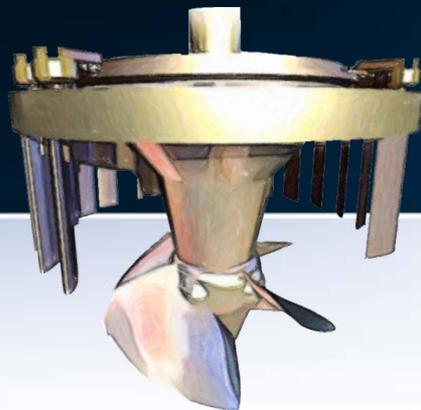


# Turbomachines



**NRJ EN ROTATION**

A futuristic robot with a metallic, grey and blue body is the central figure. It has a large, ornate blue flower-like structure on its head and is holding a glowing blue, crystalline object in its right hand. The robot's eyes are glowing blue. In the background, there is a large satellite dish and a turbine-like structure. The scene is set against a dark, starry sky. The text "Turbomachines Radiales" is overlaid on the right side of the image.

# Turbomachines Radiales

# OBJECTIFS

- Décrire les composantes et le fonctionnement d'une machine radiale
- Illustrer les triangles de vitesses dans un rotor centrifuge
- Analyser la performance d'un rotor en fonction de l'inclinaison des aubes
- Préciser le choix pour les coefficients adimensionnels

# OBJECTIFS

- Regarder l'équation d'Euler en module de vitesses
- Présenter le concept de glissement
- Remarquer l'importance d'opérer au point de design
- Signaler l'existence de deux phénomènes possibles dans les compresseurs: le blocage sonique et le pompage

# Préambule

La théorie du rotor centrifuge que nous allons regarder utilise plusieurs hypothèses simplificatrices

Malgré sa simplicité, elle permet de proposer un dimensionnement préliminaire de la géométrie, comme les rayons à l'entrée pour le pied et la tête de l'aube, ainsi que le rayon, l'épaisseur, et l'angle d'inclinaison, des aubes à la sortie



# Introduction

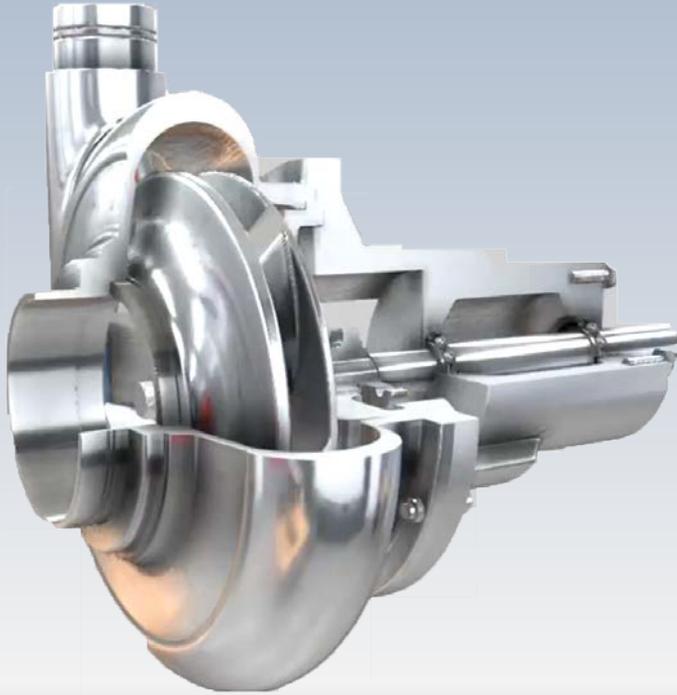
Dans la catégorie de machines centrifuges, la grande majorité des unités industrielles sont les **compresseurs et/ou les pompes**

Leur rôle étant celui d'obtenir une forte **augmentation de pression**

L'analyse sera faite dans la perspective de ces machines

# Description

## Machine radiale



Dans une pompe ou un compresseur centrifuge, le gain en pression est obtenu grâce à la force de Coriolis

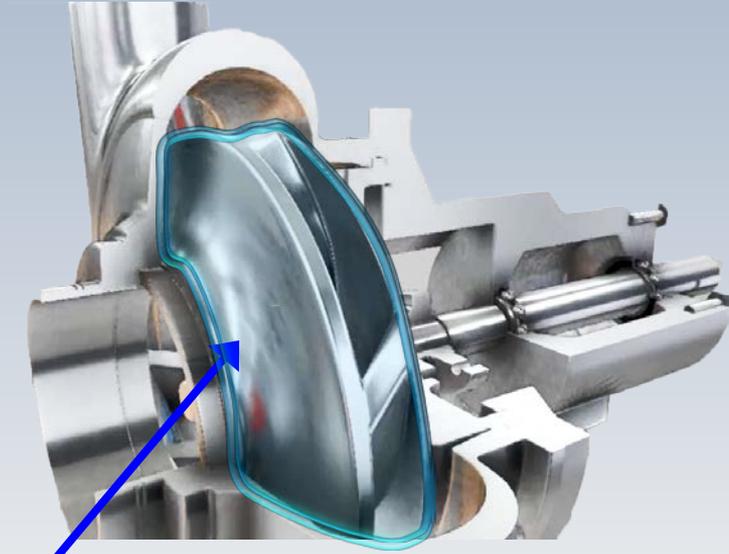
Elle est induite par le mouvement rotatif, ainsi que par le **changement de rayon** entre les points d'entrée et de sortie

# Description

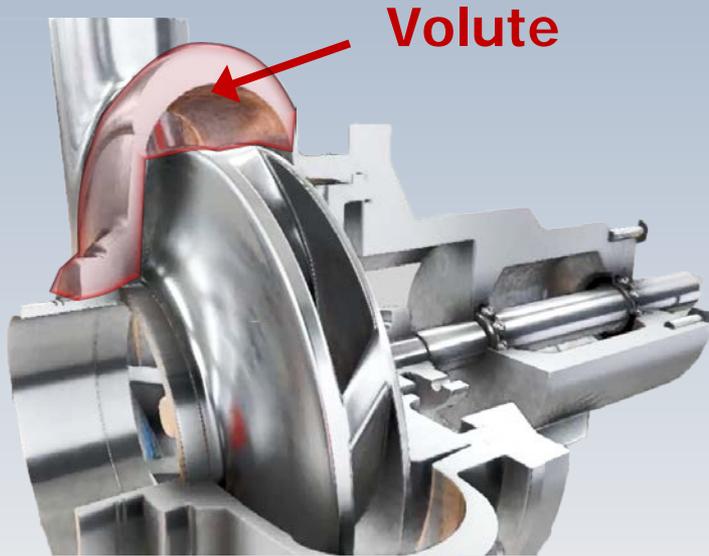
## Machine radiale

Comme dans les machines axiales, Ce type de machines sont essentiellement formées:

- d'un **rotor ou impulseur**, qui transfère au fluide l'énergie disponible sur l'arbre, pour accroître la pression

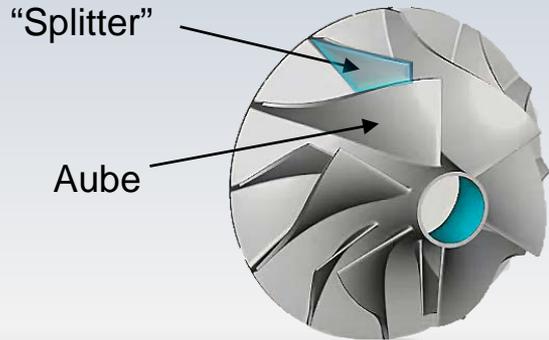
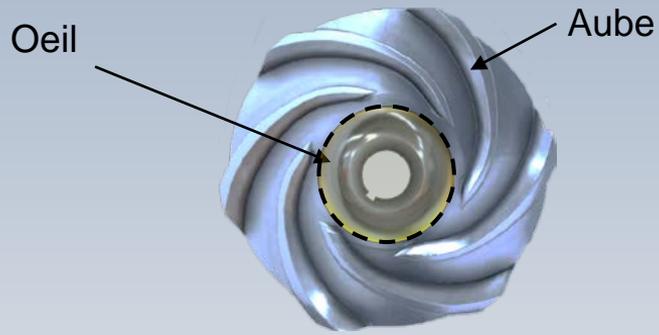


**Rotor**



- d'une **volute (diffuseur)**.  
Il s'agit d'une partie fixe, donc un stator, qui redresse et que guide progressivement l'écoulement vers une conduite

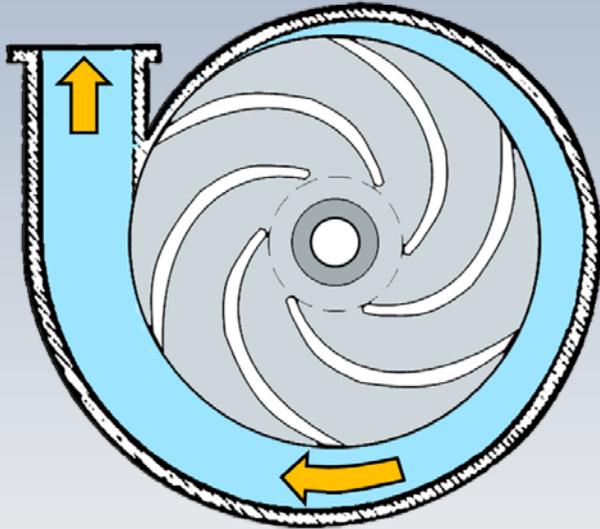
# Le rotor



Cette roue a une **entrée axiale** appelée **l'œil** et une **sortie en périphérie**. Elle est dotée **d'aubes** qui la sépare en plusieurs **passages**.

Ces passages sont parfois munis **d'aubes intercalaires** (splitters)

# La volute

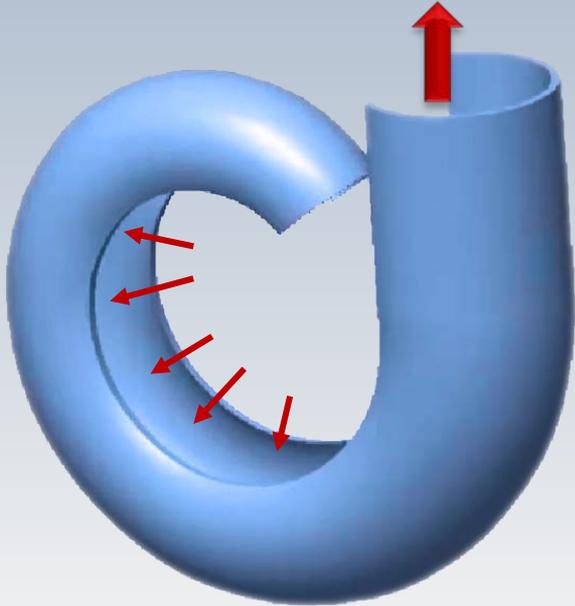


Une partie de l'énergie du fluide sortant du rotor, se trouve sous la forme d'énergie cinétique.

En aval du rotor se situe la volute. Son rôle est celui de **transformer l'énergie cinétique en pression**

La volute est une conduite en forme de **spirale**, à section divergente

# La volute

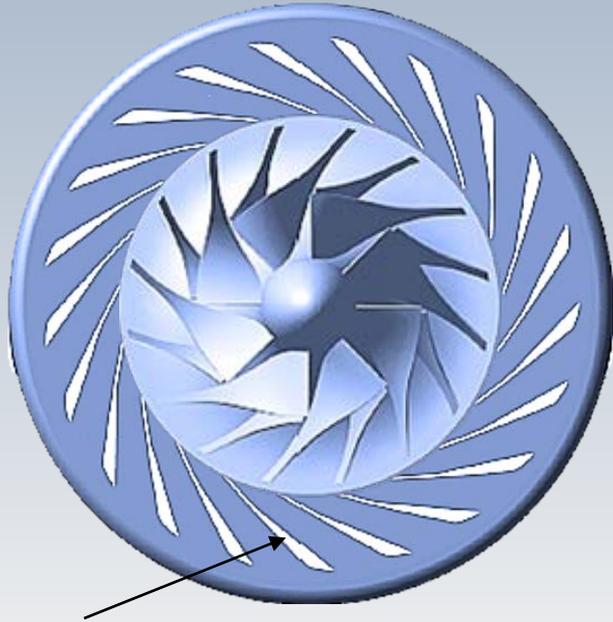


L'écoulement est emmené séquentiellement dans la volute, de sorte que le débit augmente progressivement

L'accroissement de l'aire de la section de passage, compense l'augmentation du débit

La vitesse demeure alors presque constante

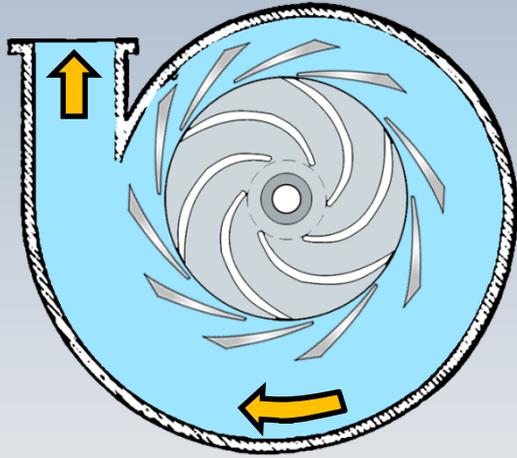
# Diffuseur aubé



Diffuseur Aubé

En plus du rotor et de la volute, dans les compresseurs, ainsi que dans les pompes à grande capacité, on retrouve une couronne d'aubes fixes

La composante illustrée sur la figure, correspond à un diffuseur aubé



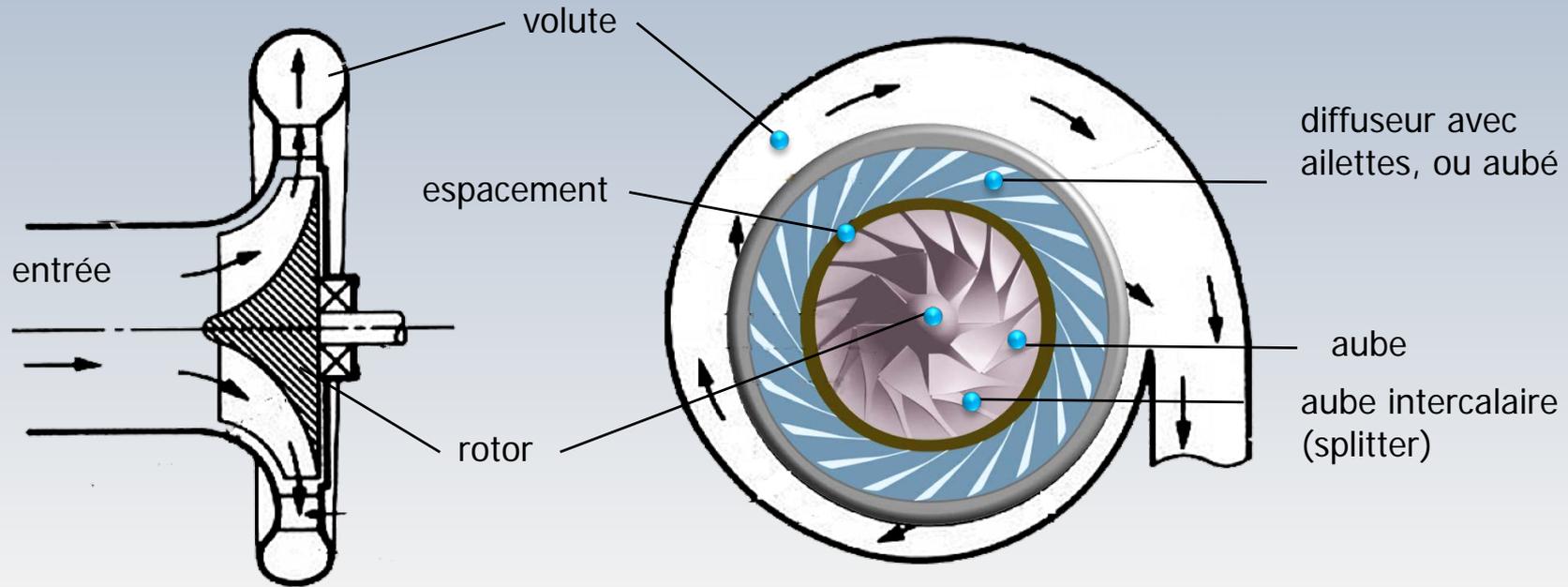
Agencement rotor, diffuseur aubé et volute

# Description

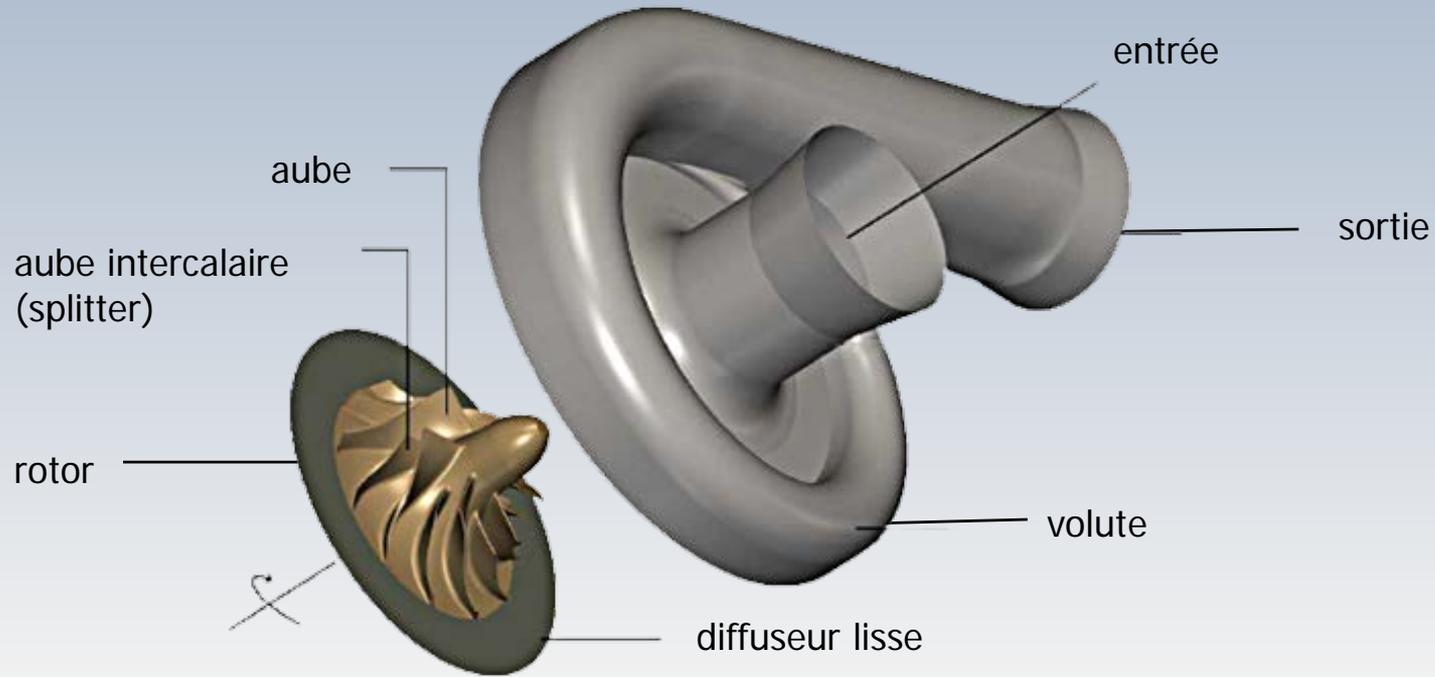
## Compresseur centrifuge

Maintenant, nous présentons un résumé en image des composantes d'une machine radiale. D'abord en projection et ensuite en 3D

# Éléments d'une machine radiale



# Éléments d'une machine radiale



# Rôle des composantes

- La **conduite d'entrée** dirige le fluide vers l'oeil de la machine
- Le **rotor** favorise le transfert de l'énergie mécanique des pales vers le fluide sous forme d'énergie cinétique et de pression
- Le **diffuseur aubé**, traduit l'énergie cinétique en pression
- La **volute**, transforme l'énergie cinétique résiduelle en pression. L'écoulement est redressé pour s'ajuster à une conduite

# Rappel: nomenclature

Nous rappelons brièvement la nomenclature adoptée:

- Le symbole  $c$  pour la vitesse **absolue** de l'écoulement
- La lettre  $w$  pour la vitesse **relative** de l'écoulement
- Le caractère  $U$  pour la vitesse **tangentielle** ou **périphérique**

# Projection

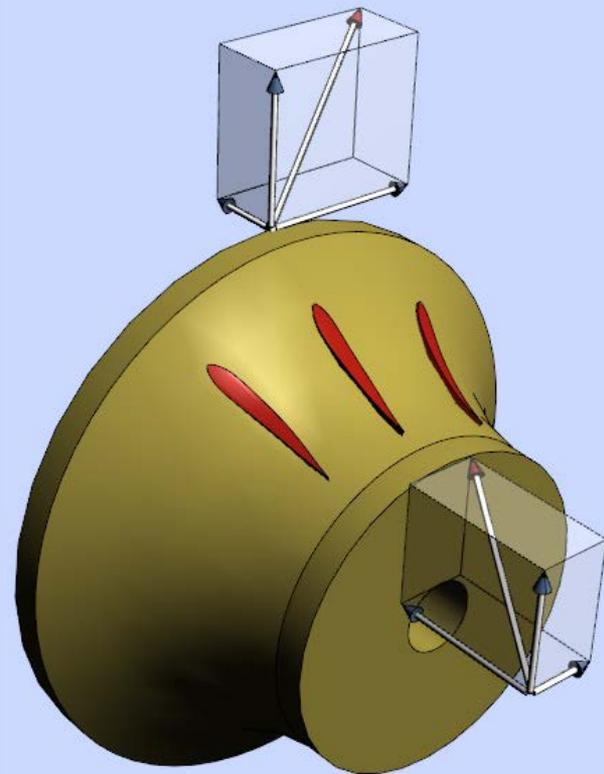
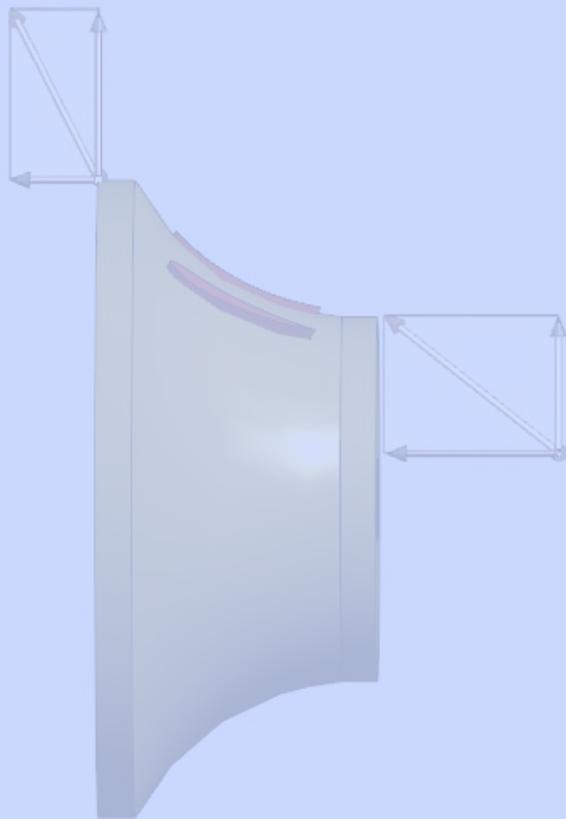
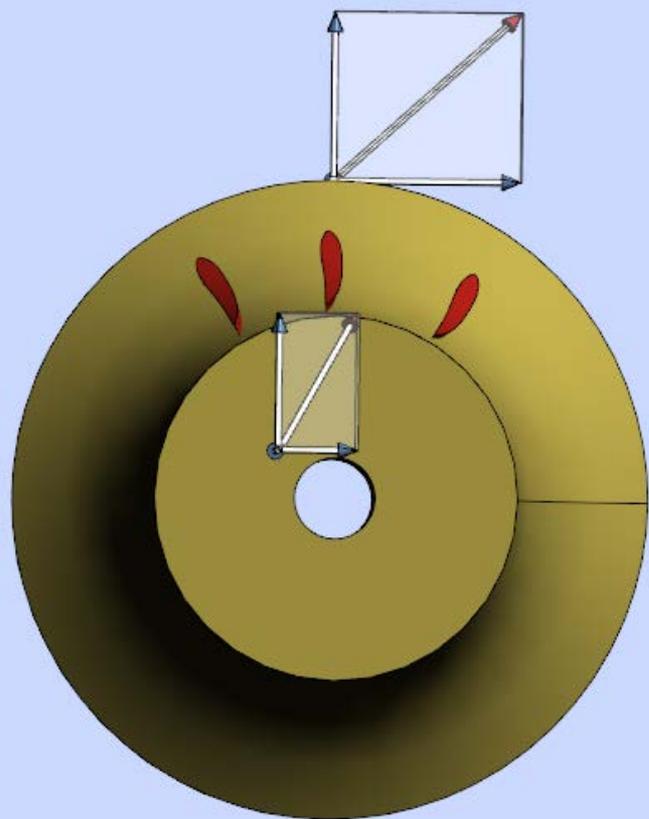
Pour une turbomachine centrifuge, on s'intéresse au **plan formé par les composantes  $c_u, c_m$**

La composante axiale de la vitesse  $c_x$  est négligeable le long du rotor et elle nulle à la sortie.

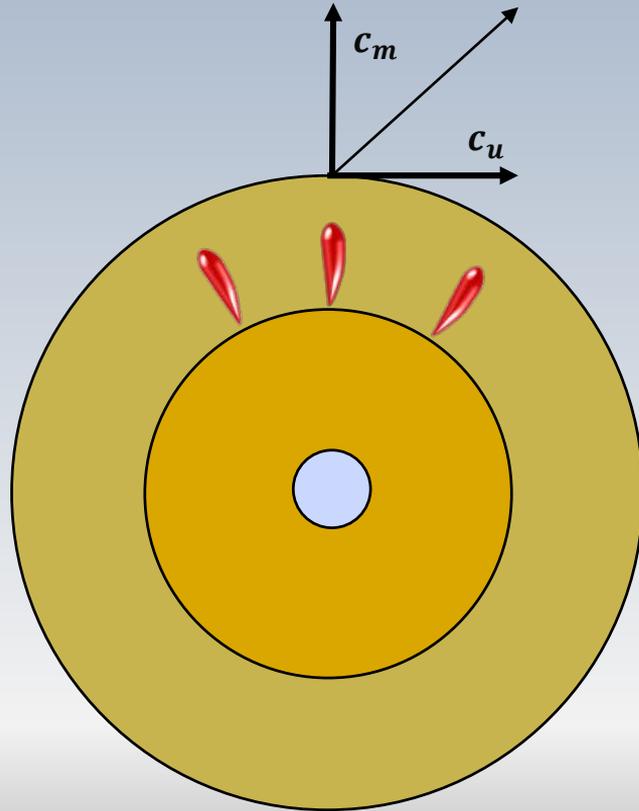
Même avec une entrée axiale, la composante  $c_x$  diminue fortement et très tôt dans le rotor

Voici le plan de projection où l'analyse est faite

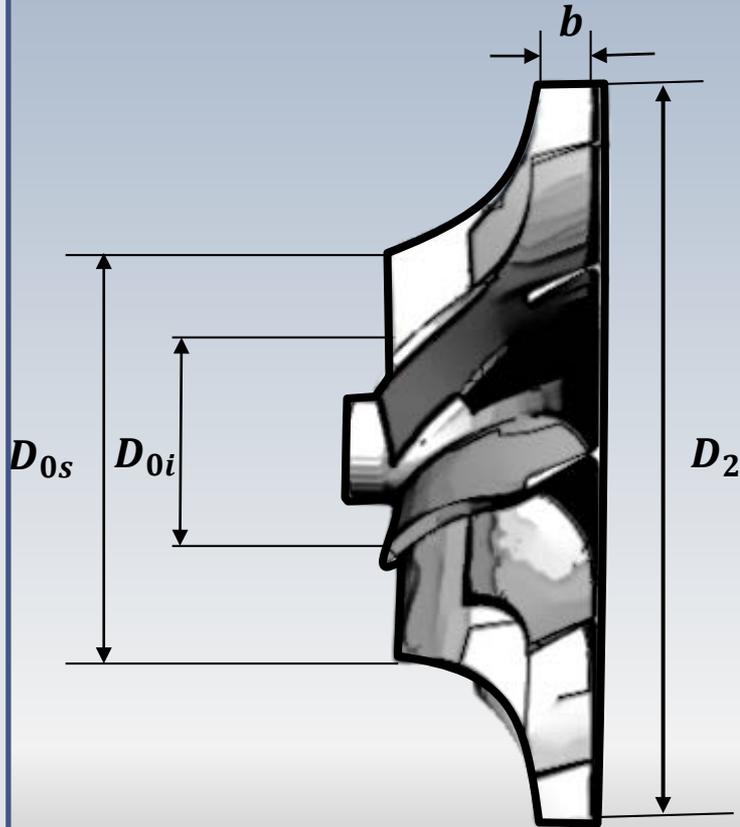
# Rotor simplifié



# Plan d'analyse



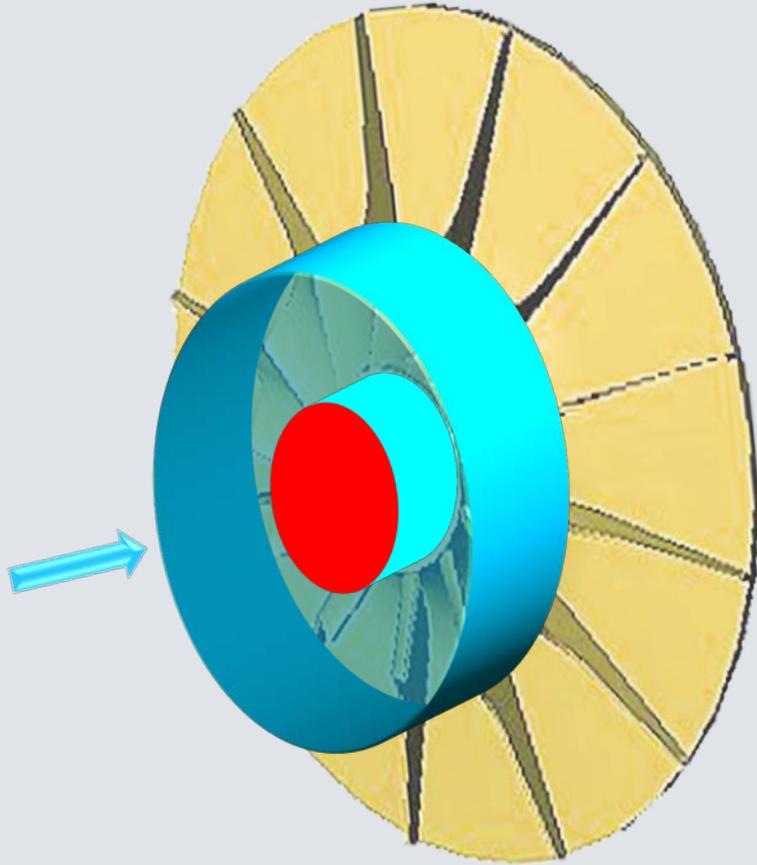
# Dimensions principales



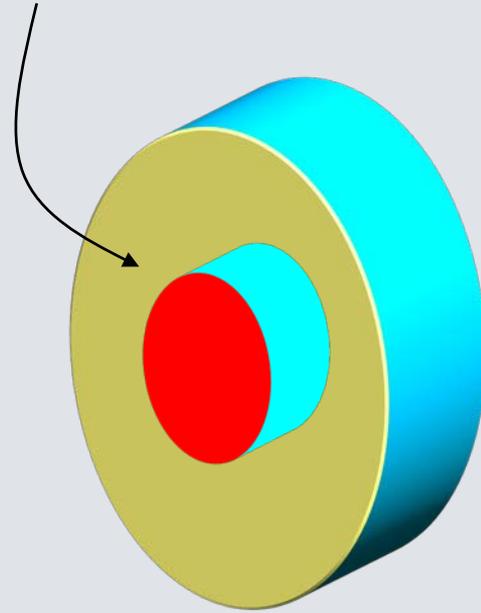
Les dimensions principales employées dans le calcul d'une machine radiale sont:

- $D_{0i}$ , le diamètre inférieur de l'œil
- $D_{0s}$ , le diamètre supérieur de l'œil
- $D_2$ , le diamètre du rotor
- $b$ , l'épaisseur du rotor en sortie

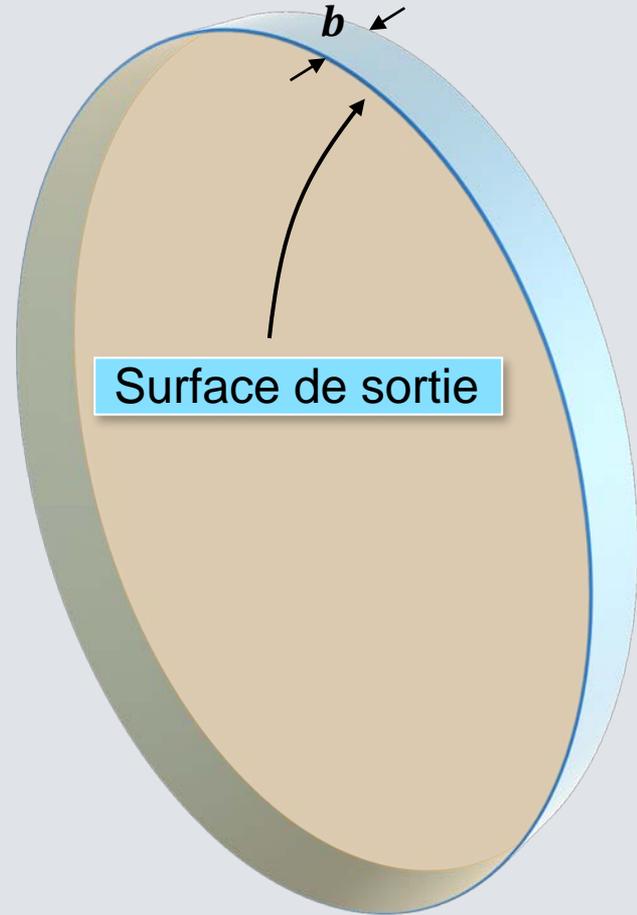
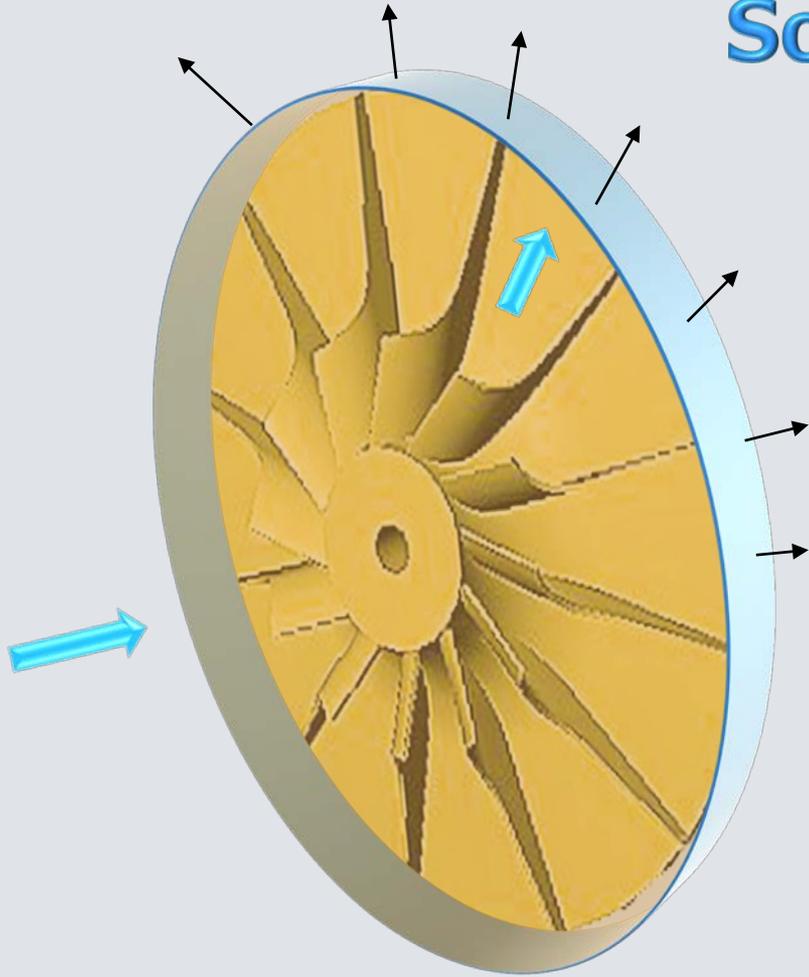
# Entrée



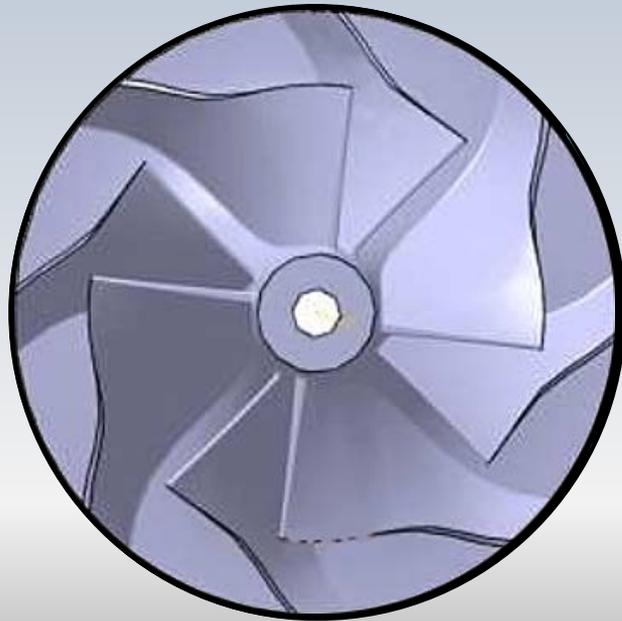
Surface d'entrée



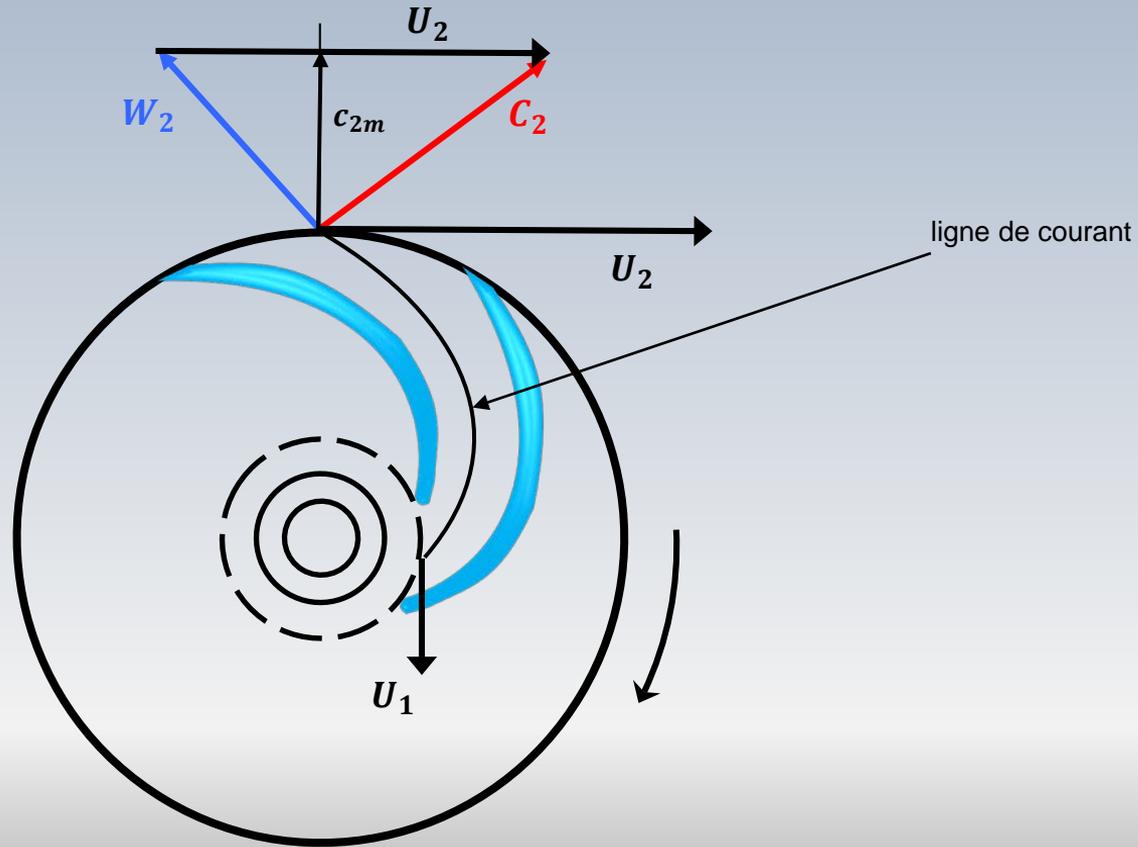
# Sortie



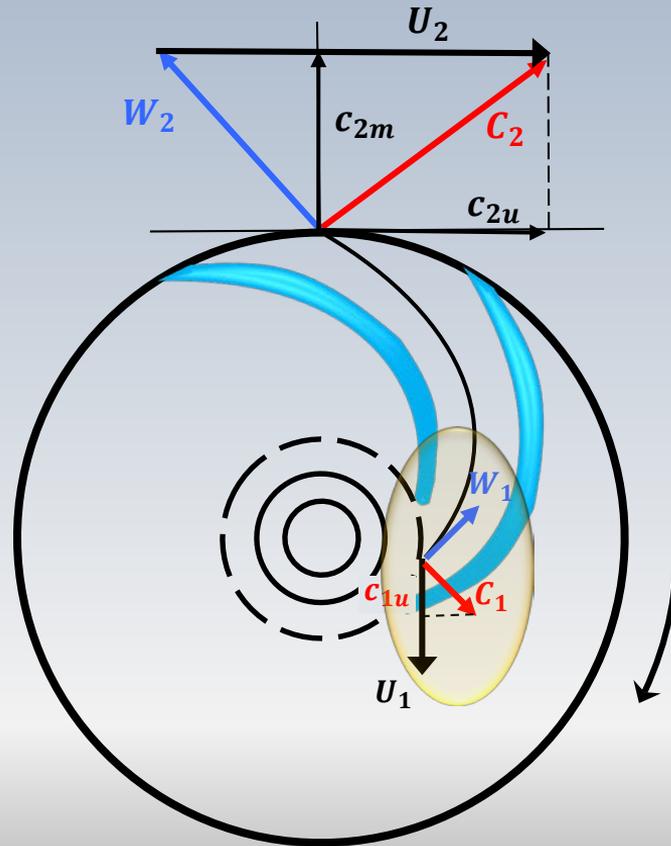
# Rotor en mouvement



# Rotor en mouvement

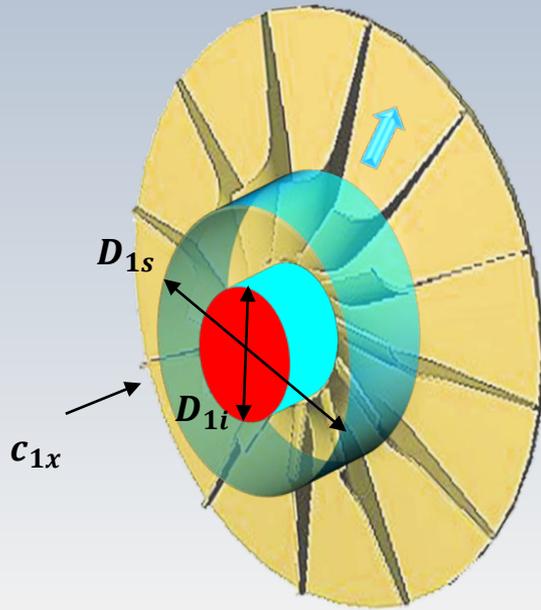


# Rotor en mouvement: entrée



$$\dot{m} = \rho c_2 A_2$$

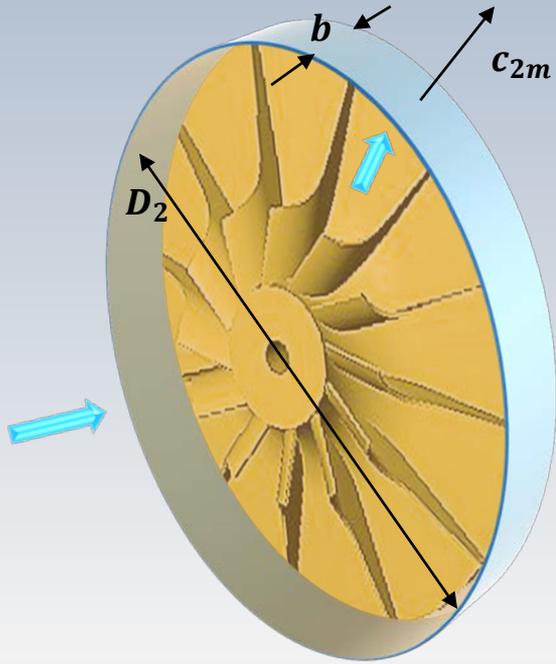
# Débit massique



Pour une entrée axiale, l'équation de conservation de la masse s'écrit:

$$\dot{m} = \rho c_{1x} A_1 = \rho c_{1x} \pi (D_{1s}^2 - D_{1i}^2) / 4$$

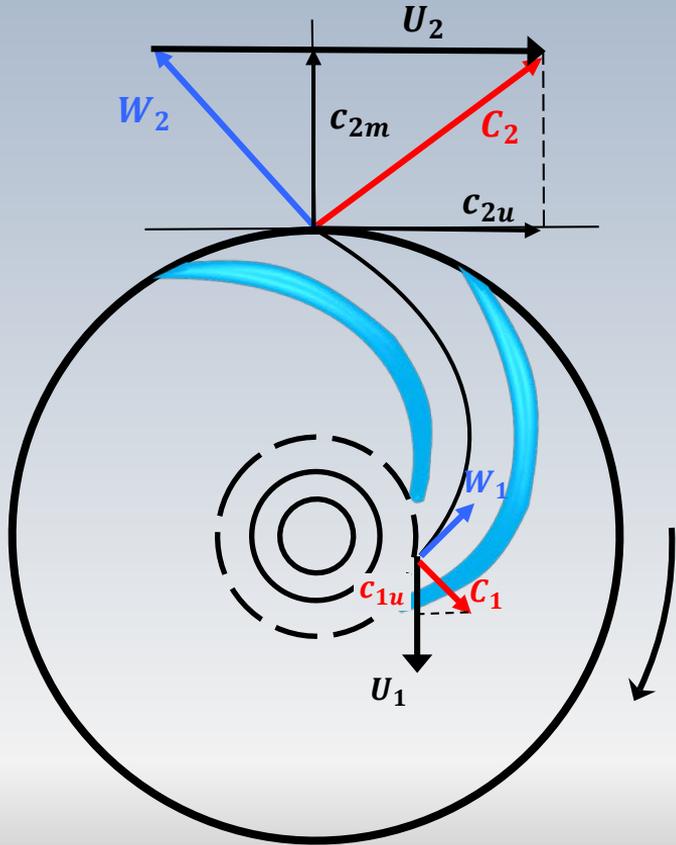
# Débit massique



En périphérie, l'équation de conservation de la masse peut s'écrire:

$$\dot{m} = \rho c_{2m} A_2 = \rho c_{2m} \pi D_2 b$$

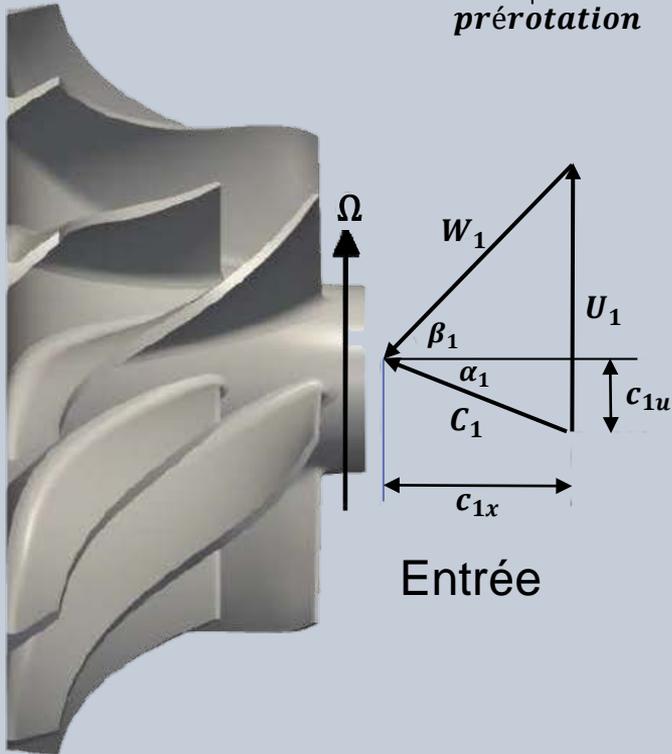
# Équation d'Euler



$$W_e = (c_{2u}U_2 - c_{1u}U_1)$$

# Travail spécifique

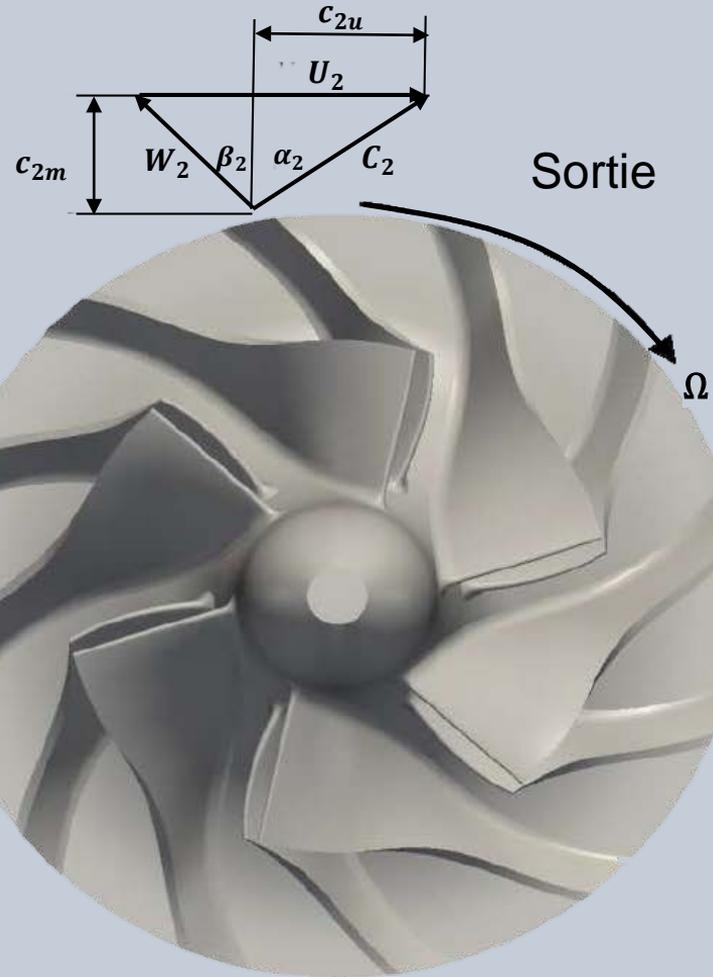
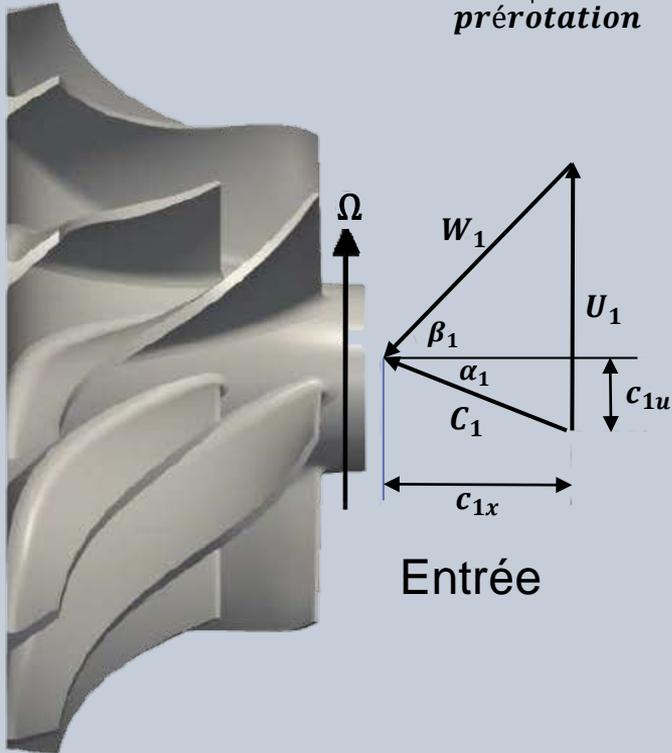
$$W_e = (c_{2u}U_2 - \underbrace{c_{1u}U_1}_{\text{prérotation}})$$



# Travail spécifique

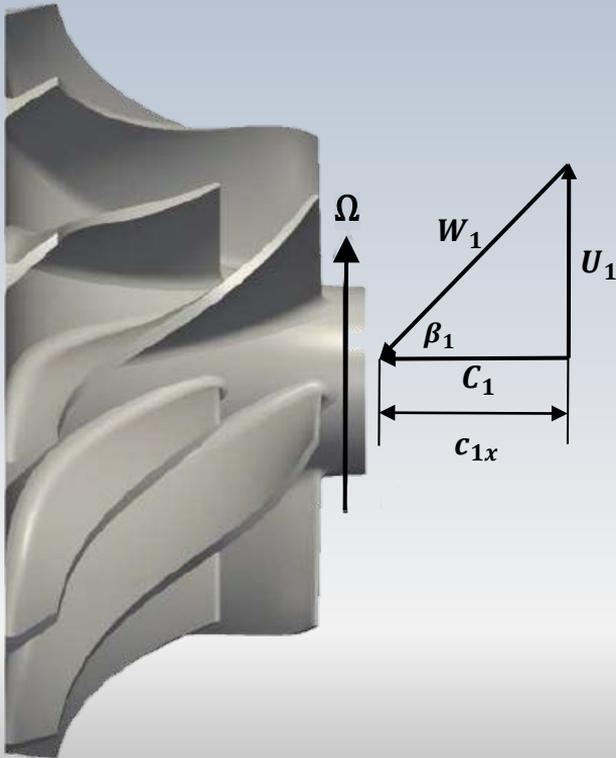
$$W_e = (c_{2u}U_2 - c_{1u}U_1)$$

prérotation



# Prérotation nulle $c_{1u} = 0$

Le cas particulier d'une composante  $c_{1u}$  nulle, est souvent analysé



$$W_e = (c_{2u}U_2 - c_{1u}U_1)$$

# L'inclinaison des pales

La morphologie des roues centrifuges indique, théoriquement, qu'en fonction de l'angle de sortie en périphérie du rotor, les aubes peuvent être:

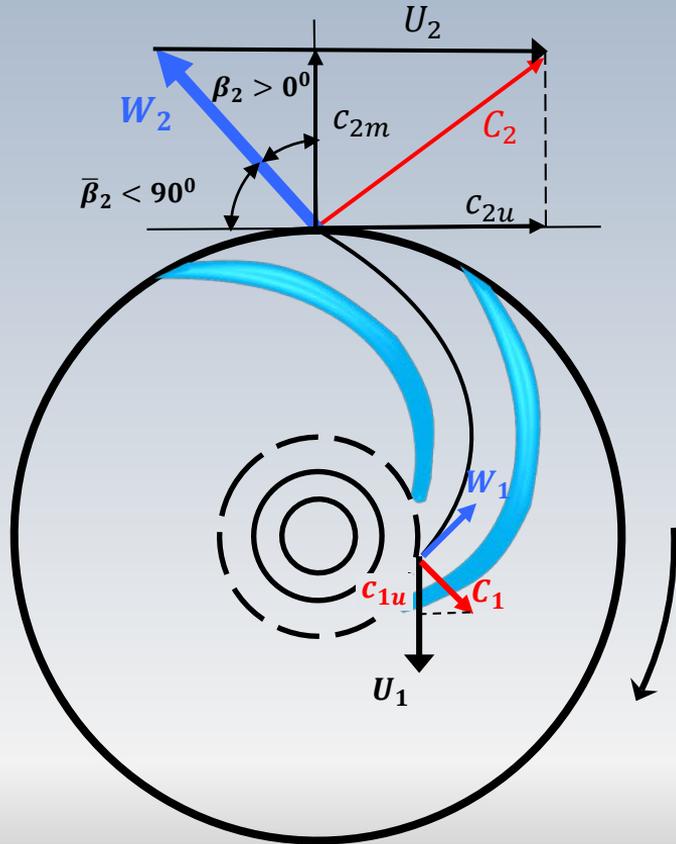
- purement radiales
- orientées vers le sens de l'écoulement (courbées en avant)
- tournés vers l'arrière de l'écoulement (courbées en arrière)

# L'inclinaison des pales

**L'angle des pales** en sortie ont un impact sur la performance du rotor ?

Pour l'analyse, nous allons considérer **l'angle** référée à la **vitesse relative  $W$**  associé à l'inclinaison des pales

# L'angle $\beta_2$



Dans ce contexte, l'angle de sortie des aubes, peut être défini de deux façons complémentaires:

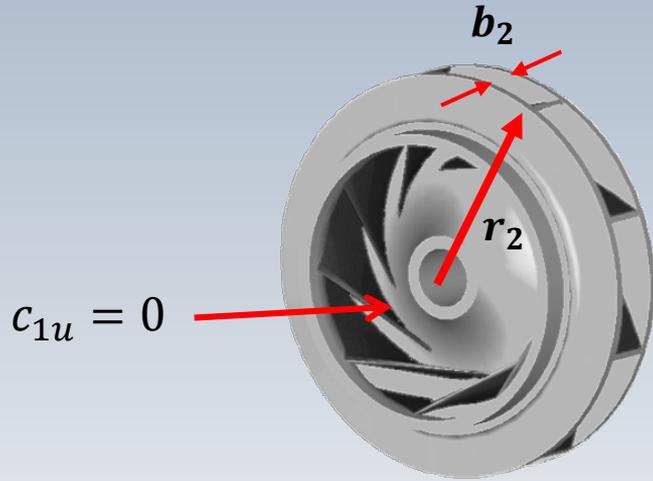
- référé à la direction tangentielle,  $\bar{\beta}_2$
- référé à la direction radiale,  $\beta_2$

# Les rotors centrifuges

Nous rappelons que la théorie de base du rotor centrifuge pour une pompe ou pour un compresseur, est essentiellement la même

Dans le but de prédire, au moins théoriquement, l'effet de la variation de l'angle  $\beta_2$  sur la performance du rotor, nous allons considérer une pompe

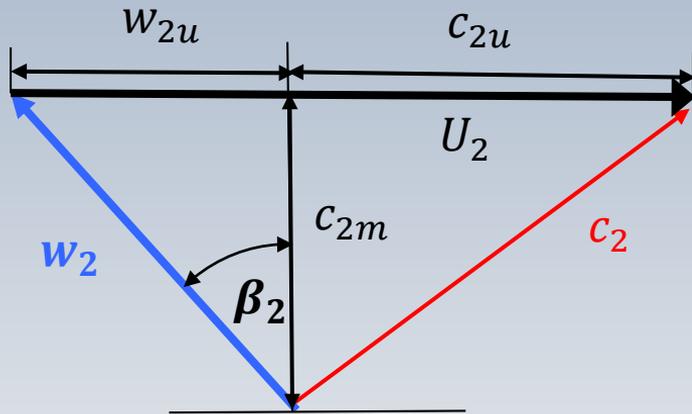
# Les pompes: équation simplifiée



Afin de faciliter l'analyse, un écoulement sans prérotation à l'entrée, c'est-à-dire avec  $c_{1u} = 0$ , sera utilisé. Alors,

$$W_e = (c_{2u}U_2 - c_{1u}U_1)$$

# $H_{\text{idéal}}$ / le débit et l'angle de l'aube

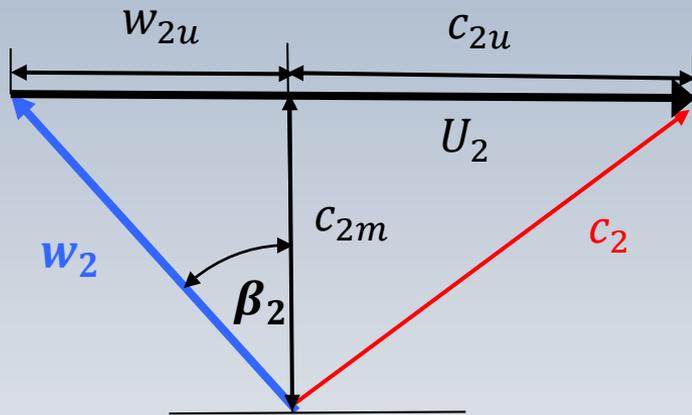


Pour les pompes, on utilise

$$H = \frac{W_e}{g} = \frac{c_{2u} U_2}{g}$$

L'énergie spécifique est ainsi mesurée en mètres

# $H_{\text{idéal}}$ / le débit et l'angle de l'aube



À partir du triangle de vitesses à la sortie, nous obtenons:

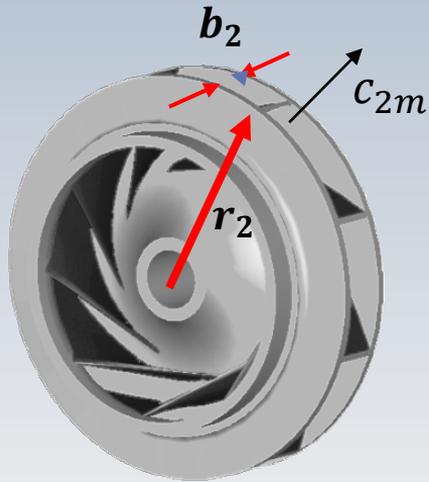
$$\begin{aligned}c_{2u} &= (U_2 - w_{2u}) \\ &= (U_2 - c_{2m} \tan \beta_2)\end{aligned}$$



$$H = \frac{c_{2u} U_2}{g}$$

$$H = \frac{(U_2 - c_{2m} \tan \beta_2) U_2}{g}$$

# $H_{\text{idéal}}$ / le débit et l'angle de l'aube



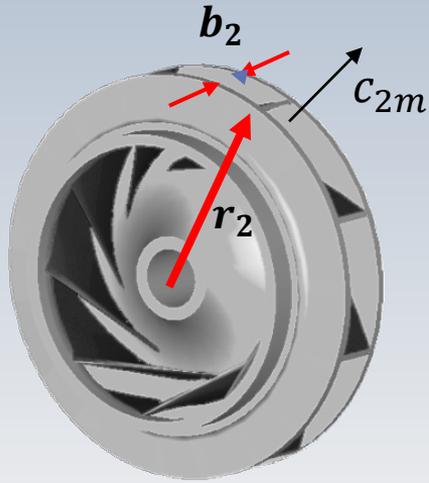
Si dans cette formule nous introduisons le débit volumique,

$$Q = c_{2m} 2\pi r_2 b_2$$

L'équation devient:

$$H = \frac{U_2}{g} \left( U_2 - \frac{Q}{2\pi r_2 b_2} \tan \beta_2 \right)$$

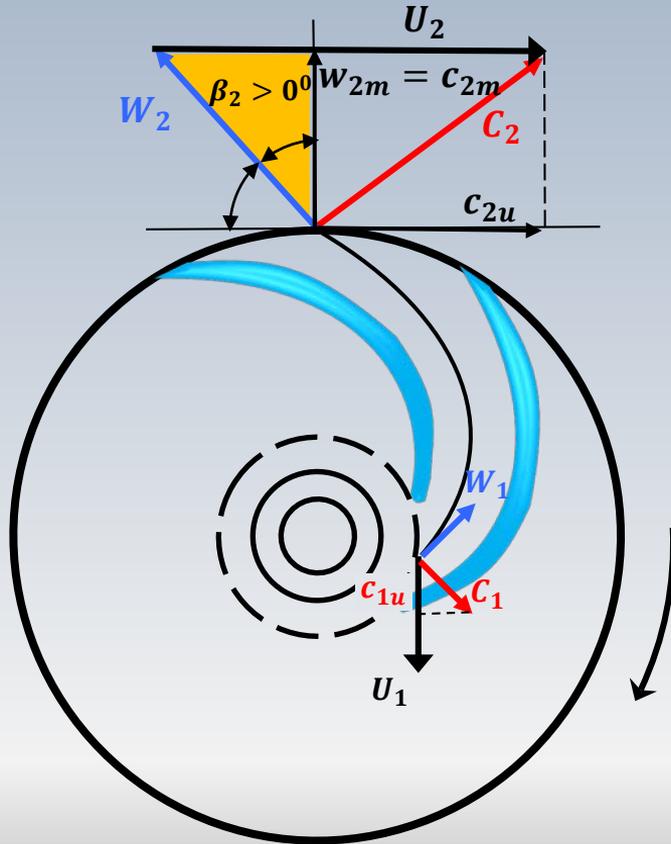
# $H_{\text{idéal}}$ / le débit et l'angle de l'aube



Pour une vitesse  $U_2 = \text{cnste.}$ , nous pouvons analyser l'impact de  $\beta_2$ , sur l'énergie spécifique, pour un débit  $Q$  donné

$$H = \frac{U_2}{g} \left( U_2 - \frac{Q}{2\pi r_2 b_2} \tan \beta_2 \right)$$

# L'angle $\beta_2$



Trois comportements peuvent être analysés en fonction de  $\beta_2$

$$H = \frac{U_2}{g} \left( U_2 - \frac{Q}{2\pi r_2 b_2} \tan \beta_2 \right)$$

# L'inclinaison des pales

$$H = \frac{U_2}{g} \left( U_2 - \frac{Q}{2\pi r_2 b_2} \tan\beta_2 \right)$$

- **Courbées en arrière**

$\beta_2 > 0 \rightarrow \tan\beta_2 > 0$ , la tête  **$H$  diminue** au fur et à mesure que le débit augmente.

- **Radiales**

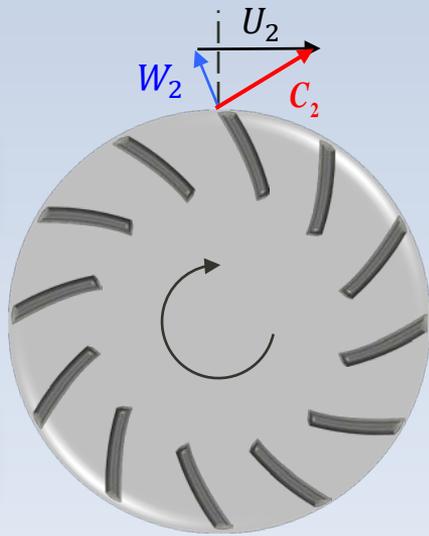
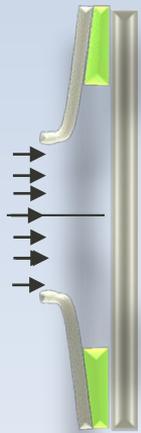
$\beta_2 = 0$  la tête  **$H$  ne change pas** avec la variation du débit. Ce type de rotor est plus facile à construire

- **Courbées en avant**

$\beta_2 < 0 \rightarrow \tan\beta_2 < 0$ : la tête  **$H$  augmente** avec le débit. La vitesse  $c_2$  est élevée, ce qui demande un diffuseur plus grand.

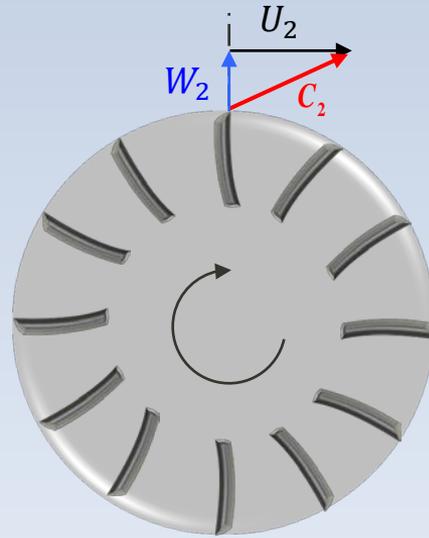
$\beta_2$  est mesurée par rapport à la direction radiale dans le sens contraire à la rotation

# Resumé: $\beta_2$ et $c_2$



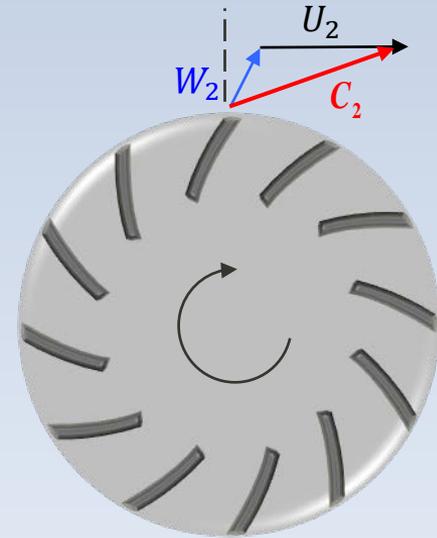
$$\beta_2 > 0$$

En arrière



$$\beta_2 = 0$$

Radial



$$\beta_2 < 0$$

En avant

# Remarque

Si au lieu d'une pompe, nous parlons d'un compresseur, la formule correspondante pour exprimer la variation d'énergie en fonction de l'angle  $\beta_2$  est

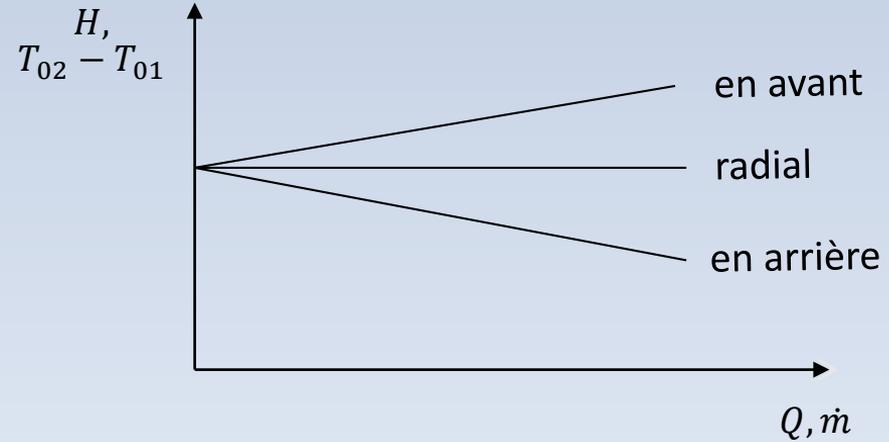
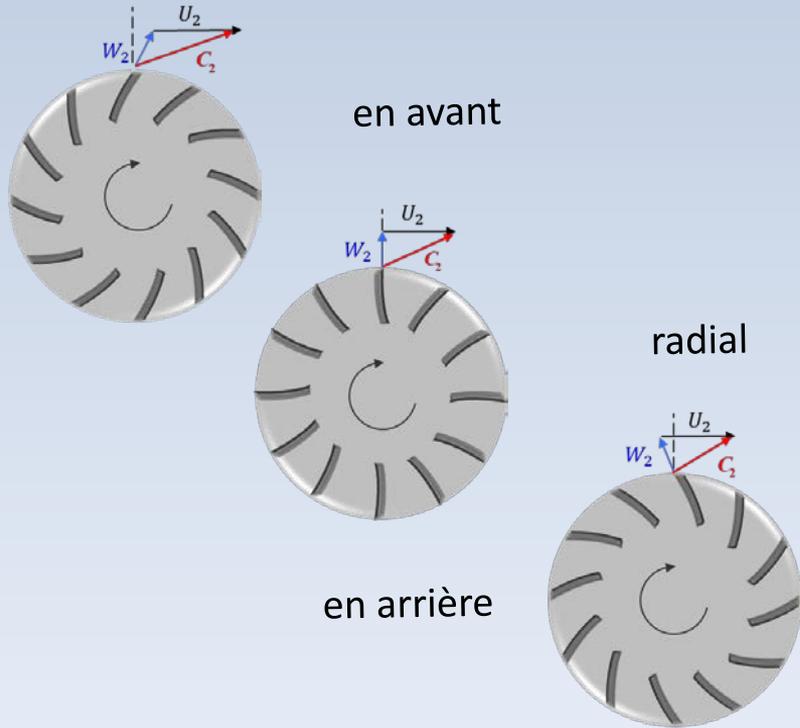
$$T_{02} - T_{01} = T_{01}(\gamma - 1) \left( \frac{U_2}{a_{01}} \right)^2 \left( 1 - \frac{\dot{m}}{\pi D_2 b_2 \rho_2 U_2} \tan \beta_2 \right)$$

$$a_{01} = \sqrt{\gamma R T_{01}}$$

La variation de température (travail) peut être contrôlée en faisant varier l'angle des pales  $\beta_2$  à la sortie du rotor

# Resumé: $H$ , $\beta_2$ et $Q$

$$H = \frac{U_2}{g} \left( U_2 - \frac{Q}{2\pi r_2 b_2} \tan\beta_2 \right)$$



$$T_{02} - T_{01} = T_{01}(\gamma - 1) \left( \frac{U_2}{a_{01}} \right)^2 \left( 1 - \frac{\dot{m}}{\pi D_2 b_2 \rho_2 U_2} \tan\beta_2 \right)$$

# Forme adimensionnelle

Pour un compresseur la formule pour la variation de température peut être arrangée comme

$$\underbrace{\frac{T_{02} - T_{01}}{T_0(\gamma - 1) \left(\frac{U_2}{a_{01}}\right)^2}}_{\psi} = \left( 1 - \underbrace{\frac{W_{2m}}{U_2} \tan\beta_2}_{\Phi_2} \right)$$

$$\Psi = (1 - \Phi_2 \tan\beta_2)$$

$$\Phi_2 = \frac{W_{2m}}{U_2} = \frac{C_{2m}}{U_2}$$

$$a_{01} = \sqrt{\gamma R T_{01}}$$

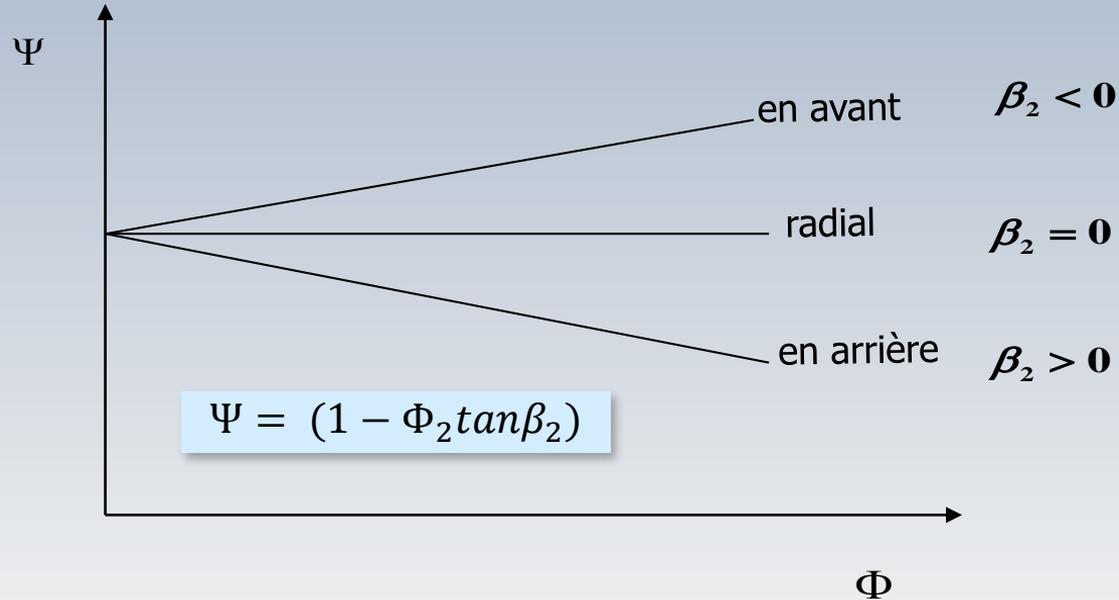
# Forme adimensionnelle

Pour une pompe la formule pour la tête  $H = \frac{(U_2 - c_{2m} \tan \beta_2) U_2}{g}$  peut être arrangée comme

$$\underbrace{\frac{gH}{U_2^2}}_{\Psi} = \left( 1 - \underbrace{\frac{c_{2m}}{U_2} \tan \beta_2}_{\Phi_2} \right) \quad \Phi_2 = \frac{c_{2m}}{U_2}$$

$$\Psi = (1 - \Phi_2 \tan \beta_2)$$

# Représentation adimensionnelle



# Remarques

Aujourd'hui, la grande majorité des machines utilisent des aubes courbés vers l'arrière. Ce type d'aubage:

- produit la plus petite vitesse absolue à la sortie. Les diffuseurs pour traduire l'énergie cinétique en pression sont ainsi plus petits
- permet une plus grande plage de vitesse de rotation, tout en gardant un rendement acceptable

