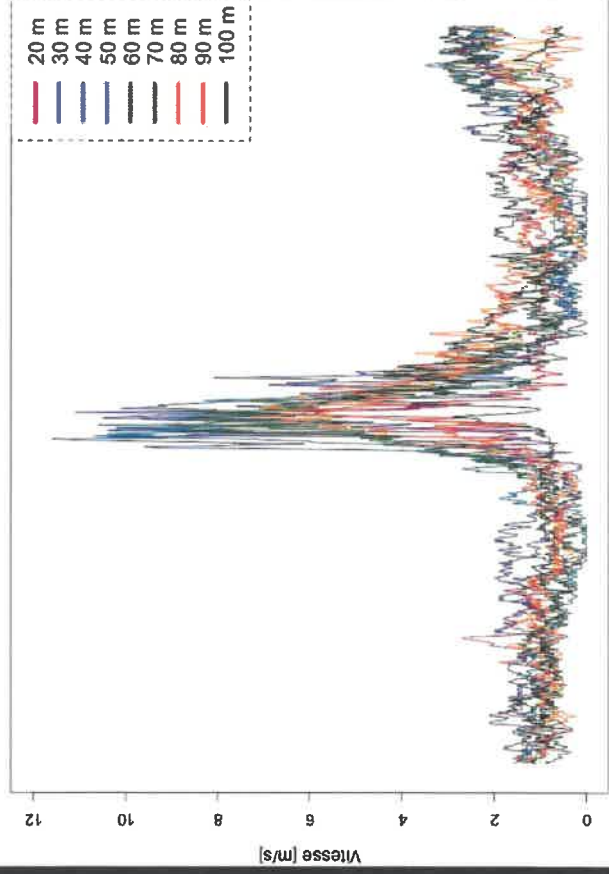


Mesure de vitesse (LCJ)   différente distance de la TAG et   la cime des vignes

Mesures de terrain 2022

Protocole 2 : Dédicé à l'évolution de la stratification verticale en vitesse (pour une TAG)

Passage d'une rafale devant un rang de vigne équipé de 9 stations de mesures réparties sur sa longueur

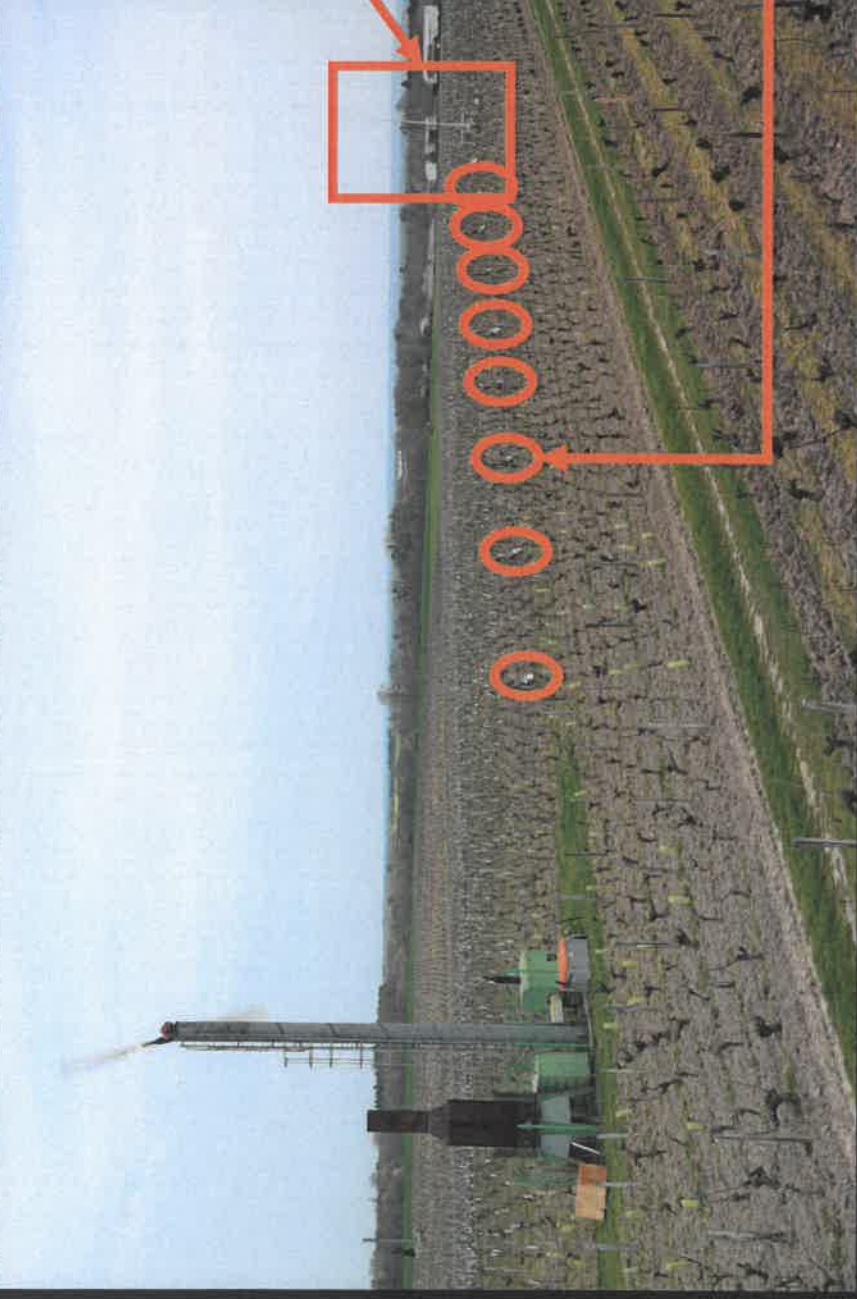


- Vitesse maximale de rafale à 30-50m
 - Vitesse maximale décroissante plus loin
 - Durée de rafale en augmentation avec la distance (durée d'environ 20s)
 - Profil de vitesse asymétrique (front abrupt puis queue plus lente)
 - Passage de la rafale légèrement retardé à mesure que l'on s'éloigne
-
- Zone calme sous 30m
 - Zone d'impact de 30 et 50m
 - Zone de développement au delà de 50m

Mesure de vitesse (LCJ) à différente distance de la TAG et à la cime des vignes

Mesures de terrain 2022

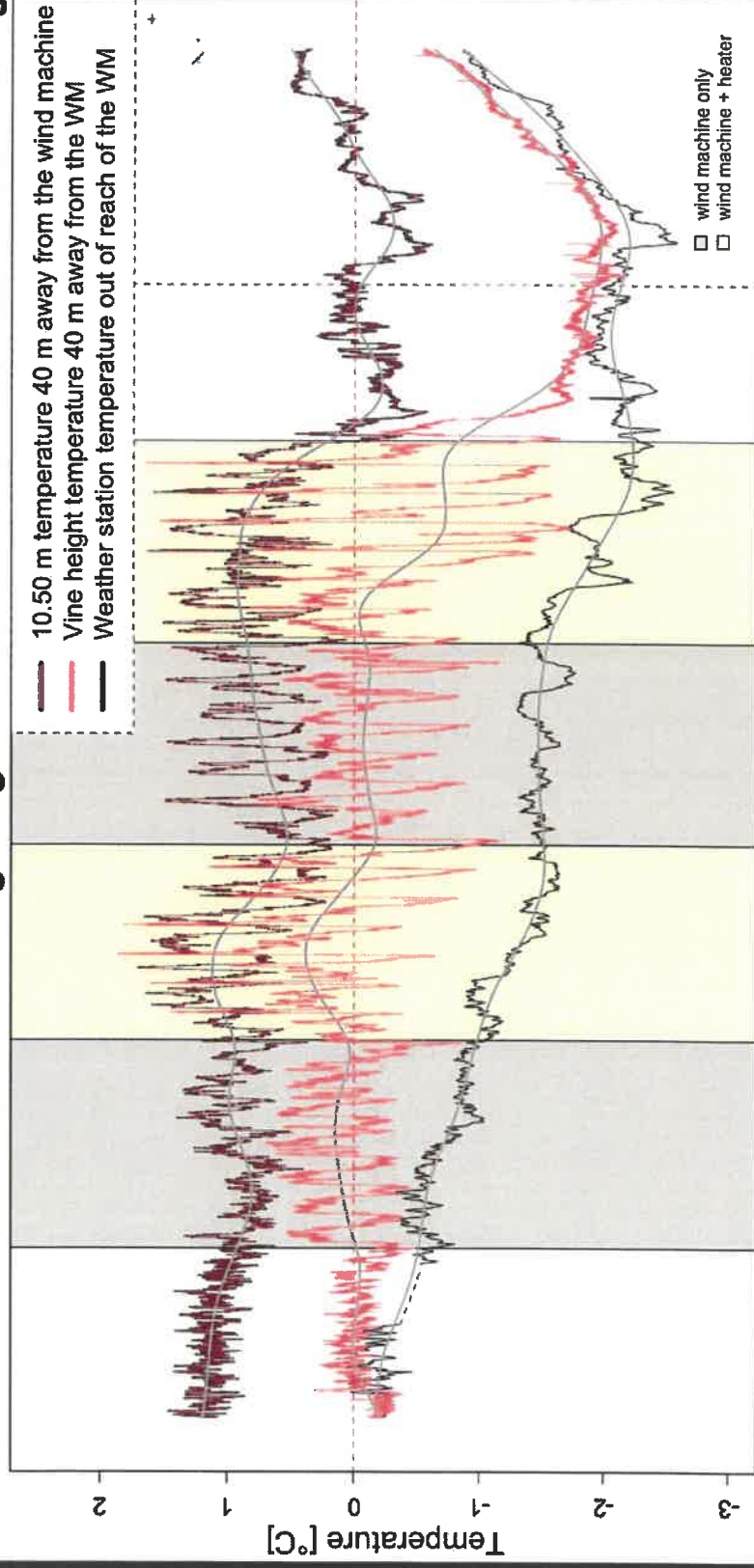
Protocole 3 : Quasi identique au protocole 2, mais statique, sans CSAT3B et répartition variable des stations en réseaux



Mesures de terrain 2022

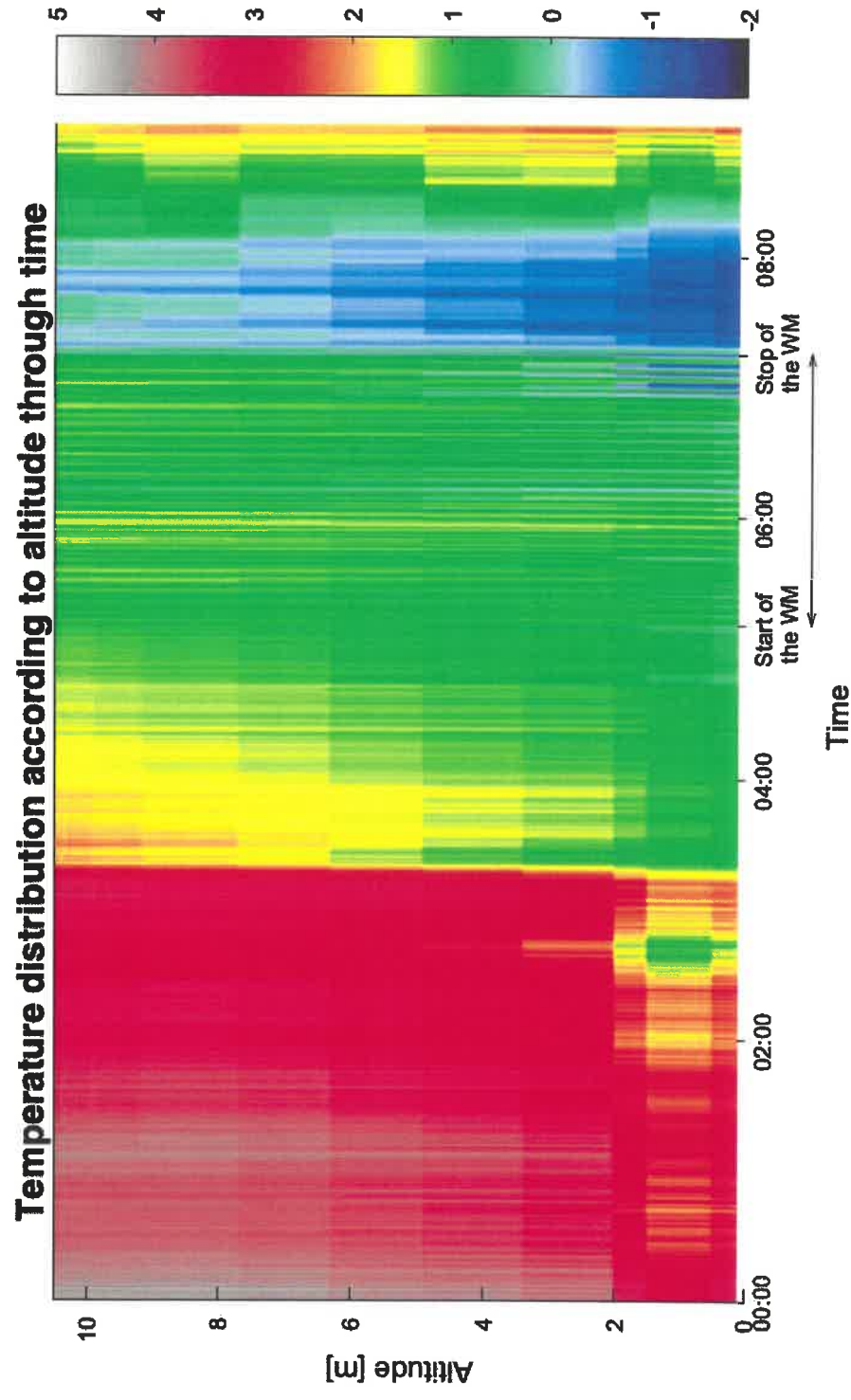
Protocole 3 : Dédié   l'effet TAG, avec ou sans Chauffage, en situation de gel

**Evolution of temperature
40 m from a wind machine during a night of radiative frost with additional heating**



Mesures de terrain 2022

Protocole 3 : Dédié à l'effet TAG, avec ou sans Chauffage, en situation de gel



Conclusions et perspectives campagne 2022

Conclusions

- Mesures validées et riches en enseignement
- Episodes gélifs insuffisants
 - Pour le fonctionnement des TAGs en synergie
 - Pour mieux mesurer et comprendre l'effet du chauffage

Perspectives

- Traiter complètement les données de la campagne 2022
- Compléter avec une campagne 2023
 - avec un focus chauffage et météo
- Simuler numériquement une TAG (Séjour Clara en NZ)

Bonus

Commentaires/réflexions sur :

- Le jet rond dans un repère tournant
- L'hélice
- La puissance de chauffage TAG/chaudière
- Le transfert thermique au niveau du bourgeons (à faire)

Jet rond dans un repère tournant : Modèle simplifié

Un jet se caractérise entièrement par ses flux initiaux :

- de masse Q_o ;
- de quantité de mouvement M_o ;
- de flottabilité F_o .

Dans un environnement au repos de même densité :

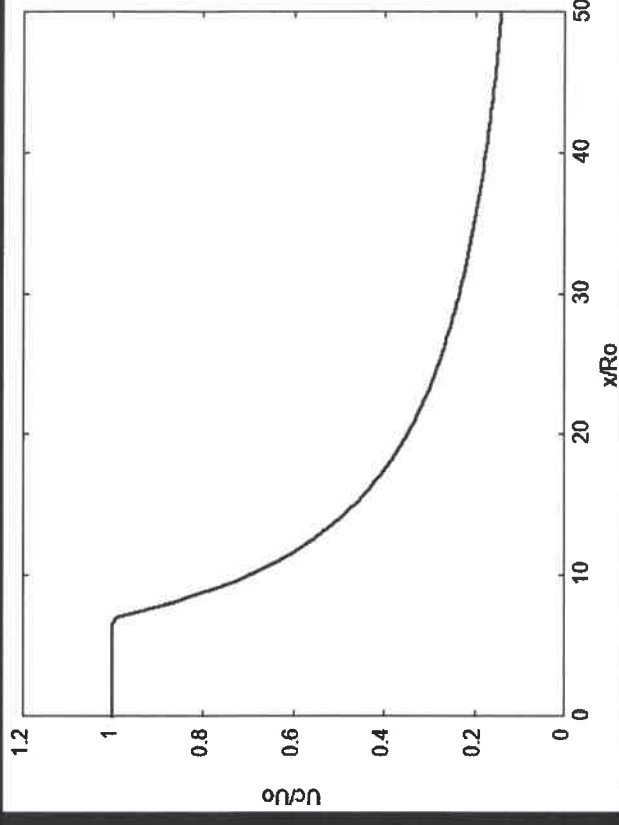
- le flux de quantité de mouvement $M(x) = M_o$ se conserve;
- le débit $Q(x)$ augmente par entrainement de son environnement.

Pour un jet rond, Lee et Chu [1] donnent :

$$\begin{cases} Q = \pi U_c b^2 \\ M_o = \frac{\pi}{2} U_c^2 b^2 \end{cases}$$

avec :

- $U_c(x) = 7M_o^{1/2} x^{-1}$, la vitesse maximale du jet sur son axe ;
- $b(x) = 0.114x$, le diamètre du jet.



Modèle adimensionné de l'évolution du jet :
décroissance de la vitesse sur l'axe

Jet rond dans un repère tournant : Modèle simplifié

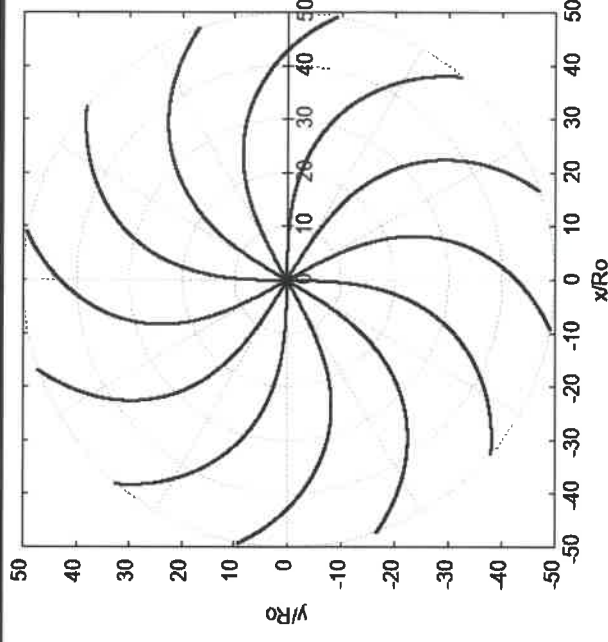
En considérant un jet rond se développant dans un repère tournant à la vitesse ω , on peut déduire un modèle simple de la forme spirale du jet par effet de rotation.

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 ω :

$$\begin{cases} x(t) = r(t) \cos(2\pi\omega t) \\ y(t) = r(t) \sin(2\pi\omega t) \end{cases}$$

avec

$$\begin{cases} \frac{r(t)}{R_o} = t \text{ si } t \leq a \\ \frac{r(t)}{R_o} = \sqrt{a\omega(2t - a\omega)} \text{ si } t > a \end{cases}$$



Modèle adimensionné de l'évolution du jet :
courbure du jet

Puissance de chauffage TAG/chaudière

Volume d'air considéré pour la protection:

$$V_c = \pi H R^2$$

avec:

- R, la « portée » de la tour
- H, la hauteur de « protection »

Soit $V_c \cong 100\,000\text{m}^3$ avec $R = 100\text{m}$ et $H = 3\text{m}$.

Volume d'air soufflé par heure de TAG:

$$V_{TAG} = 3600 * Q_v$$

avec Q_v , débit volumique en m^3/s .

Soit $V_{TAG} \cong 1\,440\,000\text{m}^3$ avec $Q_v \cong 400\text{m}^3/\text{s}$.

Taux de renouvellement par heure:

$$\tau_h = \frac{1}{3600} \frac{V_c}{Q_v}$$

Soit $\tau_h = 14.4$

Taux de renouvellement par période de rotation de TAG:

$$\tau_T = \frac{1}{T_{TAG}} \frac{V_c}{Q_v}$$

Soit $\tau_T \cong 1$ avec $T_{TAG} = 4'30$,

Calcul de puissance calorifique de la TAG

$$P = \rho \cdot Q \cdot C_p \cdot \Delta T$$

avec :

- P, puissance de chauffage en W ;
- ρ , Masse volumique en kg/m^3 ;
- C_p , chaleur spécifique en $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$;
- Q_v , débit volumique en m^3/s ;
- ΔT , écart de température en K ou °C.

Pour $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ et $Q_v \cong 400\text{m}^3/\text{s}$, on obtient :

$$P_{TAG} \cong 500\text{kW}$$

Calcul de puissance calorifique la chaudière

1l de fioul correspond à 10.4kWh

Pour une consommation de 10l/h, on obtient

$$P_{chaudière} \cong 100\text{kWh}$$

Avec cette puissance, on peut élever en 1 heure la température du volume d'air considéré V_c de :

$$\Delta T \cong 2.7\text{K} \quad (E = \rho \cdot V_c \cdot C_p \cdot \Delta T)$$

Hélice : analogie avec le système vis-écrou

Le filetage métrique

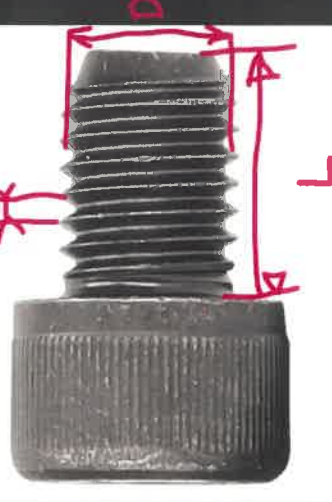
Format d'identification: MDiamètre(xPas(xLongueur))
avec le pas, la distance parcourue par l'écrou pour un tour de vis

Exemple : M12x1.75x27

- Diamètre=12mm
- Pas=1.75mm
- Longueur=27mm

➔ A chaque tour de vis, l'écrou se déplace d'un pas de 1.75mm

M12x1.75x27



Hélice : analogie avec le système vis-écrou

- En négligeant les frottements
- Pour un tour de vis

Travail exercé côté écrou

$$Travail_{écrou} = Force_{écrou} \cdot Pas$$

Travail exercé côté vis

$$Travail_{vis} = Force_{vis} \cdot \pi \cdot Diametre_{vis}$$

or

$$Couple_{vis} = Force_{vis} \frac{Diametre_{vis}}{2}$$

Donc

$$Travail_{vis} = 2\pi \cdot Couple_{vis}$$



Rendement (=1 car frottements négligés)

$$\eta = \frac{Force_{écrou}}{Couple_{vis}} \cdot \frac{Pas}{2\pi}$$

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{Force_{écrou}}{Couple_{vis}} \cdot \frac{VitesseTranslation_{écrou}}{VitesseRotation_{vis}}$$

Relation entre le couple exercé sur la vis et la force résultante sur l'écrou

$$Force_{écrou} = \eta \frac{2\pi}{Pas} Couple_{vis}$$

→ Transformation d'un couple en force

Hélice : sa fonction

- Hélice de traction ou de propulsion (ex : aviation ou ventilation)
 - ➔ elle transforme le couple d'un moteur en une force en s'appuyant sur le fluide
- Hélice de captage (ex : production électrique)
 - ➔ elle transforme les efforts du fluide en un couple moteur

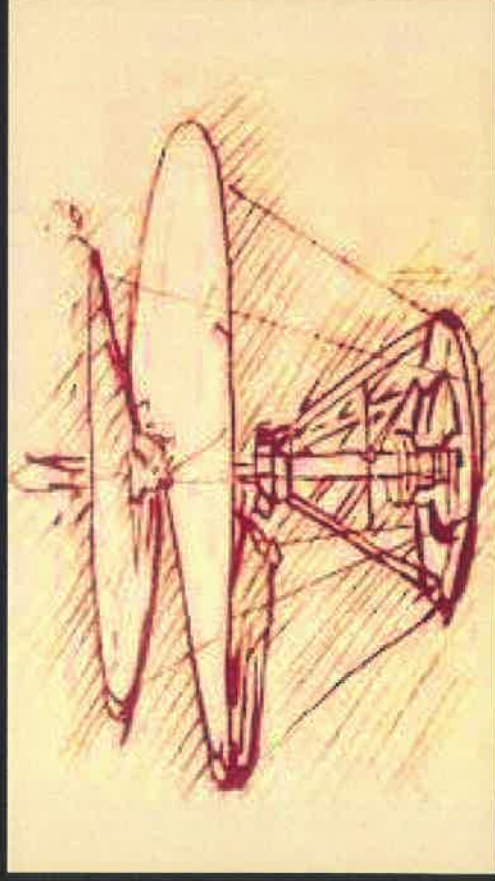
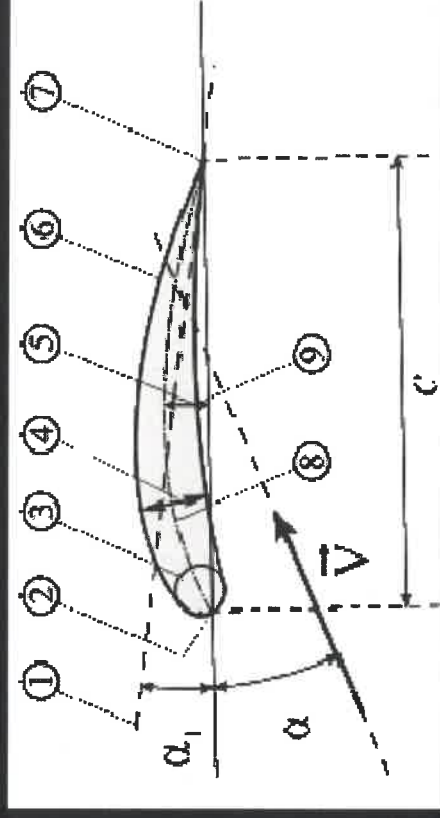
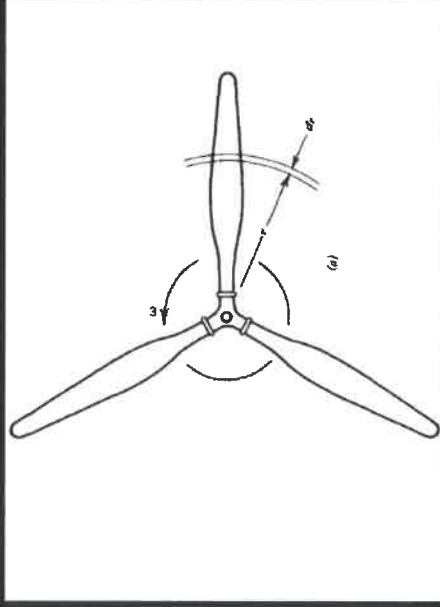


Illustration de la vis aérienne (Léonard de Vinci)

La machine lévite car son poids est compensé par une poussée (de bas en haut) provenant du couple appliqué par le pilote à la vis aérienne

Hélice : théorie de l'élément de pale



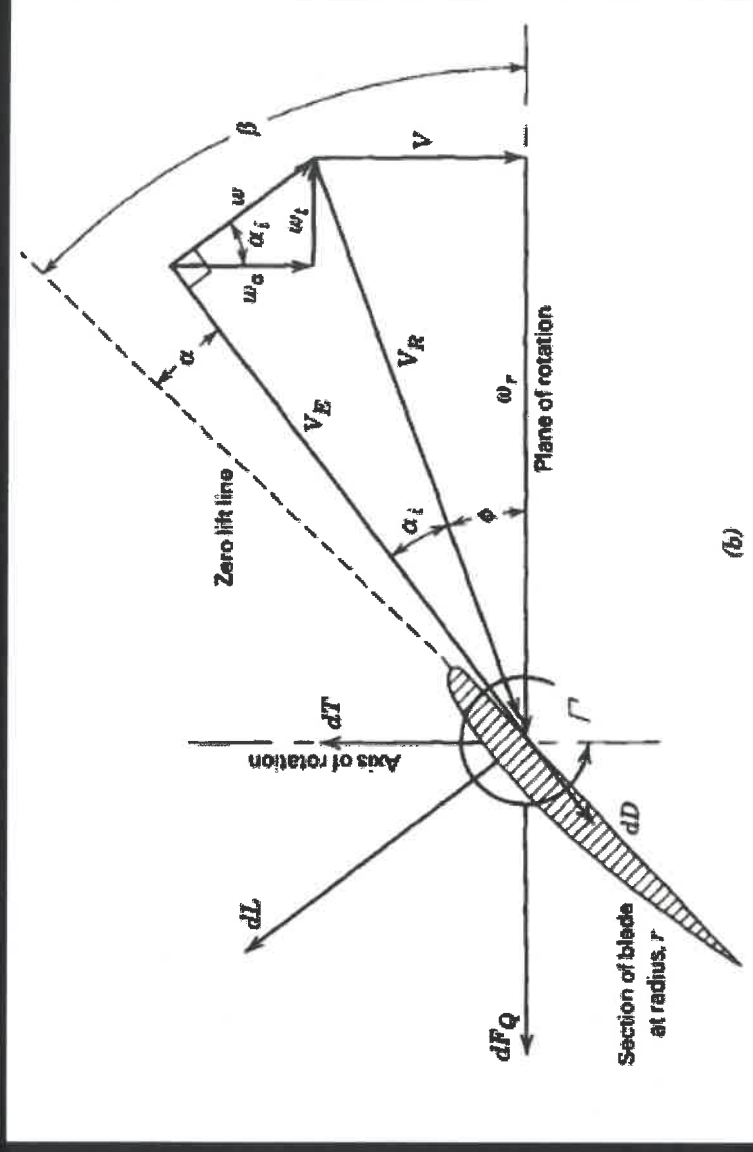
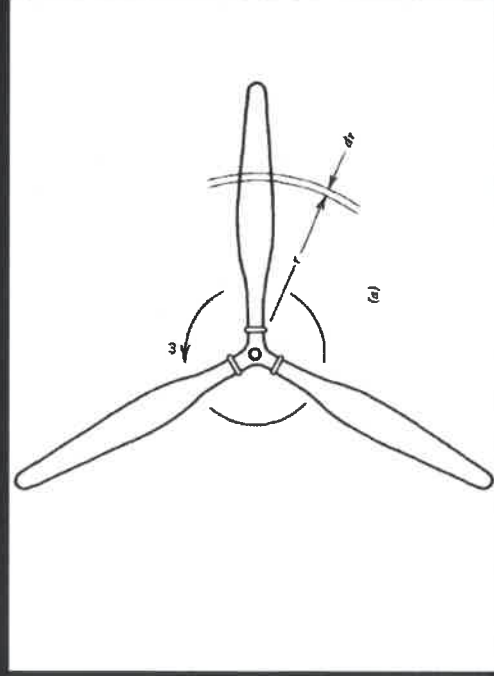
Caractéristiques générales de l'hélice

- Nombre de pales
- Diamètre des pales
- Diamètre du moyeu
- Pas géométrique
- Fraction surfacique
- Géométrie

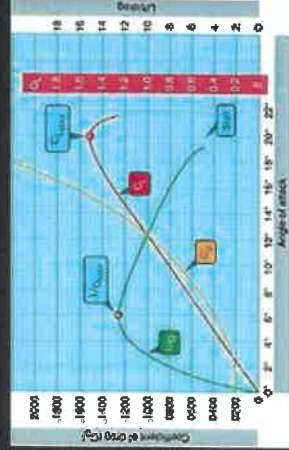
Géométrie (ex : NACA-XXXX)

1. Ligne de portance nulle
2. Bord d'attaque
3. Cylindre du bord d'attaque
4. Épaisseur maximale
5. Cambrure
6. Extrados
7. Bord de fuite
8. Ligne moyenne de cambrure
9. Intrados

Hélice : théorie de l'élément de pale



(a) Hélice à 3 pales et (b) vitesses et forces agissant sur un élément de pale (McCormick, 1995)



- Pas de l'hélice : $P = 2\pi r \tan \beta$
- Portance dL et traînée dD
- Poussée dT et couple dC
- Vitesse air axiale V , tangential ω_r et résultante V_E
- Vitesse résultante avec écoulement induit V_E
- Angle d'incidence $\alpha = \beta - \theta - \alpha_i$

Portance et Poussée en fonction de l'angle α

Hélice : théorie de Rankine-Froude

Bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie :

- Débit $Q = \rho A C$
- Poussée $T = Q(C_s - C_u)$
- Puissance $P_f = \frac{1}{2} Q(C_s^2 - C_u^2)$

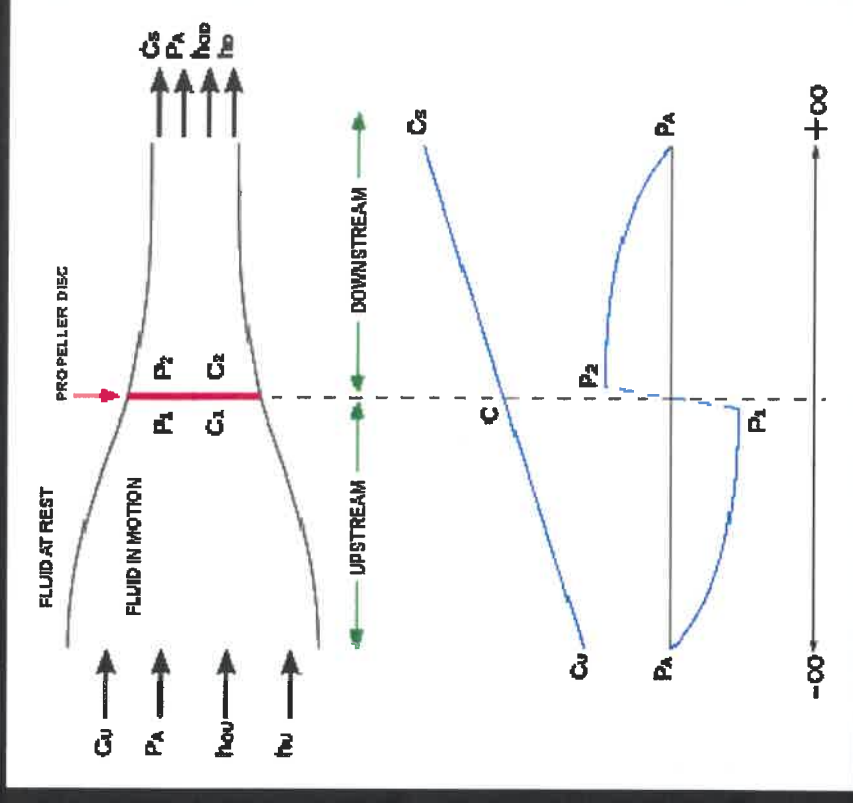
Disque actionneur

- Poussée $T = A \Delta P$
- Puissance $P_f = T C$

→ Vitesse induite $C - C_u$ avec $C = \frac{1}{2}(C_s + C_u)$

Rendement $\eta = \frac{P_u}{P_f}$

→ Pour un avion : $P_u = T C_u$ et $\eta = \frac{2}{1 + \frac{C_s}{C_u}}$



Variation de vitesse et de pression à travers de part et d'autre du plan de l'hélice

Transfert thermique au niveau du bourgeon

Flux thermique ϕ en W

$$\phi = U \cdot S \cdot \Delta T$$

avec :

- U , le coefficient de transfert thermique en $W \cdot m^{-2} K^{-1}$;
- S , la surface d'échange en m^2 ;
- ΔT , l'écart de température en K ou $^{\circ}C$.

Coefficient de transfert thermique U en $W \cdot m^{-2} K^{-1}$

$$U = Nu \frac{\lambda}{L_c}$$

avec :

- Nu , Nombre de Nusselt;
- L_c , une longueur caractéristique en m ;
- λ , la conductivité thermique du fluide en $W \cdot m^{-1} K^{-1}$

Nombre de Nusselt

en convection forcée

$$Nu = f(Re, Pr) \text{ en convection naturelle}$$

avec :

- Re , Nombre de Reynolds;
- Pr , nombre de Prandtl;
- Gr , nombre de Grashof.

Exemple de corrélation : le transfert thermique dans le cas d'un écoulement autour d'une sphère cylindre

Nombre de Nusselt $Nu = f(Re, Pr)$ en convection forcée

→ Whitaker corrélation

La longueur caractéristique L_c est le diamètre de la sphère D

