



ONERA

Décomposition « champ lointain » du couple d'un rotor d'hélicoptère en vol stationnaire

Simon VERLEY
19 décembre 2012

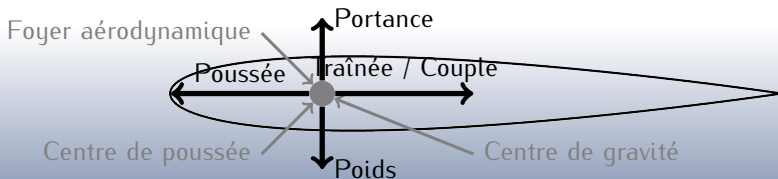
Soutenance en vue de l'obtention du grade de docteur de l'université
d'Orléans



Définition du couple

Définition

Le **couple rotor** est le couple qui s'oppose à la rotation du corps en mouvement





L'approche « champ proche »

- Méthode directe : intégration sur l'interface corps/fluide
 - utilisation de grandeur géométrique (normale à la paroi)
 - utilisation de grandeur accessible depuis la simulation (pression, tenseur de cisaillement)
- Décomposition mécanique :
 - traînée/couple de pression (efforts normaux)
 - traînée/couple de frottement \neq traînée/couple visqueux (efforts tangents)
- Souvent comparable, associé aux essais en soufflerie



L'approche « champ proche »

- Méthode directe : intégration sur l'interface corps/fluide
 - utilisation de grandeur géométrique (normale à la paroi)
 - utilisation de grandeur accessible depuis la simulation (pression, tenseur de cisaillement)
- Décomposition mécanique :
 - traînée/couple de pression (efforts normaux)
 - traînée/couple de frottement \neq traînée/couple visqueux (efforts tangents)
- Souvent comparable, sinon aux essais en soufflerie



L'approche « champ proche »

- Méthode directe : intégration sur l'interface corps/fluide
 - utilisation de grandeur géométrique (normale à la paroi)
 - utilisation de grandeur accessible depuis la simulation (pression, tenseur de cisaillement)
- Décomposition mécanique :
 - traînée/couple de pression (efforts normaux)
 - traînée/couple de frottement \neq traînée/couple visqueux (efforts tangents)
- Souvent comparable aisément aux essais en soufflerie



Couple « champ proche »

Définition

Le couple obtenu par une décomposition mécanique est appelé **couple « champ proche »**. Il mesure « l'effet du fluide sur le corps ».

$$C = C_p + C_f$$

- ❶ C_p , le **couple de pression** produit par la pression autour du corps :

$$C_p = \iint_{S_{paroi}} \overrightarrow{OM} \wedge (p \cdot \vec{n}) dS \cdot \vec{z}^{**}$$

- ❷ C_f , le **couple de frottement** produit par les contraintes visqueuses à la paroi :

$$C_f = - \iint_{S_{paroi}} \overrightarrow{OM} \wedge (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS \cdot \vec{z}^{**}$$

** . Rotation positive selon l'axe (O, \vec{z})



Couple « champ proche »

Définition

Le couple obtenu par une décomposition mécanique est appelé **couple « champ proche »**. Il mesure **« l'effet du fluide sur le corps »**.

$$C = C_p + C_f$$

- ❶ C_p , le **couple de pression** produit par la pression autour du corps :

$$C_p = \iint_{S_{paroi}} \overrightarrow{OM} \wedge (p \cdot \vec{n}) dS \cdot \vec{z}^{**}$$

- ❷ C_f , le **couple de frottement** produit par les contraintes visqueuses à la paroi :

$$C_f = - \iint_{S_{paroi}} \overrightarrow{OM} \wedge (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS \cdot \vec{z}^{**}$$

** . Rotation positive selon l'axe (O, \vec{z})



L'approche « champ lointain »

- Méthode indirecte : analyse du champ aérodynamique
 - construction de grandeurs *a posteriori*
 - utilisation de la connaissance de l'ensemble du champ aérodynamique
- Décomposition phénoménologique
 - traînée/couple de choc ou traînée d'onde
 - traînée/couple visqueuse
 - traînée/couple induite (par la portance)
- Basée sur des bilans de volume fluide
 - définition de volume de contrôle
 - utilisation de critères physiques pour l'attribution phénoménologique
 - introduction d'une part de subjectivité dans le cas de conflit entre critères
- Rarement comparable aux essais en soufflerie



L'approche « champ lointain »

- Méthode indirecte : analyse du champ aérodynamique
 - construction de grandeurs *a posteriori*
 - utilisation de la connaissance de l'ensemble du champ aérodynamique
- Décomposition phénoménologique :
 - traînée/couple de choc ou traînée d'onde
 - traînée/couple visqueuse
 - traînée/couple induite (par la portance)
- Basée sur des bilans de volume fluide
 - définition de volume de contrôle
 - utilisation de critères physiques pour l'attribution phénoménologique
 - introduction d'une part de subjectivité dans le cas de conflit entre critères
- Rarement comparable aux essais en soufflerie



L'approche « champ lointain »

- Méthode indirecte : analyse du champ aérodynamique
 - construction de grandeurs *a posteriori*
 - utilisation de la connaissance de l'ensemble du champ aérodynamique
- Décomposition phénoménologique :
 - traînée/couple de choc ou traînée d'onde
 - traînée/couple visqueuse
 - traînée/couple induite (par la portance)
- Basée sur des bilans de volume fluide
 - définition de volume de contrôle
 - utilisation de critères physiques pour l'attribution phénoménologique
 - introduction d'une part de subjectivité dans le cas de conflit entre critères
- Rarement comparable aux essais en soufflerie



L'approche « champ lointain »

- Méthode indirecte : analyse du champ aérodynamique
 - construction de grandeurs *a posteriori*
 - utilisation de la connaissance de l'ensemble du champ aérodynamique
- Décomposition phénoménologique :
 - traînée/couple de choc ou traînée d'onde
 - traînée/couple visqueuse
 - traînée/couple induite (par la portance)
- Basée sur des bilans de volume fluide
 - définition de volume de contrôle
 - utilisation de critères physiques pour l'attribution phénoménologique
 - introduction d'une part de subjectivité dans le cas de conflit entre critères
- Rarement comparable aux essais en soufflerie



Décomposition « champ lointain »

Définition

Le couple obtenu par une décomposition physique est couramment appelé **couple « champ lointain »**. Il peut être vu comme **« l'effet du corps sur le fluide »**.

$$C = C_w + C_v + C_i$$

Cette décomposition peut être faite de différentes manières. La méthode présentée suit la décomposition théorique suivante :

- 1 C_w , le couple d'onde produit par les ondes de choc ;
- 2 C_v , le couple visqueux due à la viscosité du fluide ;
- 3 C_i , le couple induit créé par la génération d'une portance (nappes tourbillonnaires).



Décomposition « champ lointain »

Définition

Le couple obtenu par une décomposition physique est couramment appelé **couple « champ lointain »**. Il peut être vu comme **« l'effet du corps sur le fluide »**.

$$C = C_w + C_v + C_i$$

Cette décomposition peut être faite de différentes manières. La méthode présentée suit la décomposition **théorique** suivante :

- 1 C_w , le couple d'onde produit par les ondes de choc ;
- 2 C_v , le couple visqueux due à la viscosité du fluide ;
- 3 C_i , le couple induit créée par la génération d'une portance (nappes tourbillonnaires).



Décomposition « champ lointain »

Définition

Le couple obtenu par une décomposition physique est couramment appelé **couple « champ lointain »**. Il peut être vu comme **« l'effet du corps sur le fluide »**.

$$C = C_w + C_v + C_i$$

Cette décomposition peut être faite de différentes manières. La méthode présentée suit la décomposition **théorique** suivante :

- 1 C_w , le **couple d'onde** produit par les ondes de choc ;
- 2 C_v , le couple visqueux due à la viscosité du fluide ;
- 3 C_i , le **couple induit** créé par la génération d'une portance (nappes tourbillonnaires).



Décomposition « champ lointain »

Définition

Le couple obtenu par une décomposition physique est couramment appelé **couple « champ lointain »**. Il peut être vu comme **« l'effet du corps sur le fluide »**.

$$C = C_w + C_v + C_i$$

Cette décomposition peut être faite de différentes manières. La méthode présentée suit la décomposition **théorique** suivante :

- 1 C_w , le **couple d'onde** produit par les ondes de choc ;
- 2 C_v , le **couple visqueux** due à la viscosité du fluide ;
- 3 C_i , le **couple induit** créée par la génération d'une portance (nappes tourbillonnaires).



Décomposition « champ lointain »

Définition

Le couple obtenu par une décomposition physique est couramment appelé **couple « champ lointain »**. Il peut être vu comme **« l'effet du corps sur le fluide »**.

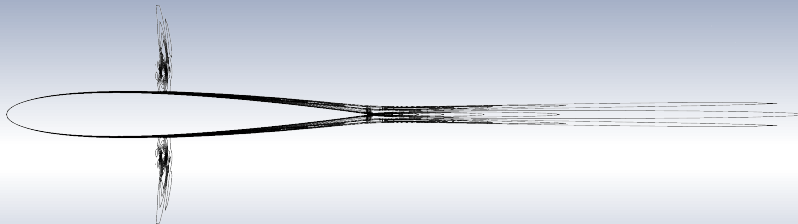
$$C = C_w + C_v + C_i$$

Cette décomposition peut être faite de différentes manières. La méthode présentée suit la décomposition **théorique** suivante :

- 1 C_w , le **couple d'onde** produit par les ondes de choc ;
- 2 C_v , le **couple visqueux** due à la viscosité du fluide ;
- 3 C_i , le **couple induit** créée par la génération d'une portance (nappes tourbillonnaires).



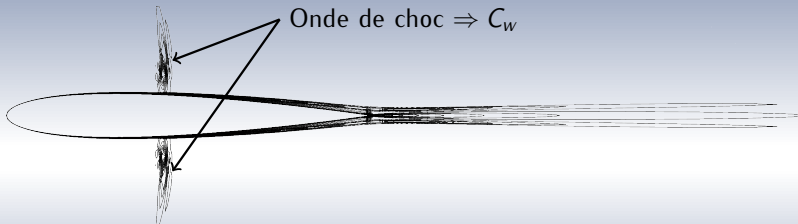
Décomposition « champ lointain »



Décomposition schématique en « champ lointain »



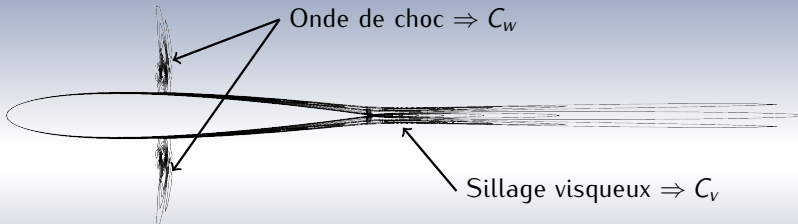
Décomposition « champ lointain »



Décomposition schématique en « champ lointain »



Décomposition « champ lointain »



Décomposition schématique en « champ lointain »



Égalité « champ proche » / « champ lointain »

Principe d'action / réaction

L'action du **fluide sur le corps** est égale à l'action du **corps sur le fluide**

$$\underbrace{C_p + C_f}_{\text{champ proche}} = \underbrace{C_w + C_v + C_j}_{\text{champ lointain}}$$



Plan de la présentation

- 1 **Théorie « champ lointain »**
 - Cas d'un avion
 - Extraction du couple rotor
 - Décomposition

- 2 **Application sur un cas 3D**
 - Simulations réalisées
 - Résultats « champ lointain »
 - Analyse « champ proche »



Bilans mécaniques

Navier-Stokes stationnaire (masse, quantité de mouvement)

$$\oiint_S \rho \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS = 0$$
$$\oiint_S \left[-\rho \vec{V} \otimes \vec{V} - p \vec{1} + \vec{\tau} \right] \cdot \vec{n} \, dS = \vec{0}$$

En appliquant ces bilans à une surface fluide quelconque enfermant le corps, S , on a :

Traînée totale

$$D = \oiint_S \left[-\rho(u - u_\infty) \vec{V} - (p - p_\infty) \vec{x} + \vec{\tau}_x \right] \cdot \vec{n} \, dS$$



Cas du rotor d'hélicoptère

Navier-Stokes stationnaire (formulation ALE)

$$\begin{aligned} \iint_S \rho (\vec{V} - \vec{s}) \cdot \vec{n} \, dS &= 0 \\ \iint_S \left[-\rho \vec{V} \otimes (\vec{V} - \vec{s}) - p \vec{1} + \vec{\tau} \right] \cdot \vec{n} \, dS &= \iiint_{\Omega} \vec{\omega} \wedge \rho \vec{V} \, d\Omega \end{aligned}$$

- Introduction d'une vitesse d'entraînement de la grille \vec{s}
- Introduction d'un terme source
- Utilisation de vitesses absolues exprimées dans le repère relatif



Cas du rotor d'hélicoptère

Navier-Stokes stationnaire (formulation ALE)

$$\begin{aligned} \iint_S \rho (\vec{V} - \vec{s}) \cdot \vec{n} \, dS &= 0 \\ \iint_S \left[-\rho \vec{V} \otimes (\vec{V} - \vec{s}) - p \vec{1} + \vec{\tau} \right] \cdot \vec{n} \, dS &= \iiint_{\Omega} \vec{\omega} \wedge \rho \vec{V} \, d\Omega \end{aligned}$$

- Introduction d'une **vitesse d'entraînement de la grille, \vec{s}**
- Introduction d'un **terme source**
- Utilisation de vitesses absolues exprimées dans le repère relatif



Cas du rotor d'hélicoptère

Navier-Stokes stationnaire (formulation ALE)

$$\begin{aligned} \iint_S \rho (\vec{V} - \vec{s}) \cdot \vec{n} \, dS &= 0 \\ \iint_S \left[-\rho \vec{V} \otimes (\vec{V} - \vec{s}) - p \vec{1} + \vec{\tau} \right] \cdot \vec{n} \, dS &= \iiint_{\Omega} \vec{\omega} \wedge \rho \vec{V} \, d\Omega \end{aligned}$$

- Introduction d'une **vitesse d'entraînement de la grille**, \vec{s}
- Introduction d'un **terme source**
- Utilisation de vitesses absolues exprimées dans le repère relatif



Cas du rotor d'hélicoptère

Navier-Stokes stationnaire (formulation ALE)

$$\begin{aligned} \iint_S \rho (\vec{V} - \vec{s}) \cdot \vec{n} \, dS &= 0 \\ \iint_S \left[-\rho \vec{V} \otimes (\vec{V} - \vec{s}) - p \vec{1} + \vec{\tau} \right] \cdot \vec{n} \, dS &= \iiint_{\Omega} \vec{\omega} \wedge \rho \vec{V} \, d\Omega \end{aligned}$$

- Introduction d'une **vitesse d'entraînement de la grille**, \vec{s}
- Introduction d'un **terme source**
- Utilisation de vitesses absolues exprimées dans le repère relatif



Bilans mécaniques

En se plaçant dans le repère tournant et avec les hypothèses de volumes constants, $V(t) = V$, et d'écoulement permanent dans le repère tournant, $\frac{\partial}{\partial t}\Big|_{R'} = 0$ et $\vec{\omega}_{(R'/R)}(t) = \vec{\omega}$, l'équation du moment dynamique s'écrit :

$$\iint_{S_{\text{fluide}}} \vec{OM} \wedge \left[(\rho \vec{V} \otimes (\vec{V} - \vec{s}) + \rho \bar{\mathbf{l}} - \vec{\tau}) \cdot \vec{n} \right] dS = - \vec{\omega} \wedge \iiint_V \vec{OM} \wedge \rho \vec{V} dV$$

Pour plus de lisibilité, on pose :

$$\vec{f} = \rho \vec{V} \otimes (\vec{V} - \vec{s}) + \rho \bar{\mathbf{l}} - \vec{\tau}$$



Bilans mécaniques

The projection of this equation on the rotation axis (O, \vec{z}) gives :

$$\oiint_S \overrightarrow{OM} \wedge (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS \cdot \vec{z} = -\vec{\omega} \wedge \iiint_V \overrightarrow{OM} \wedge \rho \vec{V} dV \cdot \vec{z}$$

- $\vec{\omega}$ is necessarily aligned with the rotation axis (O, \vec{z}) :
⇒ The **source term** contribution is zero.
- pre-projecting along the “meaningful” direction \vec{e}_θ :
⇒ \vec{f} becomes $\vec{f} = -\rho u_\theta (\vec{V} - \vec{s}) - (p - p_\infty) \vec{e}_\theta + \vec{\tau}_\theta$

Rotor torque

$$C_{rotor} = \oiint_S r(M) (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS$$



Bilans mécaniques

The projection of this equation on the rotation axis (O, \vec{z}) gives :

$$\oiint_S \vec{OM} \wedge (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS \cdot \vec{z} = -\vec{\omega} \wedge \iiint_V \vec{OM} \wedge \rho \vec{V} dV \cdot \vec{z}$$

- $\vec{\omega}$ is necessarily aligned with the rotation axis (O, \vec{z}) :
⇒ The **source term** contribution is zero.
- pre-projecting along the “meaningful” direction \vec{e}_θ :
⇒ \vec{f} becomes $\vec{f} = -\rho u_\theta (\vec{V} - \vec{s}) - (p - p_\infty) \vec{e}_\theta + \vec{\tau}_\theta$

Rotor torque

$$C_{rotor} = \oiint_S r(M) (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS$$



Bilans mécaniques

The projection of this equation on the rotation axis (O, \vec{z}) gives :

$$\oiint_S \vec{OM} \wedge (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS \cdot \vec{z} = -\vec{\omega} \wedge \iiint_V \vec{OM} \wedge \rho \vec{V} dV \cdot \vec{z}$$

- $\vec{\omega}$ is necessarily aligned with the rotation axis (O, \vec{z}) :
⇒ The **source term** contribution is zero.
- pre-projecting along the “meaningful” direction \vec{e}_θ :
⇒ \vec{f} becomes $\vec{f} = -\rho u_\theta (\vec{V} - \vec{s}) - (p - p_\infty) \vec{e}_\theta + \vec{\tau}_\theta$

Rotor torque

$$C_{\text{rotor}} = \oiint_S r(M) (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS$$



Bilans mécaniques

The projection of this equation on the rotation axis (O, \vec{z}) gives :

$$\oiint_S \vec{OM} \wedge (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS \cdot \vec{z} = -\vec{\omega} \wedge \iiint_V \vec{OM} \wedge \rho \vec{V} dV \cdot \vec{z}$$

- $\vec{\omega}$ is necessarily aligned with the rotation axis (O, \vec{z}) :
⇒ The **source term** contribution is zero.
- pre-projecting along the “meaningful” direction \vec{e}_θ :
⇒ \vec{f} becomes $\vec{f} = -\rho u_\theta (\vec{V} - \vec{s}) - (p - p_\infty) \vec{e}_\theta + \vec{\tau}_\theta$

Rotor torque

$$C_{rotor} = \oiint_S r(M) (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS$$



Nature thermodynamique

- Basée sur la répartition de von der Vooren :
 - irréversibles onde de chocs, couches de cisaillement, effets de la discrétisation numérique
 - réversibles nappes tourbillonnaires (effets induits)
- Quantification des pertes **physiques irréversibles**
- Puis quantification des pertes **réversibles**
- Enfin déductions des effets **irréversibles artificiels**

Numerical near-field/far-field balance

The torque, as the drag, being characteristic of the body, the following equality is necessarily obtained :

$$\underbrace{C_p + C_f}_{\text{Near field}} = \underbrace{C_w + C_v + C_i}_{\text{Far field}} + C_{sp}$$

with C_{sp} as spurious torque.



Bilans thermodynamiques

Les pertes irréversibles peuvent être quantifiées par :

Variation de la rothalpie

$$\Delta I = e + \frac{p}{\rho} + \frac{|\vec{V}|^2}{2} - \vec{V} \cdot \vec{s} - I_\infty$$

Variation d'entropie

$$\Delta s = \frac{r}{\gamma - 1} \ln \left[\frac{p}{p_\infty} \left(\frac{\rho_\infty}{\rho} \right)^\gamma \right]$$



Vitesse fictive

- \bar{u} : vitesse qu'aurait l'écoulement s'il n'avait subi que des processus irréversibles

Déficit de vitesse fictif

$$\Delta \bar{u} = \sqrt{2 \left[\Delta I - \frac{a_\infty^2}{\gamma - 1} (e^{\Delta s / c_p} - 1) \right] + |\bar{s}|^2 - |\bar{s}|}$$

- $\text{div}(\vec{f}) = 0$ permet d'écrire :

$$\vec{f}_i^* = -\rho (u_\theta - \Delta \bar{u})(\vec{V} - \bar{s}) - (\rho - \rho_\infty) \vec{e}_\theta$$



Vitesse fictive

- \bar{u} : vitesse qu'aurait l'écoulement s'il n'avait subi que des processus irréversibles

Déficit de vitesse fictif

$$\Delta \bar{u} = \sqrt{2 \left[\Delta I - \frac{a_\infty^2}{\gamma - 1} (e^{\Delta s / c_p} - 1) \right] + |\bar{s}|^2 - |\bar{s}|}$$

- $\text{div}(\vec{f}) = 0$ permet d'écrire :

$$\vec{f}_i^* = -\rho (u_\theta - \Delta \bar{u}) (\vec{V} - \vec{s}) - (\rho - \rho_\infty) \vec{e}_\theta$$



Décomposition du couple

La définition judicieuse des frontières $\Sigma_w, \Sigma_v, \Sigma_i$ permet d'écrire :

Composantes du couple « champ lointain »

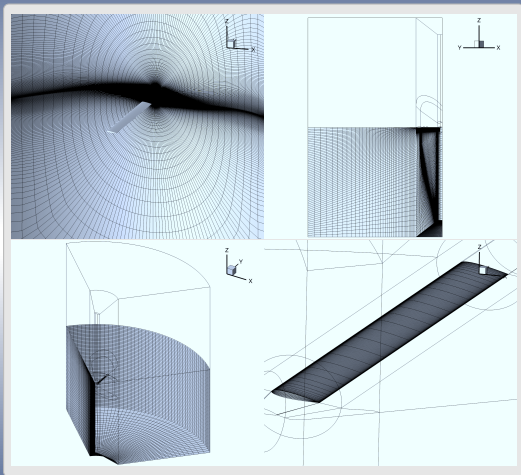
$$C_w = C_{choc} = - \iint_{\Sigma_w} r(M) (\vec{f}_i^* \cdot \vec{n}) d\Sigma$$

$$C_v = C_{visqueux} = - \iint_{\Sigma_v} r(M) (\vec{f}_i^* \cdot \vec{n}) d\Sigma + C_p + C_f$$

$$C_i = C_{induit} = \iint_{\Sigma_i} r(M) (\vec{f}_i^* \cdot \vec{n}) d\Sigma$$



Présentation du cas

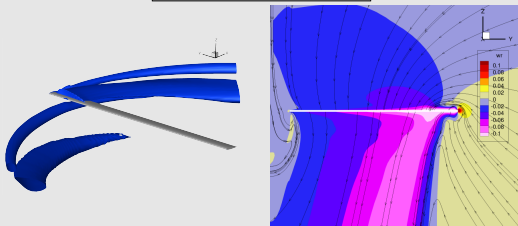


- 3D Computations
- Inviscid/Viscous fluid
- 3 multiblock grids :
 - Coarse : 0.14/0.25 Mpts
 - Medium : 1.2/2 Mpts
 - Fine : 9.2/16 Mpts
- Tip and root blade cap meshed
- Mach number :
 - 0.5 (subsonic)
 - 0.7 (weak transonic)
 - 0.8 (strong transonic)
- Pitch angle = 8°

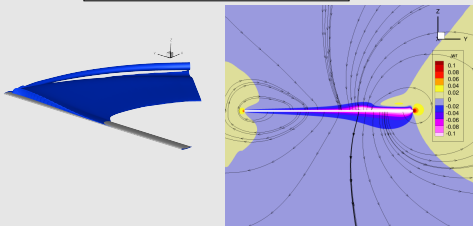


Two types of computation

Hovering rotor simulation (periodic)

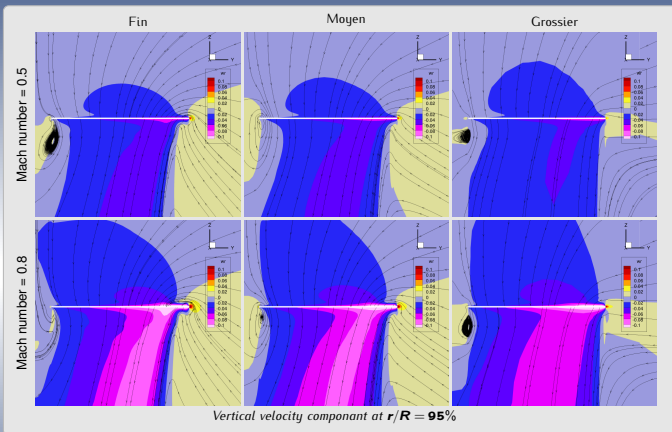


"Isolated blade" computation (non-periodic)



- Reference comparable to fixed wing case
- Phenomenon better understood
- Previous blade wake interaction pointed out

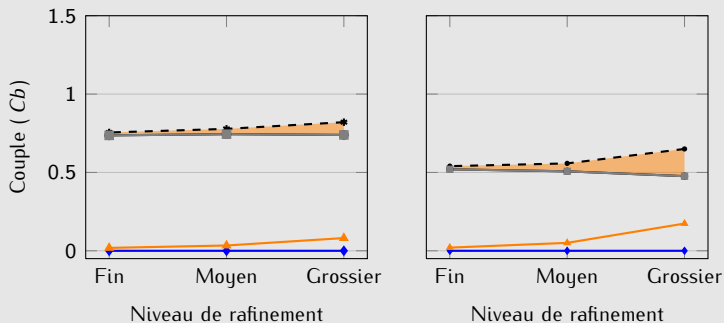
Three grid levels



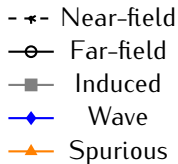
- Grid sensivity study
- Better understanding of phenomena
- Numerical dissipation effects



Mach = 0,5 – Non visqueux

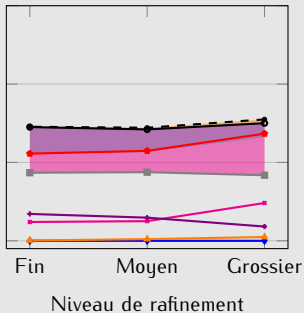
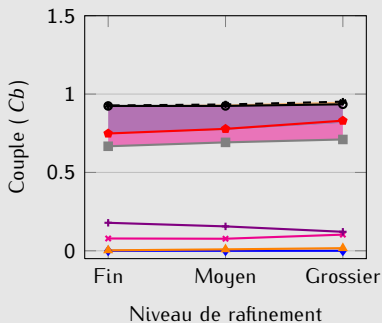


- Higher baseline torque level than isolated torque due to a higher induced torque
- Grid dependency of pressure torque in both cases
- Small and similar grid dependency of induced torque
- Baseline spurious torque less grid dependent

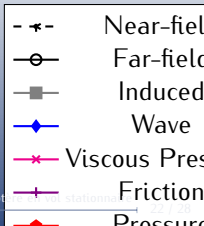




Mach = 0,5 – Visqueux

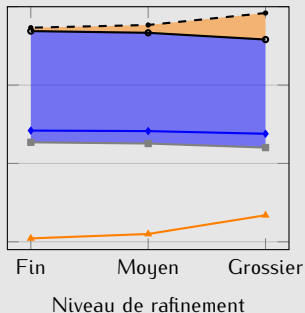
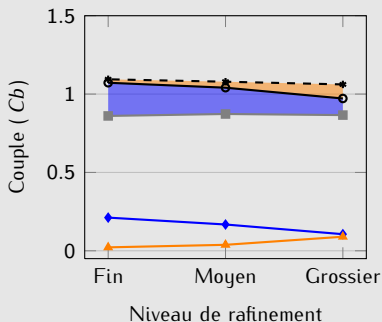


- Higher baseline torque level than isolated torque due to a higher induced torque
- Grid dependency of pressure torque in both cases
- Small and similar grid dependency of induced torque
- Baseline spurious torque less grid dependent

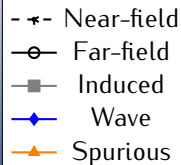




Mach = 0,8 – Non visqueux

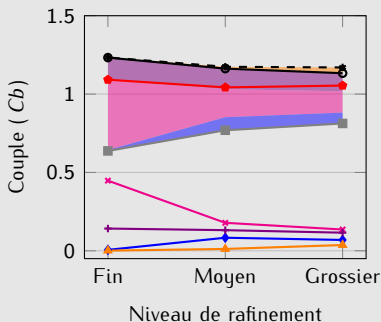


- Unexpected constant baseline pressure torque and grid dependency of baseline far-field torque
- Higher baseline induced torque (constant)
- Weaker and more grid dependent baseline wave torque
- Baseline far-field torque **apparently** more grid dependent





Mach = 0,8 – Visqueux



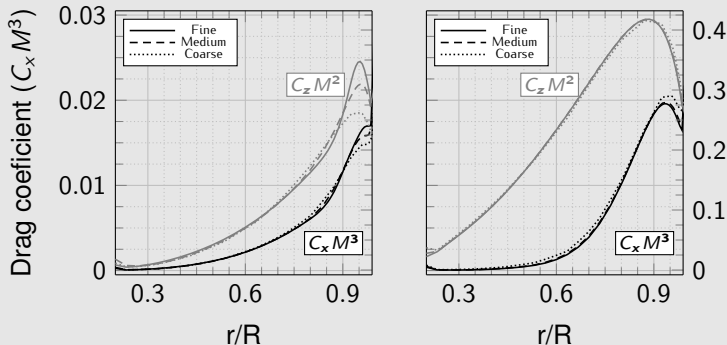
- Unexpected constant baseline pressure torque and grid dependency of baseline far-field torque
- Higher baseline induced torque (constant)
- Weaker and more grid dependent baseline wave torque
- Baseline far-field torque more grid dependent

- * -	Near-field
—○—	Far-field
—■—	Induced
—◆—	Wave
—*—	Viscous Pressure
—+—	Friction
—◆—	Pressure



Mach = 0,8 – Non visqueux

Hovering rotor computation Isolated blade computation

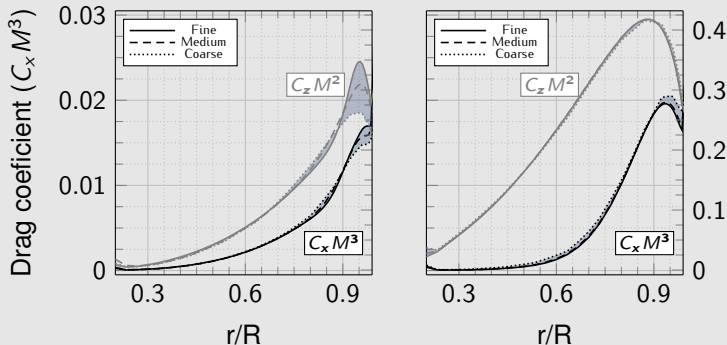


- Strong effect of the wake on both lift and torque close to the blade tip (incoming tip vortex)
- Grid refinement modifies the tip vortex convection and preservation
- Medium grid already converged for isolated blade computation



Mach = 0,8 – Non visqueux

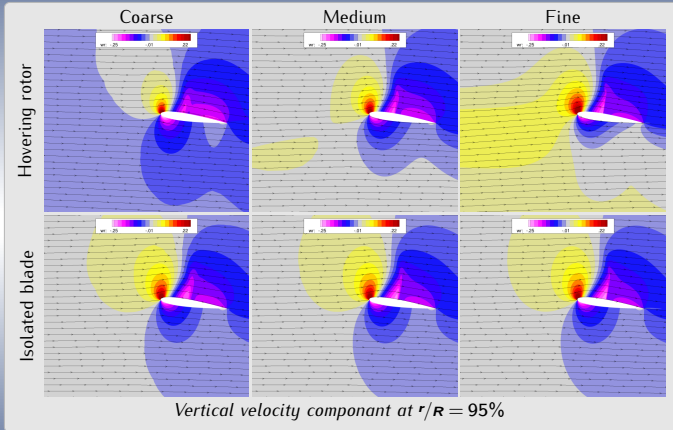
Hovering rotor computation Isolated blade computation



- Strong effect of the wake on both lift and torque close to the blade tip (incoming tip vortex)
- Grid refinement modifies the tip vortex convection and preservation
- Medium grid already converged for isolated blade computation



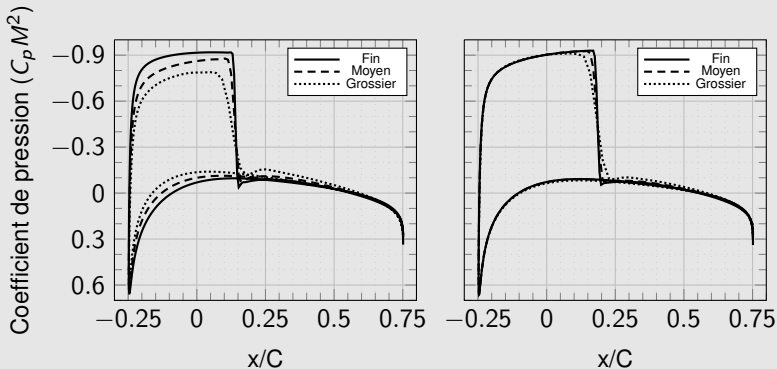
Tip vortex effects – Mach = 0,8 – Non visqueux



- Strong effect of incoming tip vortex on aerodynamic AoA
- Strong effect of AoA on the shock wave (tip vortex convection)
- Small grid effect on pressure without incoming wake



Tip vortex effects – Mach = 0,8 – Non visqueux



- Strong effect of incoming tip vortex on aerodynamic AoA
- Strong effect of AoA on the shock wave (tip vortex convection)
- Small grid effect on the shock wave without incoming wake



Conclusion et perspectives

Results

- Development of a new far-field formulation for rotor in hover derived from **van der Vooren** fixed wing formulation
- Implementation and validation of this new method
- Good results on a 3D inviscid and viscous application
- Improved understanding of phenomena for hovering rotor

Perspectives

- Extension to vertical rotor flight and propellers cruise conditions flight
- Application to rotor design and optimization



Conclusion et perspectives

Results

- Development of a new far-field formulation for rotor in hover derived from **van der Vooren** fixed wing formulation
- Implementation and validation of this new method
- Good results on a 3D inviscid and viscous application
- Improved understanding of phenomena for hovering rotor

Perspectives

- Extension to vertical rotor flight and propellers cruise conditions flight
- Application to rotor design and optimization