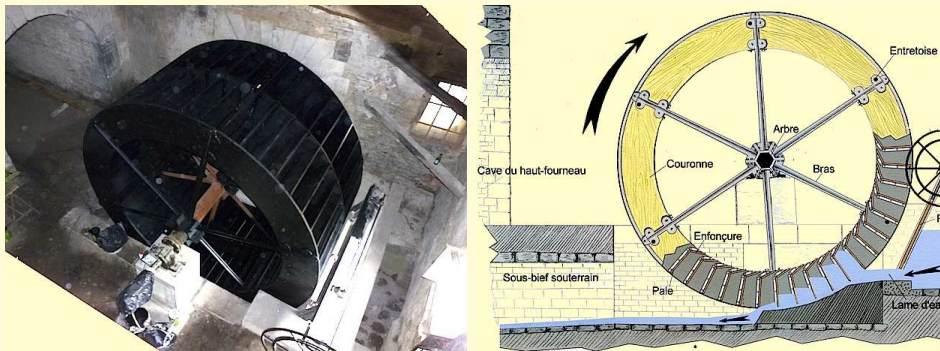


Séance de Travaux Dirigés 10

Courbe de puissance $\mathcal{P}(\Omega)$ d'une roue à aubes

Objectifs de cette séance

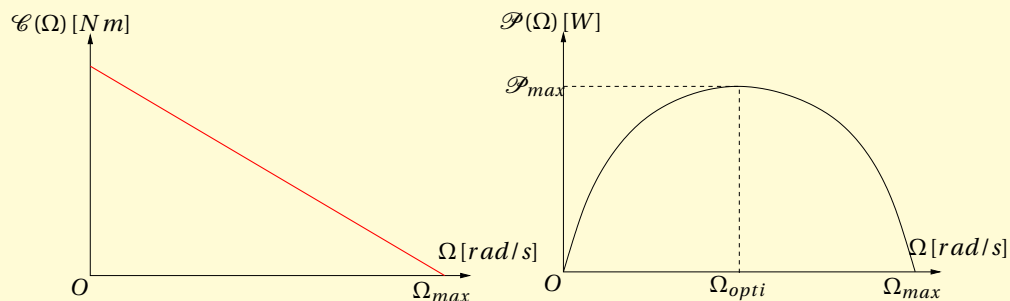
1. Etudier le processus d'extraction d'énergie hydraulique par une roue à aubes (type moulin),
2. Mener une analyse liée à une problématique d'interaction fluide-structure (IFS),
3. Mettre en place les outils nécessaires (6DOF) pour la prise en compte de la dynamique d'une roue à aubes interagissant avec un écoulement à surface libre (VOF),
4. Intégrer une rotation de corps rigide lors de la réalisation du domaine (CAO, maillage),
5. Extraire la courbe de puissance $\mathcal{P}(\Omega)$ du dispositif en fonction de la vitesse de rotation Ω .



source www.fontesdart.org

La configuration retenue pour la roue est celle de Dommartin-le-Franc en Haute-Marne (dépt. 52). Les performances reconnues sont de pouvoir développer une puissance de 8 cv dans de bonnes conditions de débit de rivière. L'anneau qui supporte les 48 augets a un rayon externe de 1.75 m pour une largeur de 0.5 m. La roue a une *profondeur* (selon z) de 2 m. La masse de la roue est de 2580 kg et son inertie (3D) est $\mathcal{I}(3D) = 2682 \text{ kg m}^2$, à ramener par unité de largeur dans le cas d'une analyse 2D.

La mise en rotation de la roue résulte de l'interaction entre un écoulement d'eau de type canal et les augets constituant la roue. En mode libre (sans couple de résistance à la rotation), la roue atteint une vitesse de rotation Ω_{max} . Avec un couple correspondant au freinage complet, la vitesse de rotation est nulle. Pour extraire une puissance utile à convertir (électricité, action d'une meule...) il est alors nécessaire d'imposer un couple \mathcal{C} qui stabilisera la vitesse de rotation à Ω . A une valeur de couple correspond donc une vitesse comme illustré *théoriquement* ci-après (à gauche) :



C'est le produit de ces deux grandeurs $\mathcal{P}_{utile} = \mathcal{C} \times \Omega$ qui caractérise alors la puissance utile qu'il est possible d'extraire. Cette puissance n'est pas constante et est bien nulle pour les deux cas exposés ci-dessus (mode libre et freinage). Il existe cependant une valeur optimale et telle qu'illustrée *théoriquement* sur la figure de droite.

La finalité de cette séance est donc de déterminer la courbe de puissance $\mathcal{P}(\Omega)$ ainsi que la valeur maximale qu'il est possible d'extraire de ce dispositif.

La géométrie du problème s'articule autour des deux composantes suivantes :

1. une roue à aubes dont les dimensions, la masse (bien qu'inutile ici...), et le moment d'inertie sont connus,
2. un domaine extérieur à la roue délimité par le fond du canal, la limite supérieure à la pression atmosphérique, la sortie et une entrée alimentant le canal en eau.

Important 1 *La mise en données du problème, CAO, maillage et prise en compte d'une rotation de corps rigide, est en tout point similaire à celle détaillée lors du précédent TD. Vous êtes donc invité(e) à vous y reporter!*

Seule les mises en données de l'analyse VOF (Volume Of Fluid) et de la prise en compte de la dynamique de la roue (outil 6DOF¹) seront ici détaillées.

A l'exception des dimensions propres du dispositif et des données du cours d'eau, il vous appartient de définir, d'après vos propres critères, les autres données (types de maillage, tailles de cellules...).

Néanmoins, vous respecterez les consignes suivantes :

1. analyse 2D et instationnaire,
2. réalisation de CAO distinctes pour les deux composants cités plus haut : les frontières communes liées au passage d'un fluide seront traitées en tant que *interface*,
3. inclusion de la roue à aubes dans un disque, seule géométrie compatible avec une rotation de corps rigide,
4. le recours à une technique de raffinement de maillage afin de garantir un maillage adapté à la capture de l'interface eau/air : ce raffinement pourra être appliqué aussi bien au domaine extérieur qu'à la roue (ne pas oublier qu'elle tourne...).

Création des CAO

En vous appuyant sur la démarche exposée lors du précédent tutoriel, générer deux CAO distinctes mais affichant chacune une interface commune (disque de rayon commun). Concernant la roue :

1. celle-ci est composée de 48 augets rectilignes de longueur 0.5 m , d'épaisseur 3 cm et présentant un chanfrein de 5 mm aux quatre coins (pas obligatoire de le considérer),
2. les augets s'inscrivent dans deux disques centrés sur l'axe de rotation de la roue et de rayons respectifs 1.25 m et 1.75 m ,
3. il est IMPORTANT que le rayon de la CAO associée à la roue soit choisi de telle sorte qu'il englobe les 48 augets (soit $> 1.75\text{ m}$).

La CAO du domaine extérieur ne pose pas de problème particulier et s'appuiera sur les dimensions illustrées Figure ci-dessous. Parmi les points importants à considérer :

1. une *entrée* de hauteur 0.3 m destinée à alimenter en continu le cours d'eau à l'origine de la mise en rotation de la roue,
2. un espacement entre les extrémités des augets et le fond du canal (dans la partie courbée) de 10 cm .

1. pour 6 Degrees Of Freedom à traduire par 6 degrés de liberté (ddl)

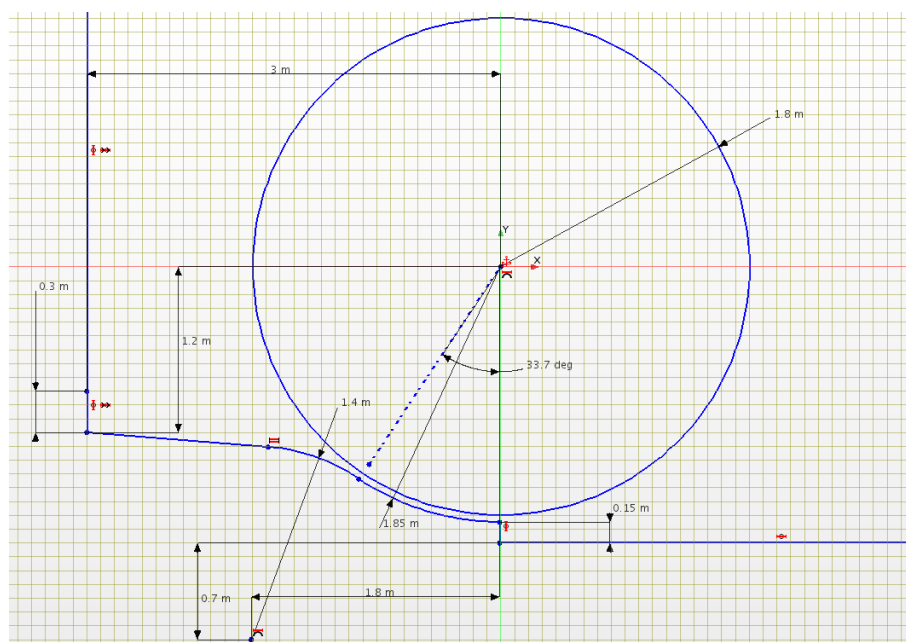


Figure 1 – Définition partielle de la CAO du domaine extérieur

Génération des maillages

Vous avez totale liberté pour générer le maillage de votre choix. Veuillez cependant à rester dans une taille de maillage *raisonnable* vis-à-vis du temps de calcul. Pour déterminer la taille du maillage en nombre de cellules Menu **Mesh** > **Diagnostics**. Cocher les régions d'intérêt et valider. Les données apparaissent dans la fenêtre de données du bas.

Quelques points de détail à ne pas oublier :

- ▷ générer un maillage pour la roue et un autre distinct du premier pour le domaine extérieur,
- ▷ ne pas oublier de définir l'interface entre les deux frontières communes à la roue et au domaine extérieur,
- ▷ pour une analyse multiphasique de type VOF, c'est l'option *Outlet* que vous imposerez aux frontières de type *Interface*,
- ▷ les frontières *entrée* et *sortie* du domaine seront déclarées comme à l'habitude.

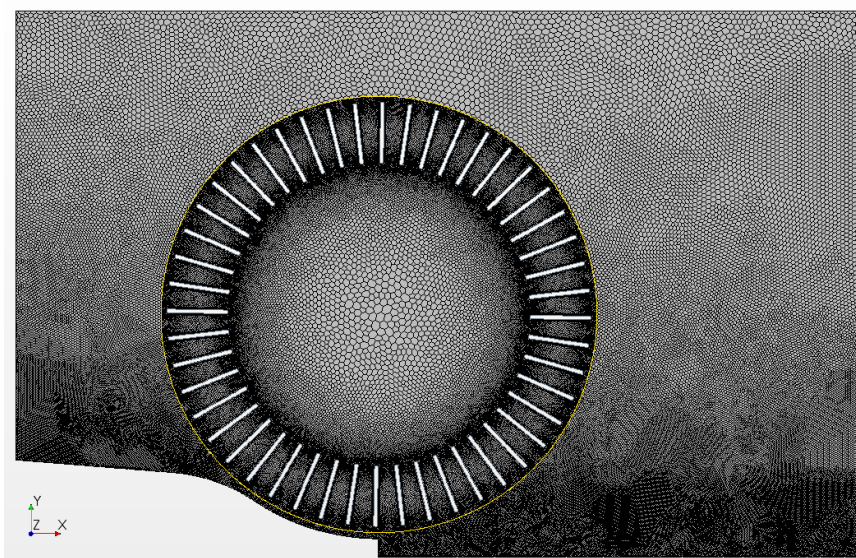


Figure 2 – Vue des deux maillages

Mise en données du problème

Sélectionner les modèles physiques :

- ▷ **2D**,
- ▷ **Implicit Unsteady** (car approche instationnaire),
- ▷ **Eulerian Multiphase** (car deux phases),
- ▷ **Volume Of Fluid (VOF)**,
- ▷ **Laminar** (ou **Turbulent** + $k-\epsilon$ à votre convenance),
- ▷ **Gravity** (fondamental !),
- ▷ **Segregated Fluid Isothermal**.

Déclaration des deux phases : Eau et Air

L'étape suivante consiste alors à définir les deux phases fluide **Eau** et **Air**. Il est **IMPORTANT** de définir en premier la phase liquide PUIS la phase gazeuse afin de rester compatible avec l'ordre des instructions de ce tutoriel !

- ▷ Sélectionner **Models > Eulerian Multiphase > Eulerian Phases** et créer une nouvelle phase,
- ▷ Renommer cette phase **Eau**,
- ▷ Spécifier **Liquid** et **Constant Density**,
- ▷ Fermer.

Procéder de la même manière pour la seconde phase :

- ▷ Sélectionner **Models > Eulerian Multiphase > Eulerian Phases** et créer une nouvelle phase,
- ▷ Renommer cette phase **Air**,
- ▷ Spécifier **Gas** et **Constant Density**,
- ▷ Fermer.

Les fluides par défaut sont de l'eau et de l'air : leur propriétés sont donc conservées telles quelles.

Condition à la limite entrée

Pour les valeurs à imposer sur les conditions à la limite *entrée* :

- ▷ imposer une valeur de vitesse égale à $\sqrt{2gh}$ avec $h = 0.3\text{ m}$ la profondeur du canal/courant,
- ▷ spécifier qu'il s'agit d'une entrée alimentée exclusivement en eau en spécifiant [1.0, 0.0] pour l'onglet *Volume Fraction*.

Mise en place du couplage fluide/structure : 6DOF

L'interaction entre le fluide en écoulement et la dynamique en rotation de la roue requiert la mise en place d'un module dédié, dit 6DOF, qui se chargera de résoudre en temps le principe de la dynamique appliqué à la roue moyennant l'intégration du champ de pression hydraulique sur les augets immergés :

$$\mathcal{J}|_o \ddot{\theta} = \sum_{\text{augets}} \mathcal{M}_p - \mathcal{C} \quad \text{avec} \quad \dot{\theta} = \Omega(t),$$

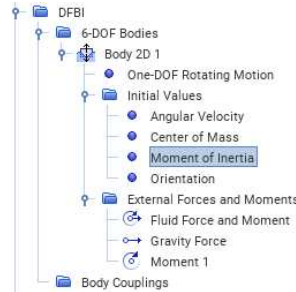
avec :

- ▷ $\mathcal{J}|_o$: inertie de la roue autour de son axe de rotation o ,
- ▷ \mathcal{M}_p moment exercé par un auget interagissant avec l'écoulement (effort de pression),
- ▷ \mathcal{C} : couple exercé sur l'axe pour extraire une puissance utile,
- ▷ $\Omega(t)$: vitesse de rotation de la roue.

Pour la mise en place de l'outil 6DOF, respecter les étapes suivantes :

- ▷ clic-droit sur **Tools > Motions** puis en sélectionnant **New > DFBI Rotation and Translation**,
- ▷ sélectionner la région à laquelle s'applique ce module 6DOF avec **Regions > Roue > Physics Values > Motion Specification** et choisir **DFBI Rotation and Translation** dans l'onglet **Motion**.
- ▷ cette action ajoute les onglets **6-DOF Solver** et **6-DOF Motion** sous Solver : vérifier leur présence,

- ▷ pour renseigner les valeurs de masse, d'inertie... clic-droit sur l'onglet **DFBI > 6-DOF Bodies**
- ▷ sélectionner **New > 2D Body** et dans les différents onglets :
 - associer la région *Roue* à *Body Surface*,
 - renseigner les coordonnées du centre de masse si différent de l'origine,
 - renseigner le moment d'inertie,
 - vérifier que la gravité est bien cochée.



Imposition d'un couple de freinage

Pour imposer le couple \mathcal{C} sur l'axe, destiné à freiner la roue pour en extraire de la puissance :

- ▷ **DFBI > 6-DOF Bodies > Body 2D 1 > External Forces and Moments**,
- ▷ Clic-droit **New > Moment**,
- ▷ Imposer la valeur de votre choix (attention au signe...)

Pour démarrer le calcul, vous laisserez la roue tourner librement en imposant un couple nul et ce afin de déterminer la vitesse de rotation maximale de la roue. Vous la freinerez par la suite...

Initialisation et calculs

Initialiser le calcul et préparer une *Scalar Scene* pour visualiser l'évolution de la fraction volumique au cours du temps. En spécifiant 2 valeurs pour l'échelle des couleurs, vous distinguerez plus facilement la partie liquide de la partie gazeuse.

Il est important de ne pas imposer un incrément en temps Δt trop élevé afin de limiter un effet de diffusion de l'interface air/liquide.

Vous afficherez au cours du calcul l'effort/moment relevé sur la roue ainsi que sa vitesse de rotation : l'obtention de valeurs paliers servira d'indicateur de convergence avant de passer à un autre calcul :

- moment exercé sur la roue : **Reports > New > 6DOF... > 6DOF Body Moment**,
- vitesse angulaire de rotation de la roue : **Reports > New > 6DOF... > 6DOF Body Angular velocity**.

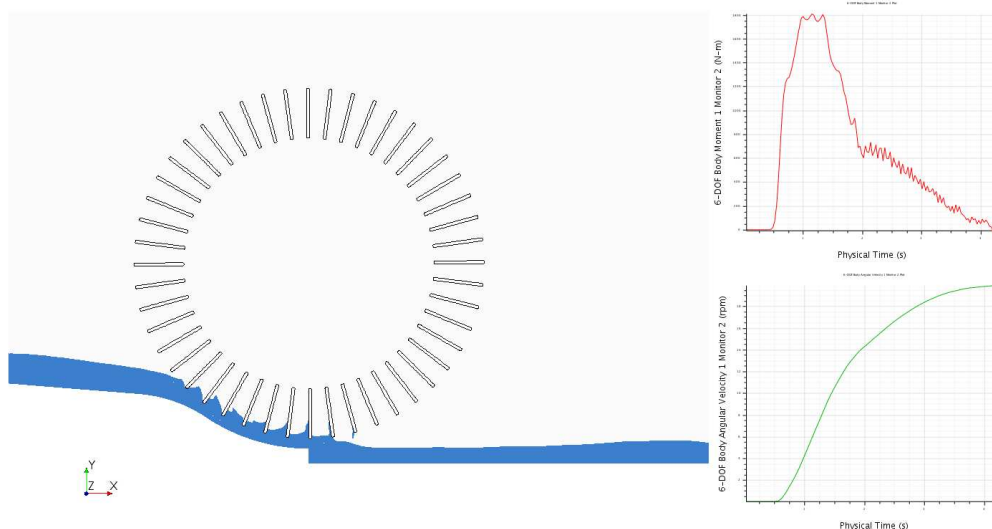
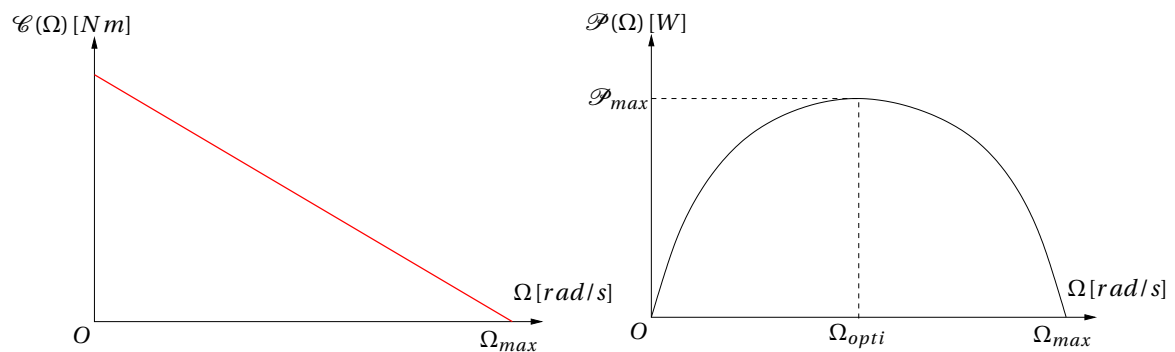


Figure 3 – Affichage de la fraction volumique (2 Levels) et historique de la roue en mode libre ($\mathcal{C} = 0 \text{ N.m}$)

Analyse et post-traitement

A l'issue de la mise en données complète (et réussie) du modèle, la suite de cette session consiste à mettre en œuvre une démarche visant à extraire la courbe de puissance de la roue. Le principal intérêt d'une telle courbe est de pouvoir déterminer la vitesse de rotation optimale permettant d'extraire le maximum de puissance hydraulique du dispositif (roue+écoulement). A titre d'information, cette démarche est en tout point similaire à la séance de travaux pratiques de la turbine Pelton (TF01).

Vous vérifierez notamment que sans couple extérieur destiné à freiner la roue, cette dernière se stabilise à une vitesse Ω_{max} correspondant à un moment (exercé par l'eau) proche de zéro : la roue est dite en mode libre.



L'imposition d'un moment/couple extérieur \mathcal{C} destiné à la ralentir à la vitesse Ω pour en extraire une puissance utilisable définie par :

$$\mathcal{P} = \mathcal{C} \times \Omega.$$

Il vous reste donc à déterminer d'autres couples de valeurs (\mathcal{C}, Ω) pour compléter la courbe puis en déduire la courbe de puissance et enfin, extraire sa valeur maximale \mathcal{P}_{max} et la vitesse de rotation Ω_{opti} associée.

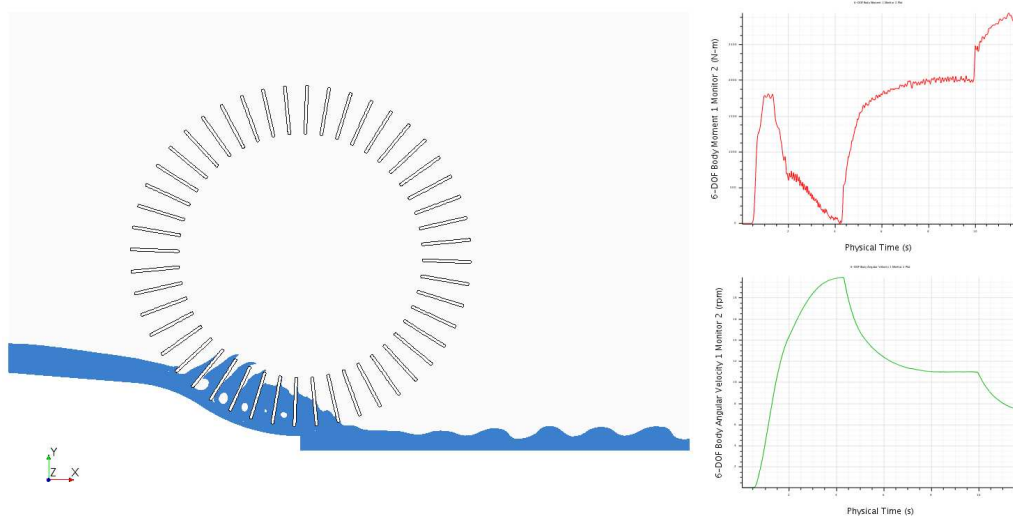


Figure 4 – Affichage de la fraction volumique (2 Levels) et historique de la roue en mode contraint ($\mathcal{C} \neq 0 \text{ N.m}$)