

MODÉLISATION DU CHAMP DE VITESSE EN AMONT D'UNE TURBINE À AXE HORIZONTAL

Philippe Druault, [Jean-François Krawczynski](#) (d'Alembert UMR 7190, SU)
Collaboration : Grégory Germain (IFREMER)

jean-francois.krawczynski@sorbonne-universite.fr, 2024

Production d'énergie, dimensionnement, fatigue structurelle (durée de vie) [1/3]

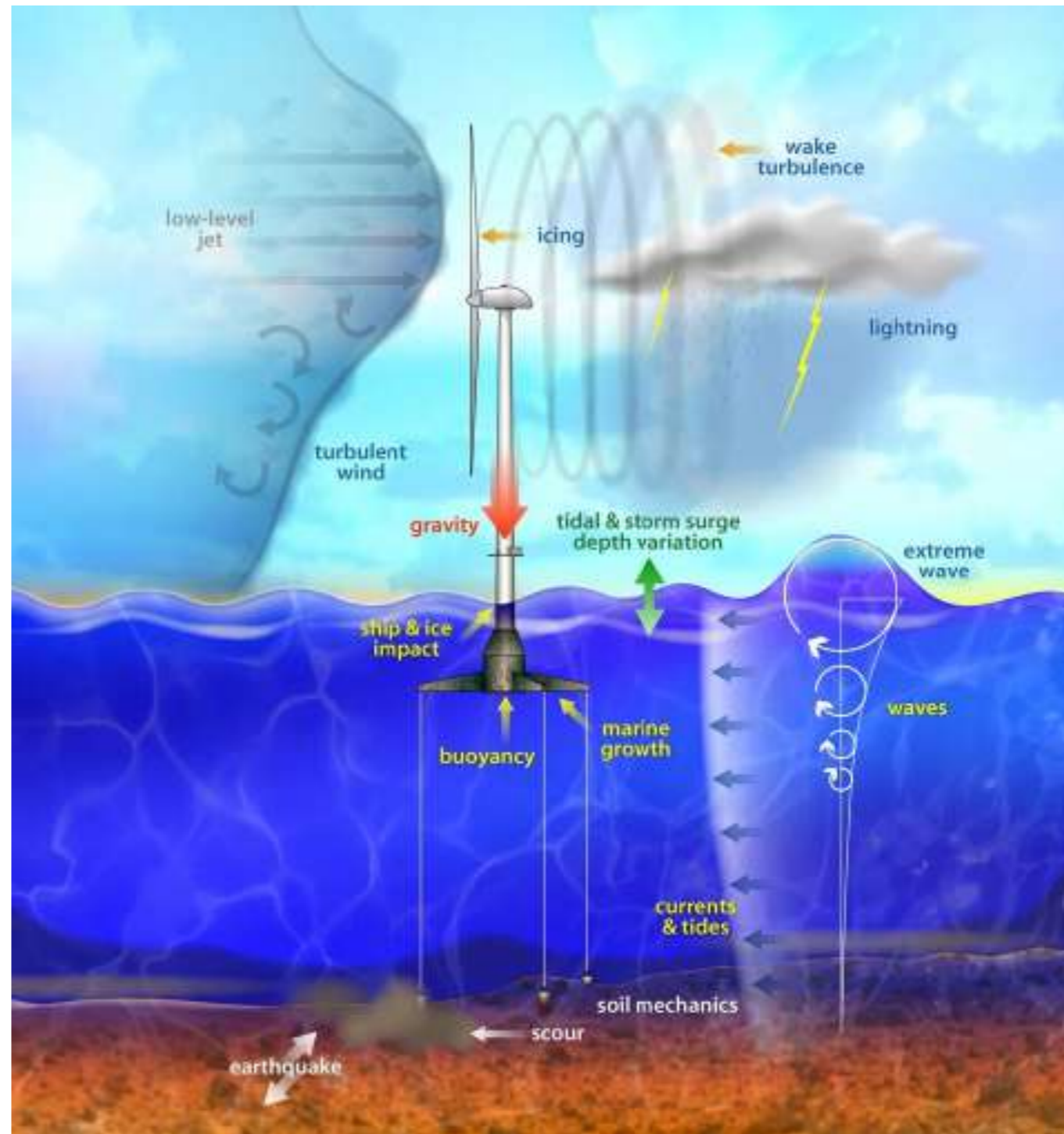
Des influences multi-physiques variées

Puissance instantanée d'une éolienne :

$$P(t) = \bar{P} + P'(t) < \frac{1}{2} \eta_{\text{Betz}} \rho A V_{\text{vent}}^3$$

Influences multi-physiques :

- Vent (événements discrets, turbulence)
- Aérodynamique (rotation, sillage, décrochage)
- Structure (gravité/inertie, élasticité, fondations, ancrage)
- Vagues (régulières, irrégulières)



Source : NREL

Production d'énergie, dimensionnement, fatigue structurelle (durée de vie) [2/3]

Similitude Eolienne / Hydrolienne

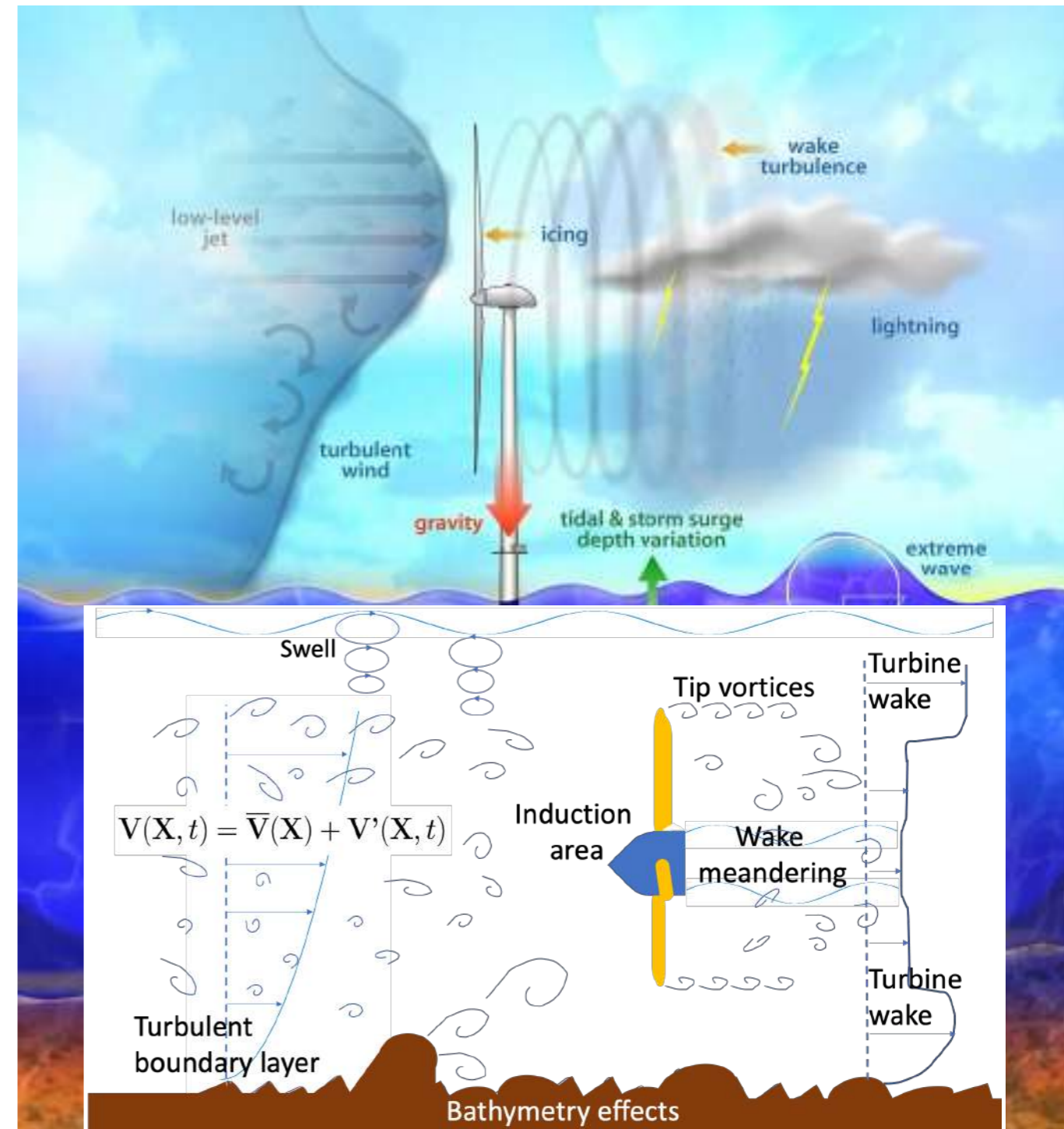
Puissance instantanée d'une éolienne :

$$P(t) = \bar{P} + P'(t) < \frac{1}{2} \eta_{\text{Betz}} \rho A V_{\text{vent}}^3$$

Influences multi-physiques :

- Vent (événements discrets, turbulence)
- Aérodynamique (rotation, sillage, décrochage)
- Structure (gravité/inertie, élasticité, fondations, ancrage)
- Vagues (régulières, irrégulières)

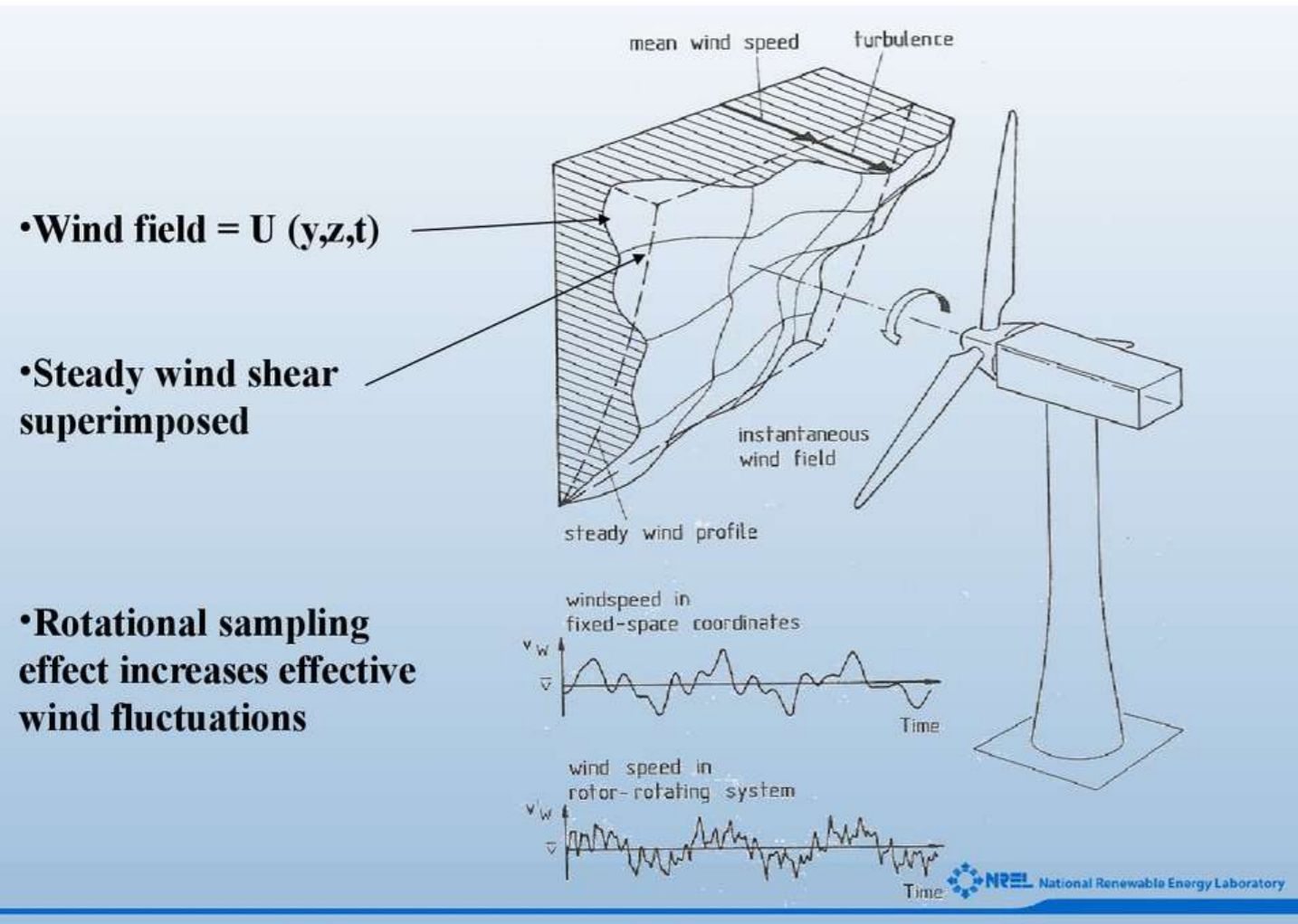
⇒ Objectifs : mieux comprendre comment l'écoulement est perturbé en amont d'une turbine en fonctionnement



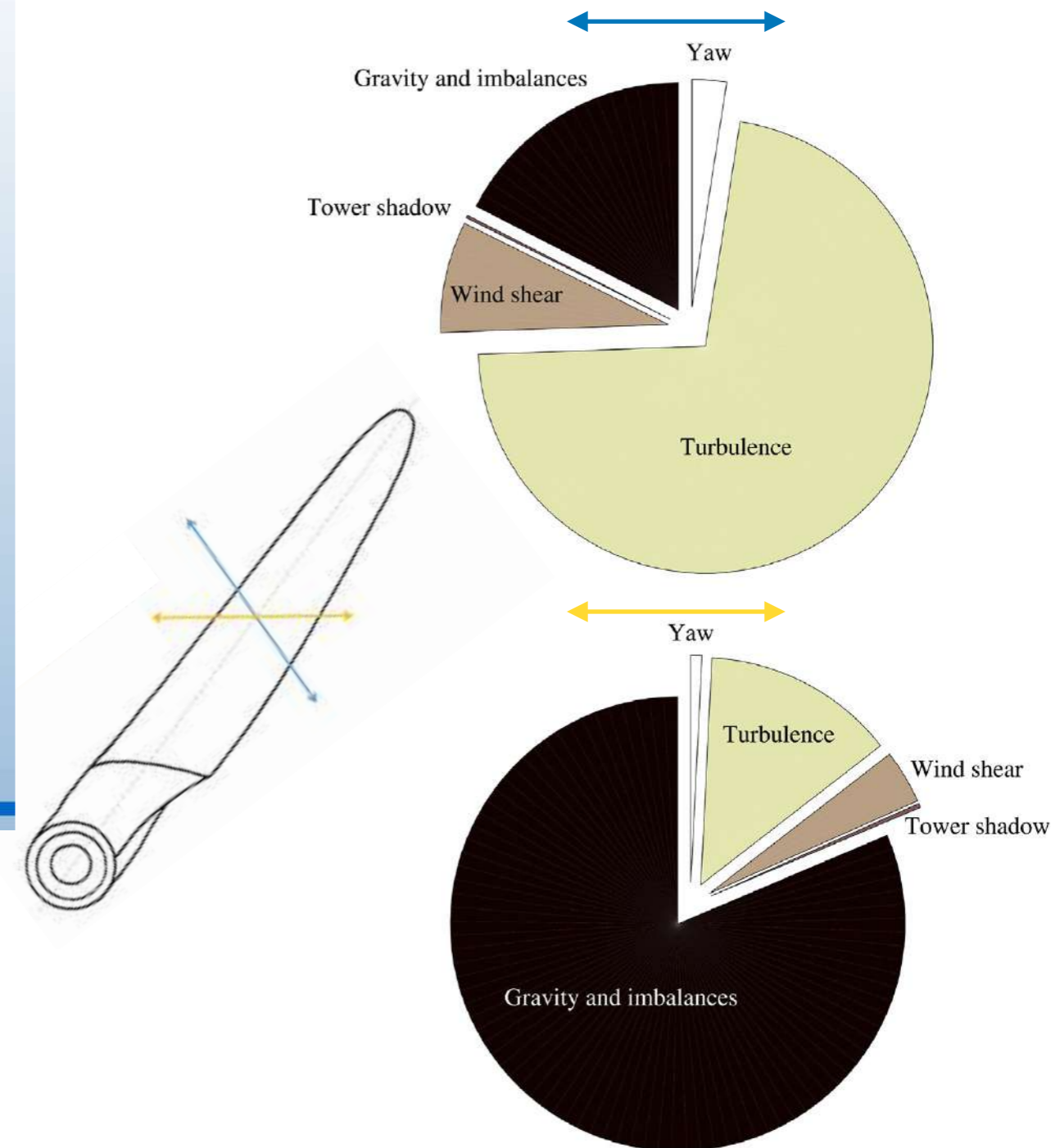
Source : NREL

Production d'énergie, dimensionnement, fatigue structurelle (durée de vie) [3/3]

Influence des inhomogénéités / instationnarités sur le chargement dynamique



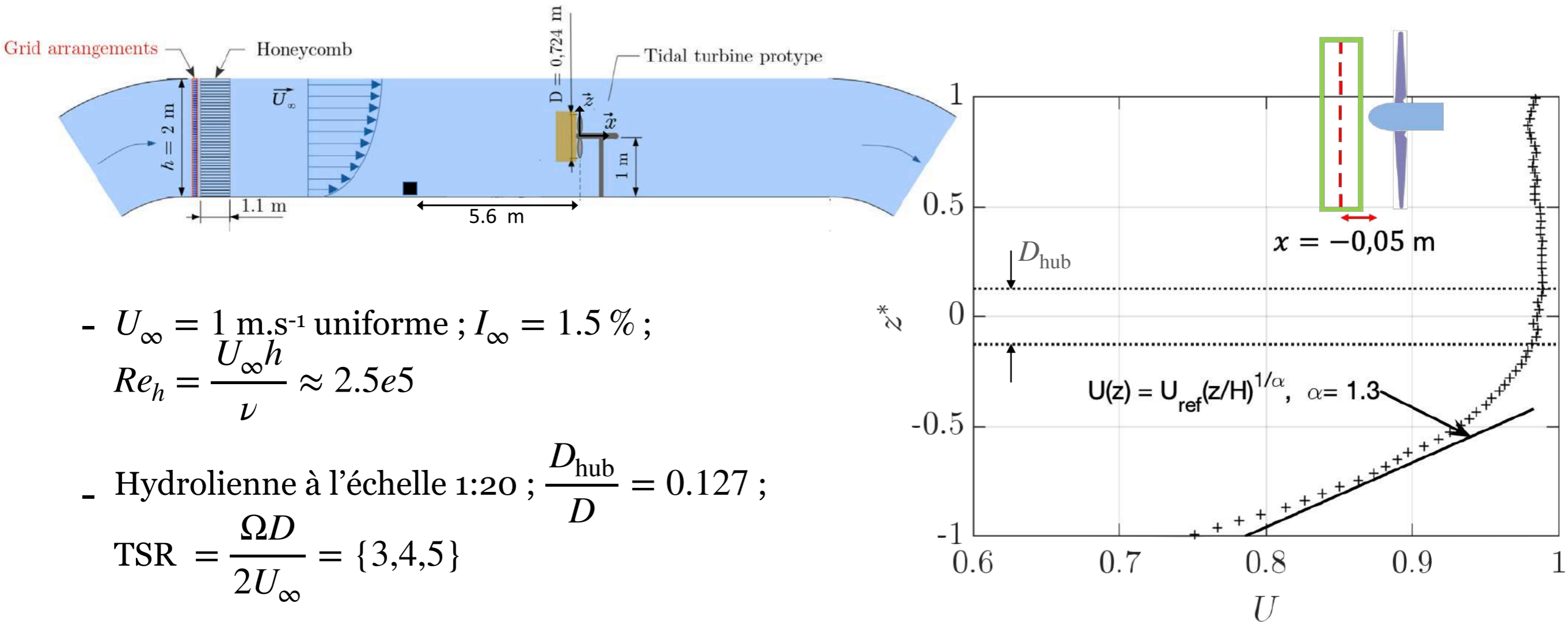
⇒ Objectifs à plus long terme :
augmenter la durée de vie des turbines
et leurs performances



Caractérisation expérimentale

Bassin à recirculation de l'IFREMER

Objectif de l'expérience : reproduire des courants marins (cisaillement + turbulence) observés en Manche



- $U_\infty = 1 \text{ m.s}^{-1}$ uniforme ; $I_\infty = 1.5 \%$;

$$Re_h = \frac{U_\infty h}{\nu} \approx 2.5e5$$

- Hydrolienne à l'échelle 1:20 ; $\frac{D_{\text{hub}}}{D} = 0.127$;

$$TSR = \frac{\Omega D}{2U_\infty} = \{3,4,5\}$$

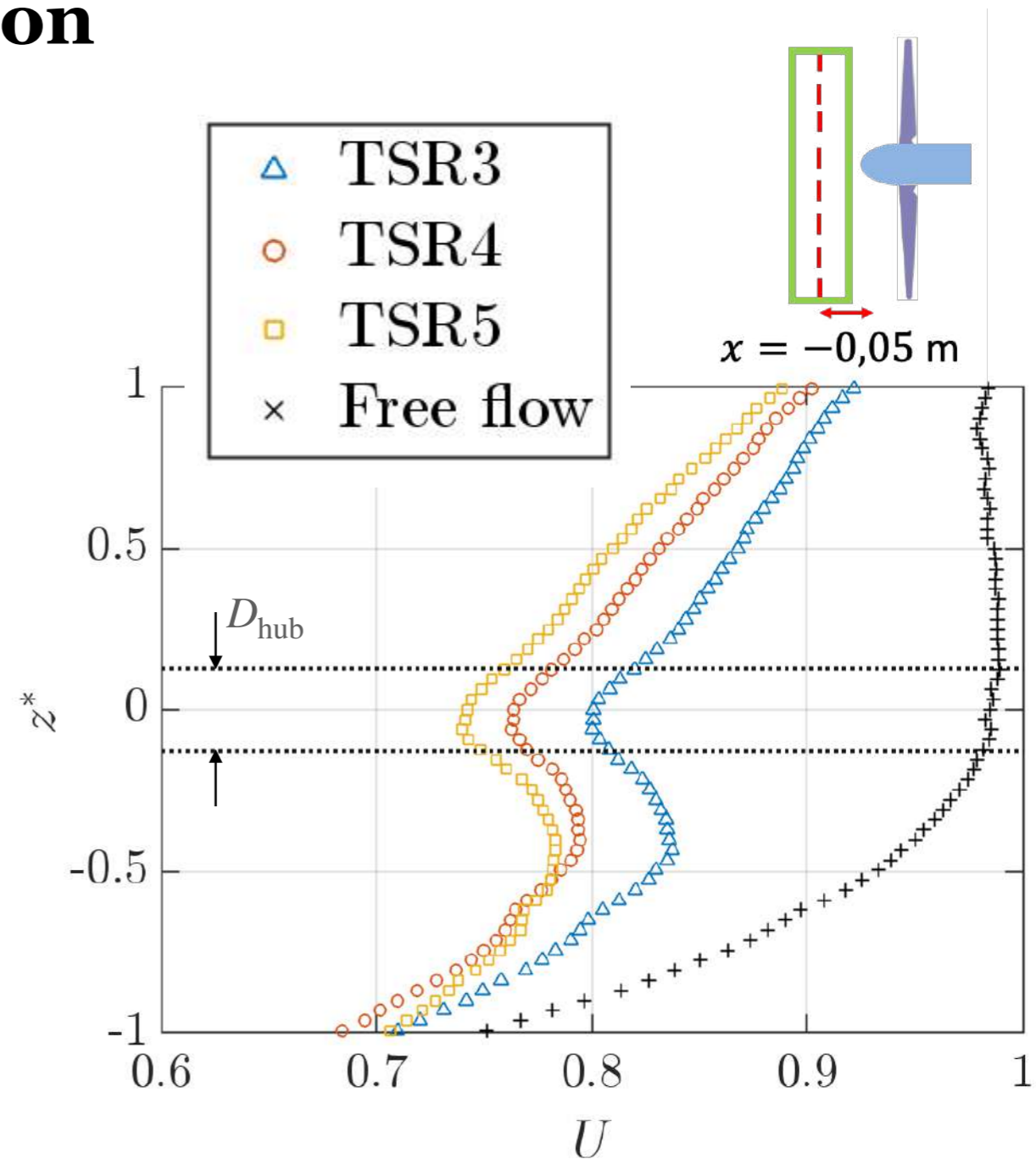
Mesures simultanées du champ de vitesse par PIV et de la poussée $C_T = \frac{\vec{T} \cdot \vec{x}}{1/2\rho\pi R^2 U_{\text{ref}}}$

Effet de l'induction sur le profil cisailé

Influence de la vitesse de rotation

$$\text{TSR} = \frac{\Omega D}{2U_\infty} = \{3,4,5\}; \text{ Free : } \text{écoulement sans turbine}$$

- ▶ Blocage proportionnel à la vitesse de rotation mais,
- ▶ Invariance des profils
- ▶ Déficit le plus fort sur l'axe du hub
- ▶ Asymétrie en présence de cisaillement



Modélisation de l'induction axiale

Modèle auto-similaire : comparaison avec les expériences

- Modèle auto-similaire^(a) de blocage induit par le rotor :

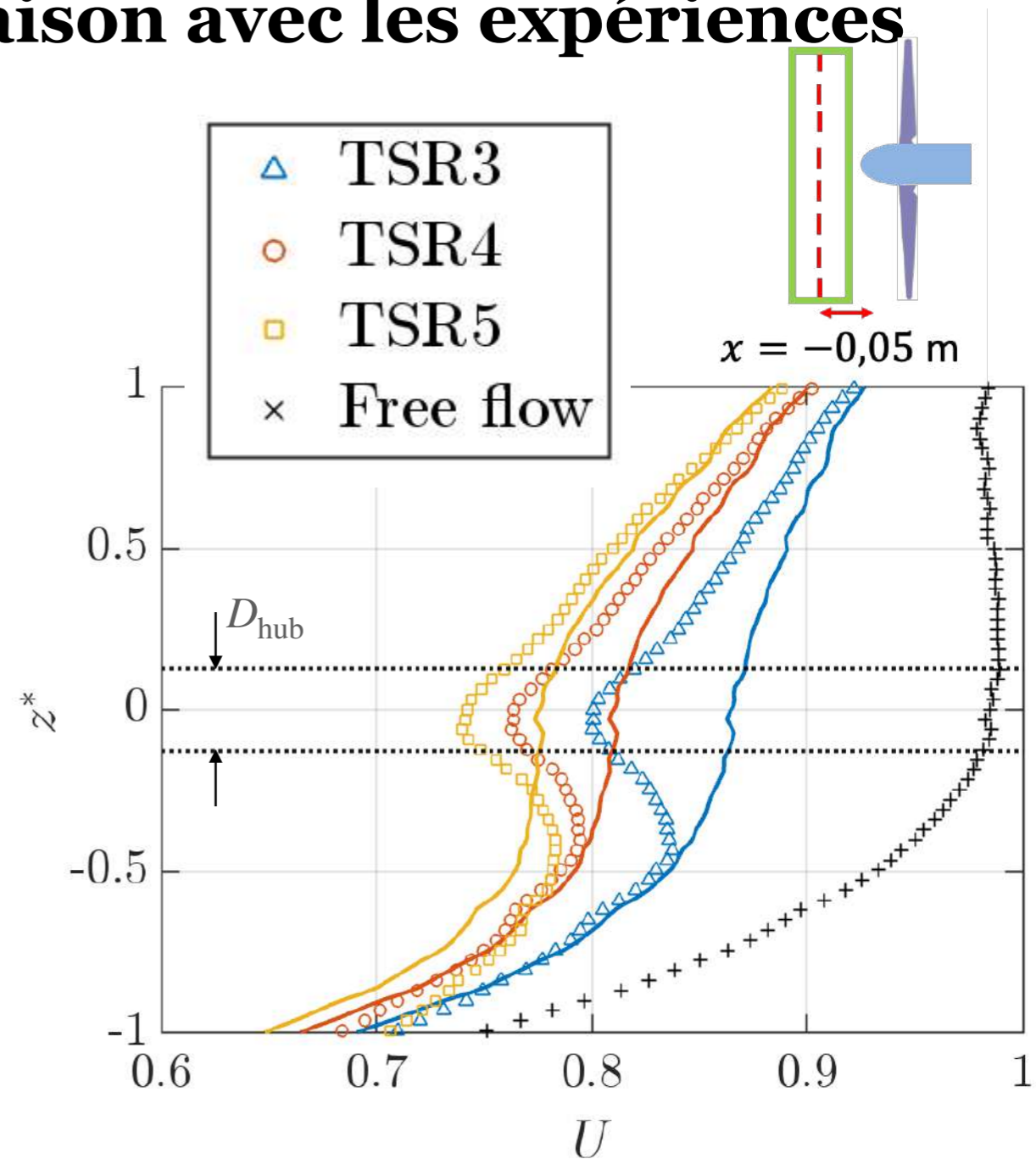
$$U(x, r) = U_{\text{free}}(x, r) - \frac{\langle U \rangle}{U_{\infty}} U_b(x, r)$$

avec,

$$U_b(x, r) = 1 - a(0, x) f(\epsilon), \quad \epsilon = \frac{r}{r_{1/2}(x)}$$

- Ecart les plus importants observés dans la région $|z^*| < D_{\text{hub}}/2$
- Le déficit de vitesse est en revanche très bien capturé pour $|z^*| \gg D_{\text{hub}}/2$

⇒ Nécessité de modéliser le blocage du hub avec un terme additionnel



(a) Troldborg & Meyer Forsting / Wind Energy 20 (2017)
Druault et al. / Renewable Energy 224 (2024)

Modélisation de l'induction axiale

Modèle hybride : comparaison avec les expériences

- Couplage du modèle auto-similaire^(a) avec un modèle de blocage du hub^(b) :

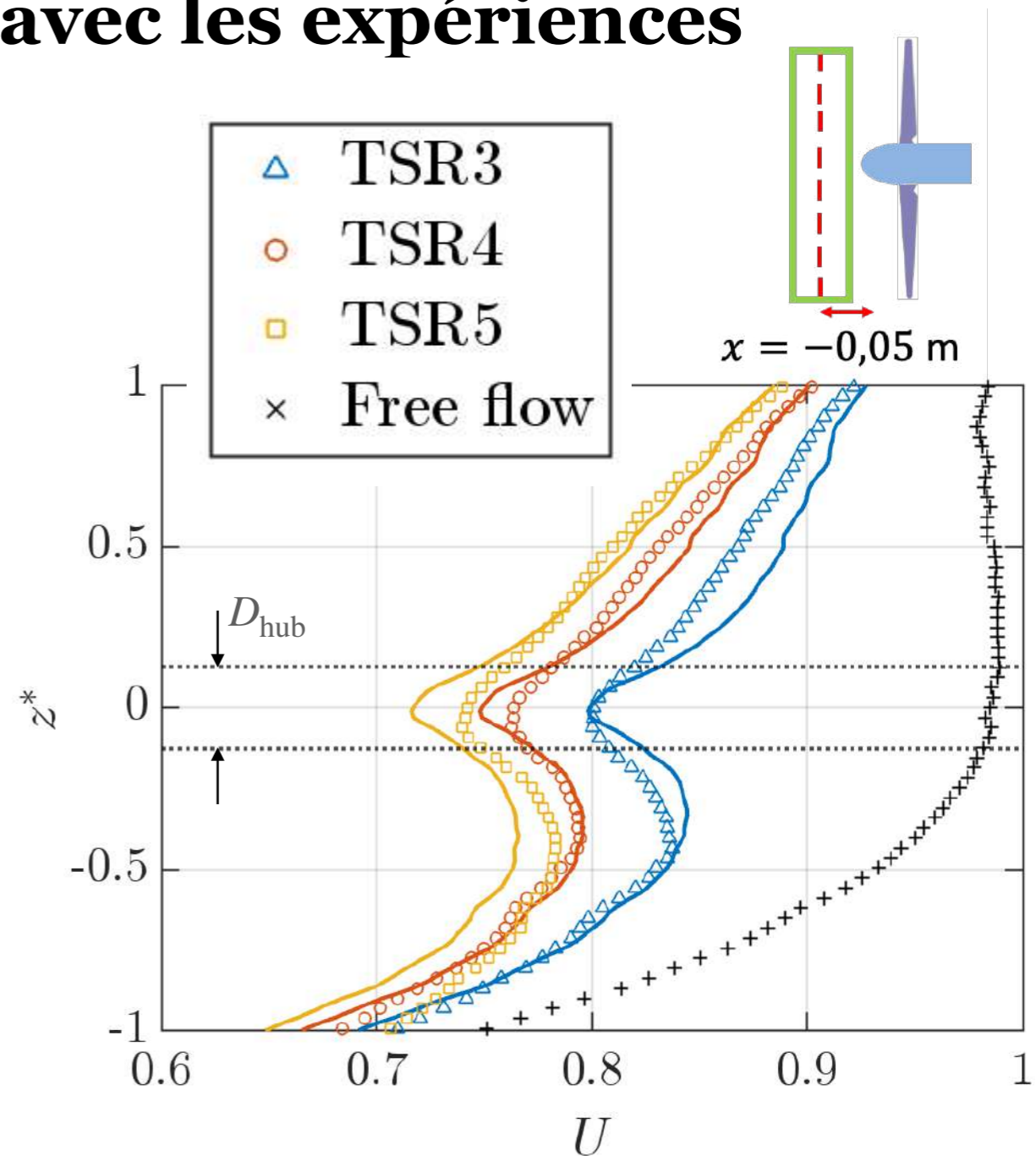
$$U(x, r) = U_{\text{free}}(x, r) - \frac{\langle U \rangle}{U_{\infty}} U_b(x, r) - U_{\text{hub}}(x, r)$$

avec, $U_{\text{hub}}(x, r) = -\nabla \phi$, ϕ
potentiel des vitesses

- Erreurs

$$\left| \frac{U(x, r) - U_{\text{mes}}}{U_{\text{mes}}} \right| < 3\%$$

- Ecartés liés à la prise en compte de coefficients de poussée C_T globaux ?



^(a) Troldborg & Meyer Forsting / Wind Energy 20 (2017)

^(b) Anderson et al. / J. Phys.: Conf. Series 1618 (2020)

Jouenne et al. / Ocean Engineering 268 (2023)

Druault et al. / Renewable Energy 224 (2024)

Conclusions // Perspectives

Analyse et modélisation des effets de l'induction d'une turbine

- ▶ Capable de déterminer les changements induits sur le champ de vitesse moyenne en fonction : (a) de la vitesse de rotation de la turbine, (b) de la nature du profil de vitesse axiale cisailé

- ▶ Pour des turbines à large $\frac{D_{\text{hub}}}{D}$: prise en compte séparée du hub par un terme additionnel de déficit de vitesse

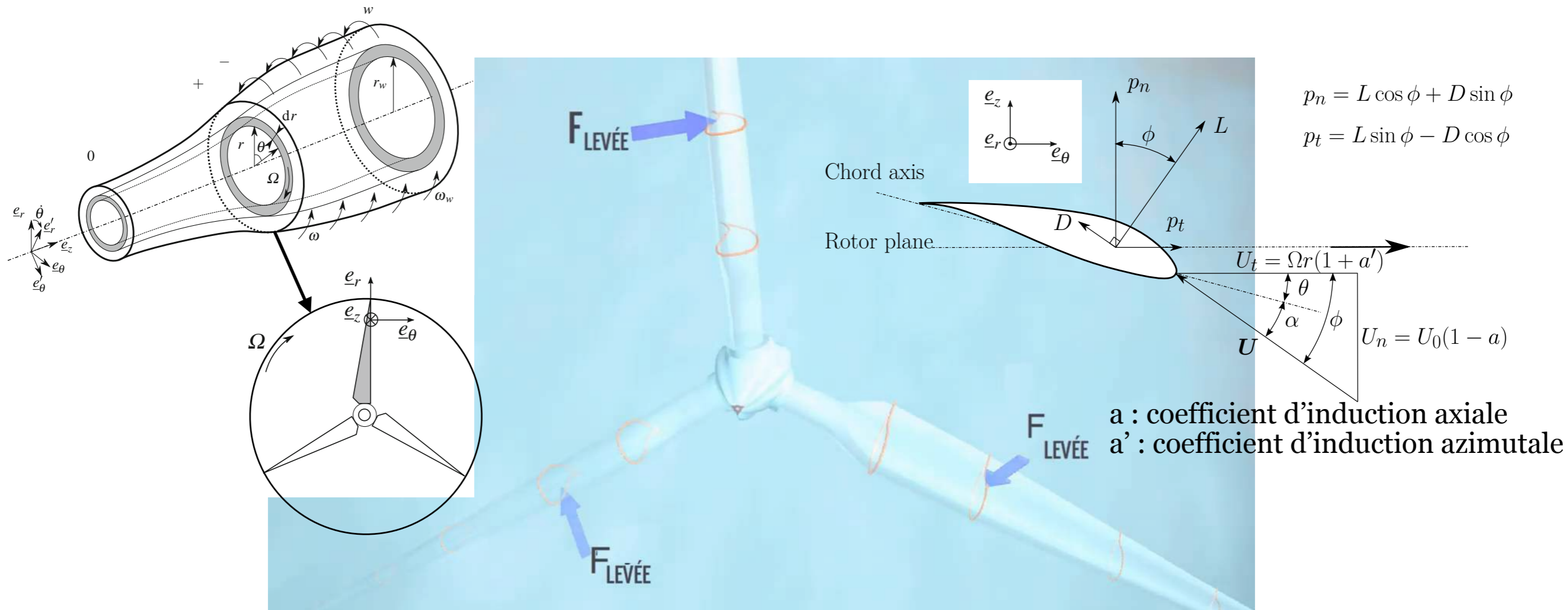
//

- ▶ Prise en compte de coefficients de poussée locaux ?

Conclusions // Perspectives

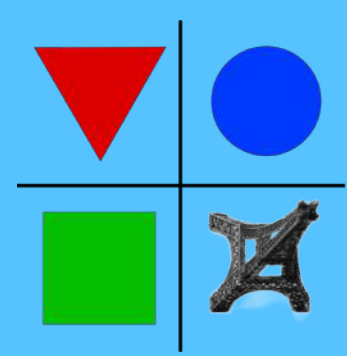
Estimation des efforts locaux

BEM = conservation de la quantité de mouvement (MT \equiv PFD) + théorie de la pale (BET)



Hypothèses fortes : écoulement incompressible et axisymétrique, fluide homogène et non visqueux, charges axisymétriques sur un disque actionneur, etc.

Sensibilité à la détermination de l'angle d'attaque \equiv à la vitesse relative incidente



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

A. Rezaeiha et al. / Renewable Energy 114 (2017)
Troldborg & Meyer Forsting / Wind Energy 20 (2017)
Anderson et al. / J. Phys.: Conf. Series 1618 (2020)
Jouenne, Druault, Krawczynski & Germain / Ocean Engineering 268 (2023)
Druault, Krawczynski, Çan & Germain / Renewable Energy 224 (2024)

jean-francois.krawczynski@sorbonne-universite.fr, 2024

Expertise : Développement d'outils d'analyse et modélisation des champs de vitesse (expériences ou simulations numériques) et des efforts exercés sur la turbine