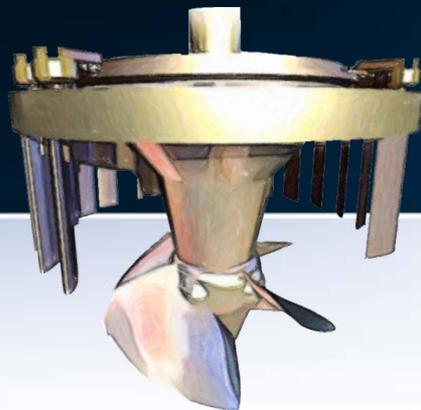


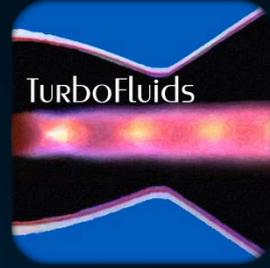
Turbomachines



NRJ EN ROTATION



Turbine Francis



T H É O R I E
 PLUS COMPLETE DES MACHINES
 QUI SONT MISES EN MOUVEMENT
 PAR LA RÉACTION DE L'EAU.

PAR M. EULER.

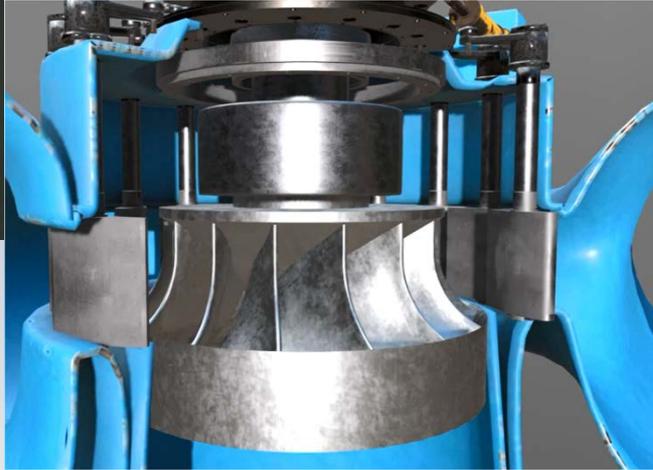
Ayant déjà expliqué en quelques Mémoires l'effet, que la Machine projetée par Mr. de Segner à Halle est capable de produire, je me propose ici de développer cette même matière plus soigneusement. Les forces, par lesquelles cette machine est mise en mouvement, sont tirées de la réaction de l'eau, dont la machine est remplie, & qui en sort en bas par des ouvertures : car, puisque cette machine est mobile autour d'un axe vertical, & que l'eau en échape horizontalement, il résulte de la réaction de l'eau un moment de forces, qui tend à faire tourner la machine autour de son axe, & qui la rend même capable de surmonter quelque résistance, ou bien de produire quelque effet. Or, dans la recherche que j'ai faite de cette machine, j'ai supposé un vaisseau cylindrique, au fond duquel sont attachés des tuyaux horizontaux, par lesquels l'eau échape, & ayant regardé le mouvement de l'eau dans le vaisseau comme connu, j'ai cherché le mouvement par les tuyaux attachés, avec la force de réaction, qu'ils en soutiennent. Cette supposition a été faite pour rendre la recherche plus facile : car, si j'avois voulu continuer les tuyaux jusqu'en haut de la surface de l'eau, la détermination de la réaction de l'eau seroit devenuë plus embarrassante. Quoique cette circonstance n'apporte aucune atteinte à la justesse de la détermination, après que j'y ai ajouté la rectification, qui lui convient à cause du mouvement de l'eau par le vaisseau cylindrique, il n'y a aucun doute que cette recherche ne seroit plus com-

soigneusement.

Types de rotor



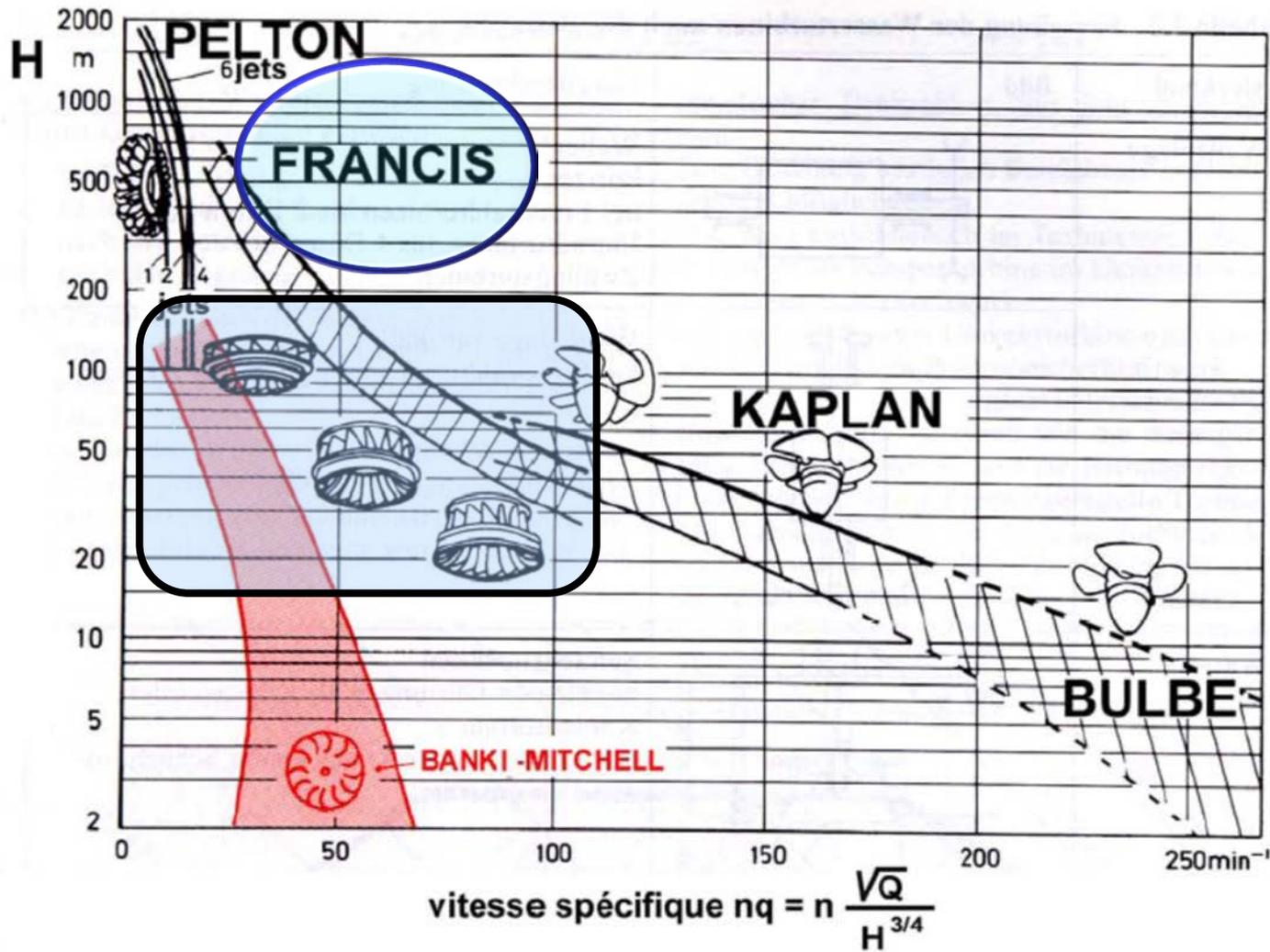
Pelton



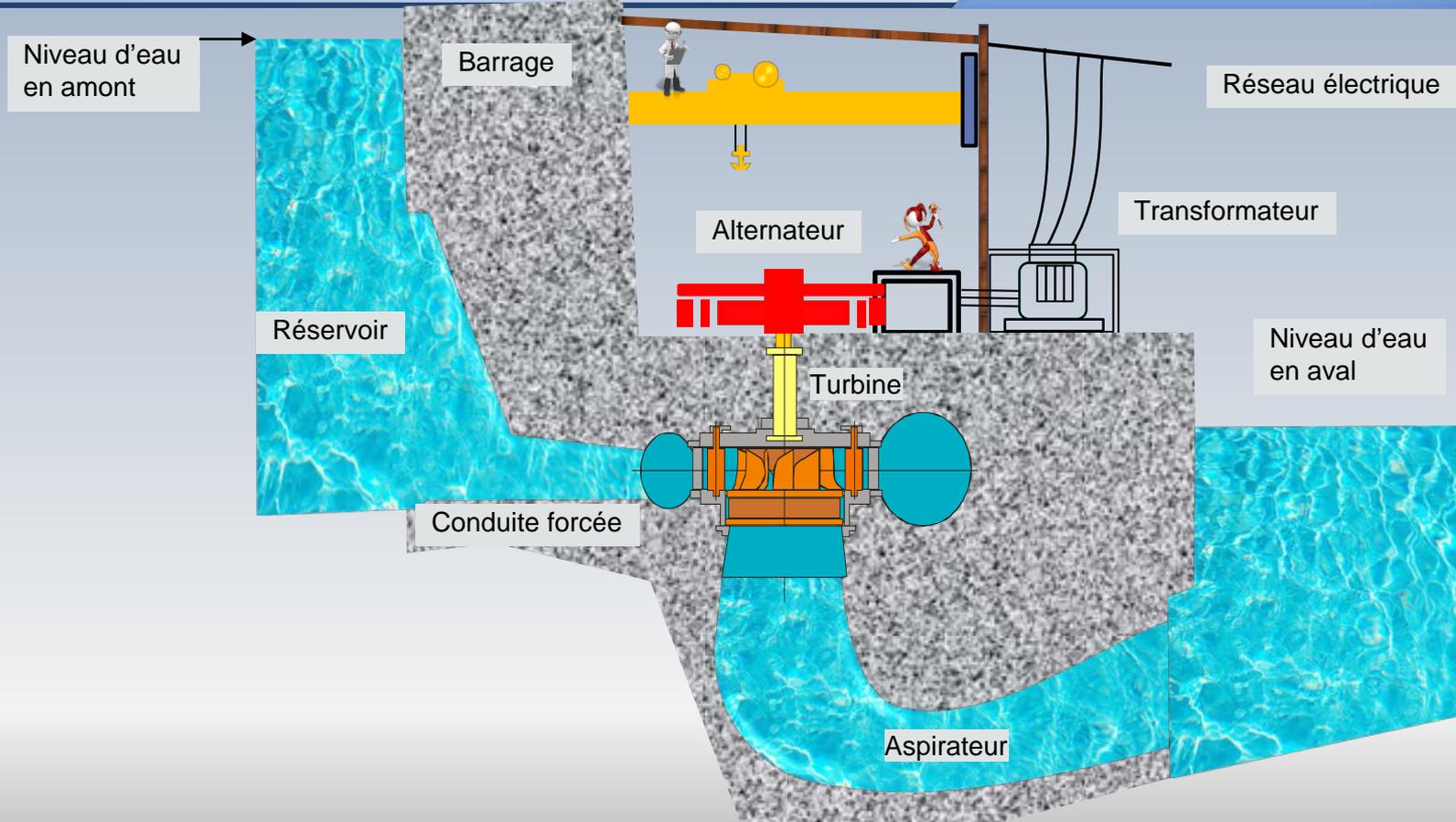
Francis

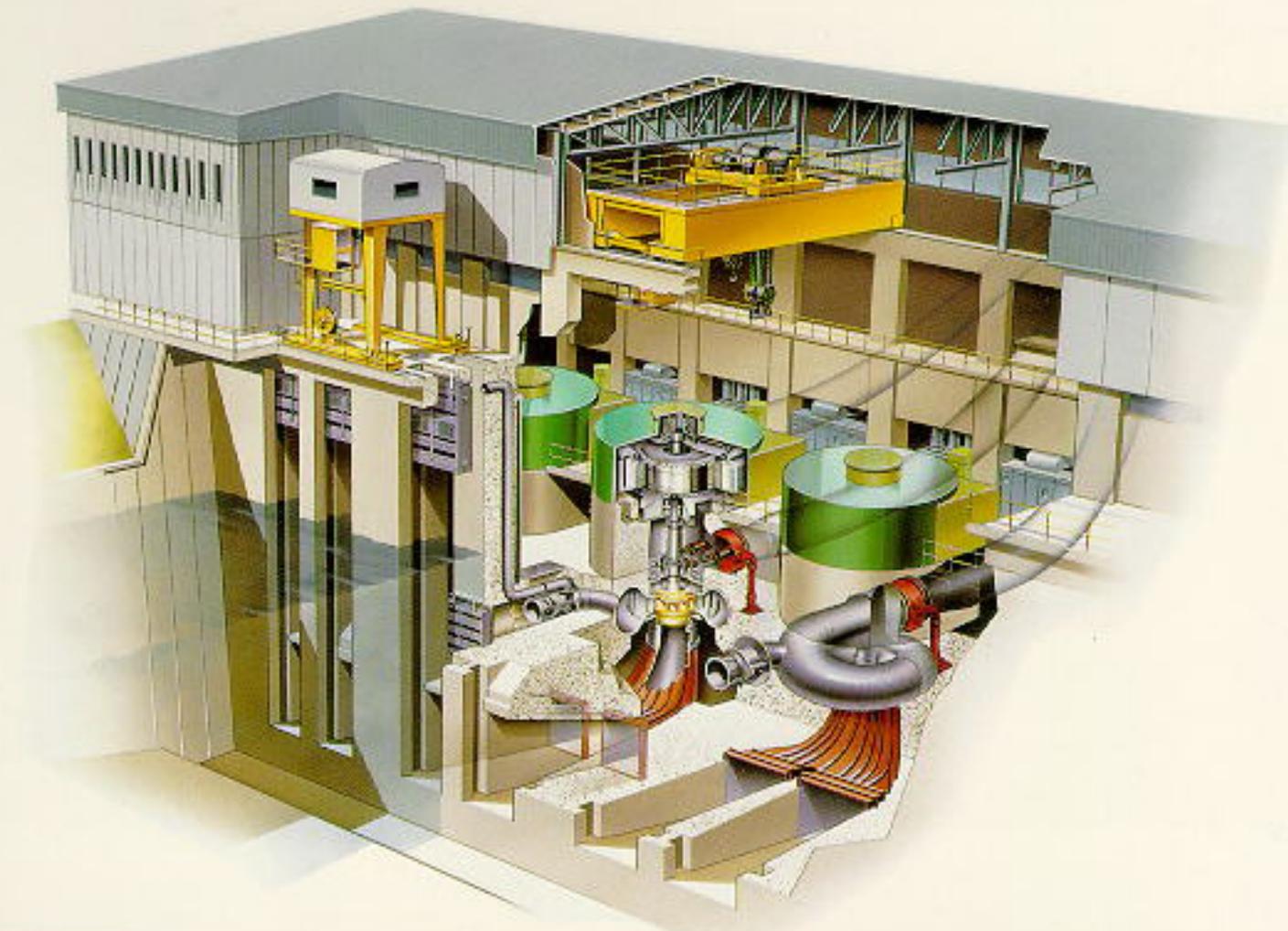
Kaplan

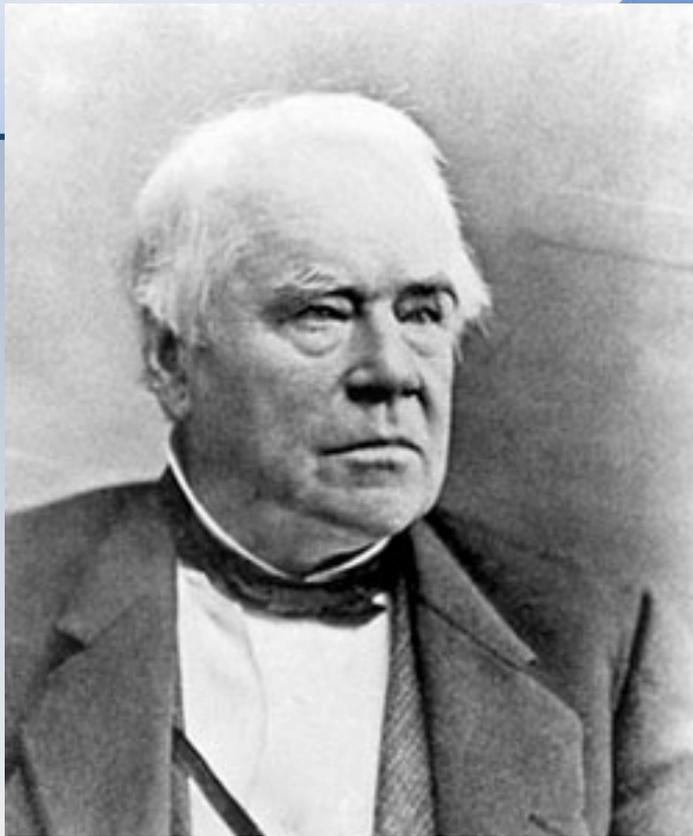




Aménagement hydroélectrique







J.B. Francis

EXPERIMENTS ON HYDRAULIC MOTORS,

I

ON THE

FLOW OF WATER OVER WEIRS, IN OPEN CANALS OF UNIFORM RECTANGULAR SECTION, AND THROUGH SUBMERGED ORIFICES AND DIVERGING TUBES.

MADE AT LOWELL, MASSACHUSETTS.

BY

JAMES B. FRANCIS,

CIVIL ENGINEER, MEMBER OF THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS AND ARCHITECTS,
FELLOW OF THE AMERICAN ACADEMY OF ARTS AND SCIENCES, MEMBER
OF THE AMERICAN PHILOSOPHICAL SOCIETY, ETC.

SECOND EDITION,

REVISED AND ENLARGED, WITH MANY NEW EXPERIMENTS,

And Illustrated

WITH TWENTY-THREE COPPER-PLATE ENGRAVINGS.

NEW YORK:

D. VAN NOSTRAND, 192 BROADWAY.

LONDON: TRÜBNER & CO.

1868.

PREFACE TO THE SECOND EDITION.

SINCE the first edition of this work appeared, in 1855, the manufacturing corporations at Lowell, lessees of the water-power furnished by the Merrimack River at that point, have surrendered their leases and taken others containing new provisions for the purpose of more fully protecting all parties in the enjoyment of their respective rights; this has rendered necessary a new and elaborate series of experiments for the purpose of perfecting the method of gauging the flow of water in open channels by the use of



LOWELL, MASS., March, 1868.

Description générale

Dans les turbines Francis, avant la roue, une partie de l'énergie potentiel, déjà sous la forme d'énergie de pression, est traduite en énergie cinétique dans les **avant directrices (statiques)**

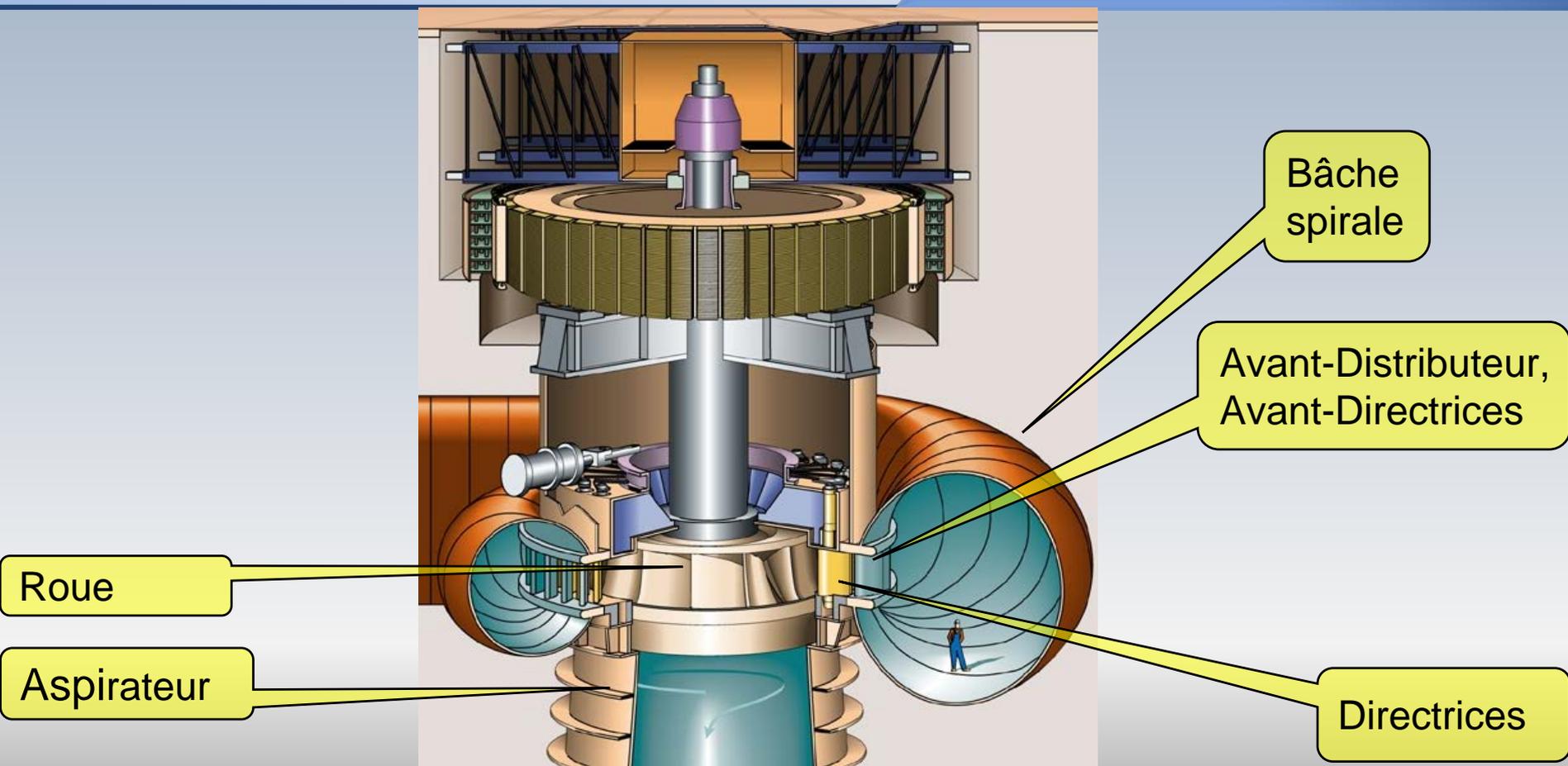
Dans **la roue**, l'écoulement subit des changements de direction et de pression. Ces variations sont transmises aux aubes de la machine, dont l'origine du nom de **réaction**

Description générale

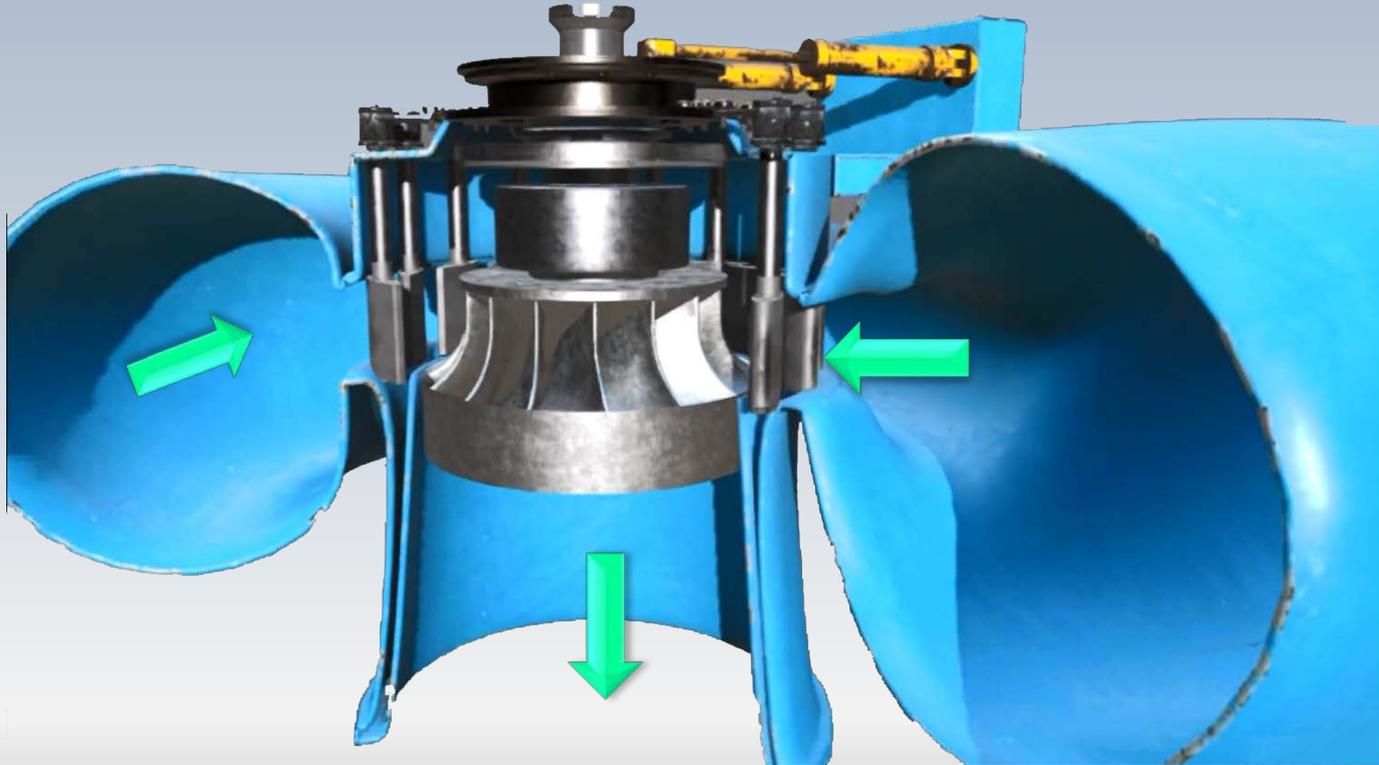
Bien que la vitesse absolue et la pression diminuent lors du passage dans le rotor, à la sortie demeure une quantité d'énergie cinétique résiduelle

Le diffuseur, situé en aval de la roue, permet de traduire cette énergie cinétique en pression et produit un effet "d'aspiration" à la sortie du rotor. Ceci, est bénéfique pour l'accroissement de la puissance transmise à la roue

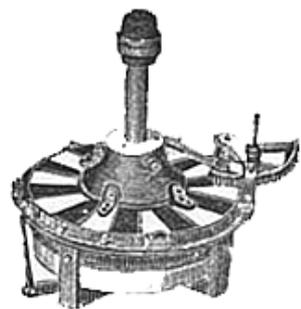
Composantes



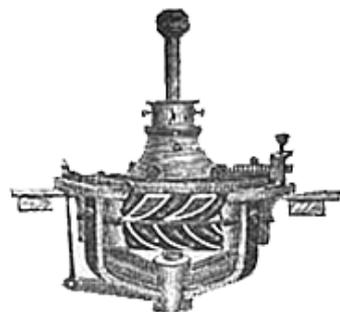
Écoulement



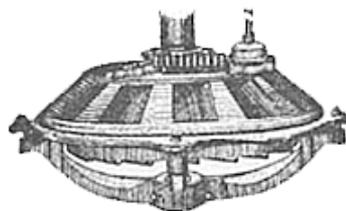
Les turbines au XIX siècle



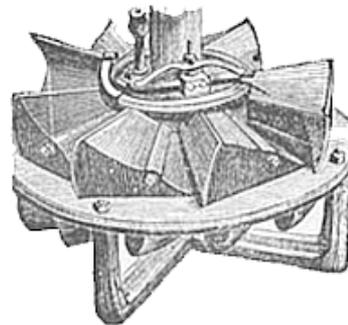
BODINE JONVAL.



ELMER.



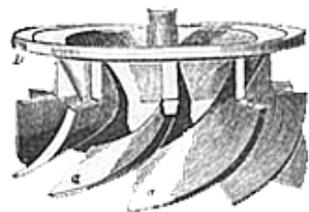
HOUSTON.



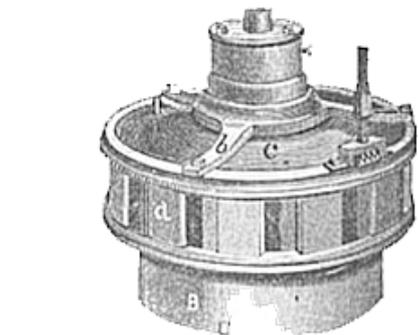
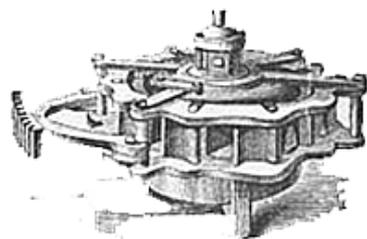
CASE.



DELPHOS.

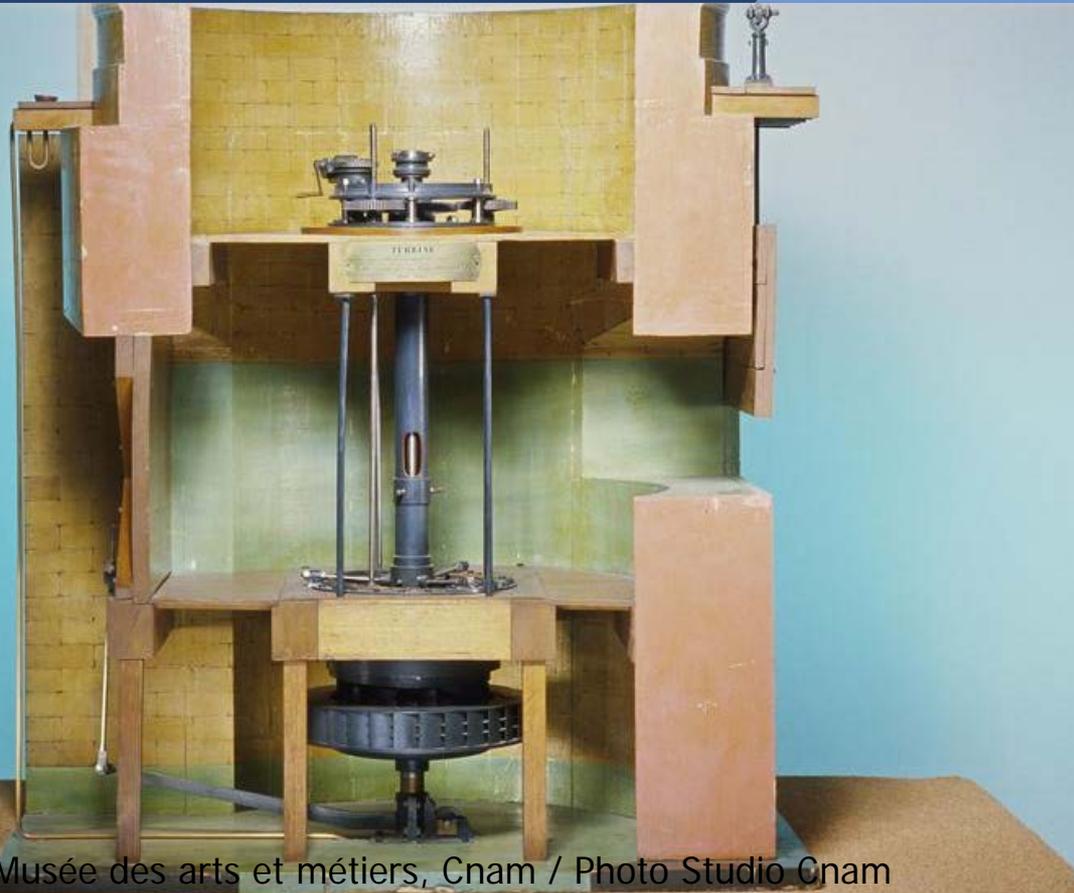


BLACKSTONE.



VANDEWATER-BURNHAM.

La turbine de B. Fourneyron



Maquette faite en bois, cuivre fer, laiton et acier (129 x 114 x 83 cm, 135 kg)
Elle a été fabriquée en 1844 par M. Eugène Philippe d'après l'idée de M. Benoît Fourneyron



La turbine de B.Fourneyron



L'eau circule du centre vers la périphérie. La partie mobile est à l'extérieur



Deutsches Museum : Munich

DÉS

MOTEURS HYDRAULIQUES

COMPRENANT

LES NOTIONS PRÉLIMINAIRES SUR L'HYDRAULIQUE, LES CALCULS ET TABLES SUR LES DÉPENSES D'EAU,
LES APPLICATIONS AUX ROUES A AUBES PLANES ET A AUBES COURBES,
AUX ROUES A AIGET RECEVANT L'EAU SUR LE SOMMET ET SUR LE CÔTÉ,
ET AUX TURBINES OU ROUES HORIZONTALES DE DIVERS SYSTÈMES.

PAR ARMENGAUD AINÉ

INGÉNIEUR, ANCIEN PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL DES ARTS ET MÉTIERS

NOUVELLE ÉDITION

Entièrement refondue et accompagnée d'un Atlas de 20 planches in-folio
AVEC UN GRAND NOMBRE DE FIGURES SUR BOIS INSTRIÈRES D'APRÈS LE TRAVAIL

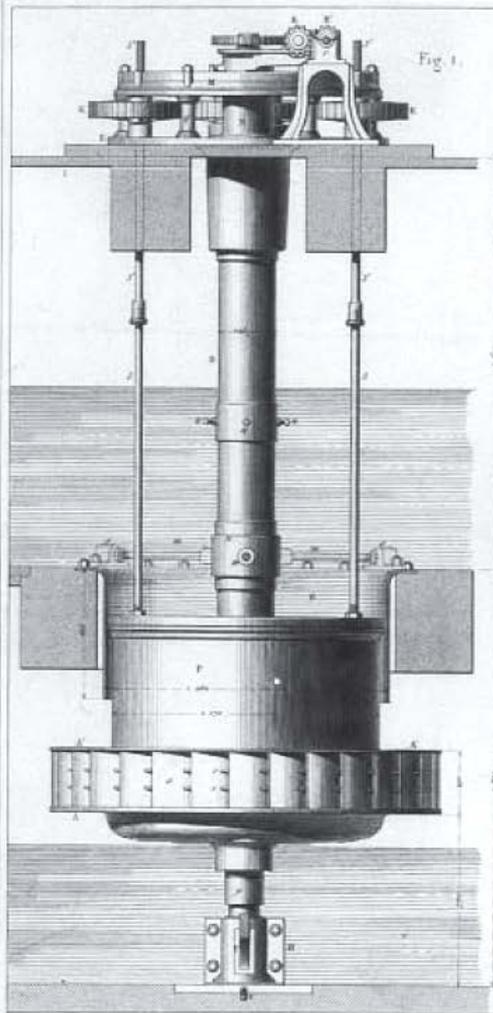


Fig. 1.

Fig. 2.

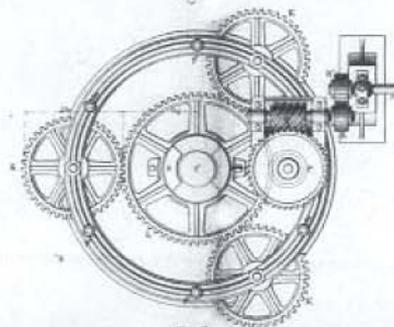
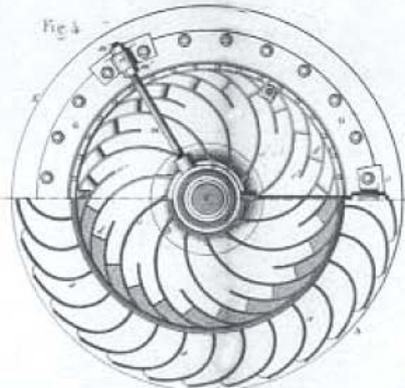


Fig. 3.



Fig. 4.



Planch. N. 101

PARIS

CHEZ L'AUTEUR, RUE SAINT-SÉBASTIEN, 45

ET CHEZ LES PRINCIPAUX LIBRAIRES DE LA FRANCE ET DE L'ÉTRANGER

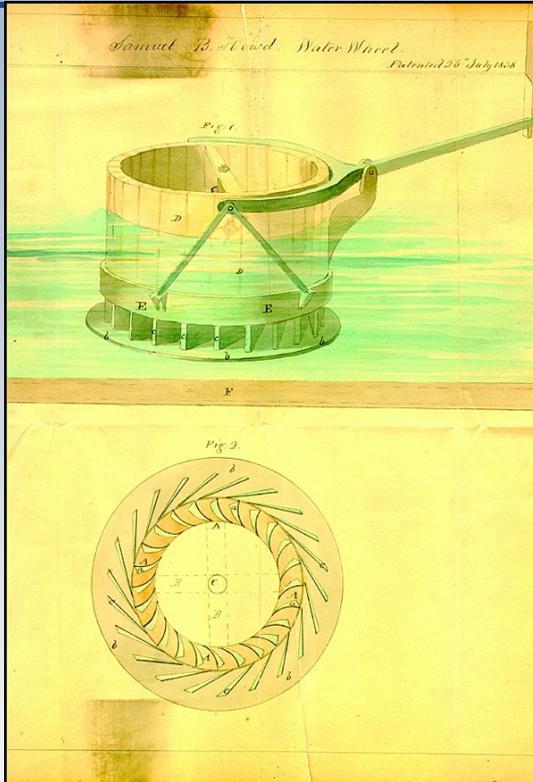
1858

Un changement de direction

James B. Francis collaborait étroitement avec M. Uriah A. Boyden dans l'essai des premières turbines américaines de type Fourneyron. En **1847** il a testé avec succès un prototype de turbine de Fourneyron dont l'écoulement de l'eau était dans le sens inverse, c'est-à-dire, de la périphérie vers le centre. Un tel type de roue avait été suggéré par V. Poncelet en 1826 et un brevet avait été accordé à M. Samuel B. Howd, de Geneva, N. Y., en 1836 pour ce concept.

Dans un premier temps, la turbine n'était qu'une Fourneyron inverse, mais rapidement il a été conclu qu'il fallait aussi tourner les aubes vers le bas pour augmenter son efficacité.

Le brevet de Samuel Howd, 1836



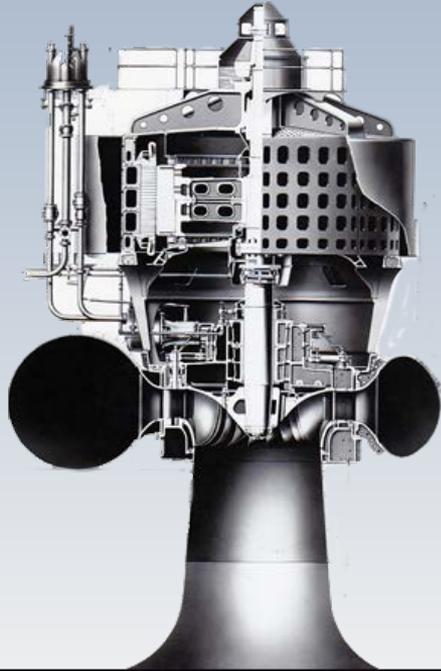
Patent drawing for water wheel, 1838
Samuel B. Howd, Geneva, New York
ink and watercolor on paper

Doodles, Drafts and Designs: Industrial Drawings from the Smithsonian



Smithsonian Institution
<http://www.si.si.edu/exhibitions/doodles>

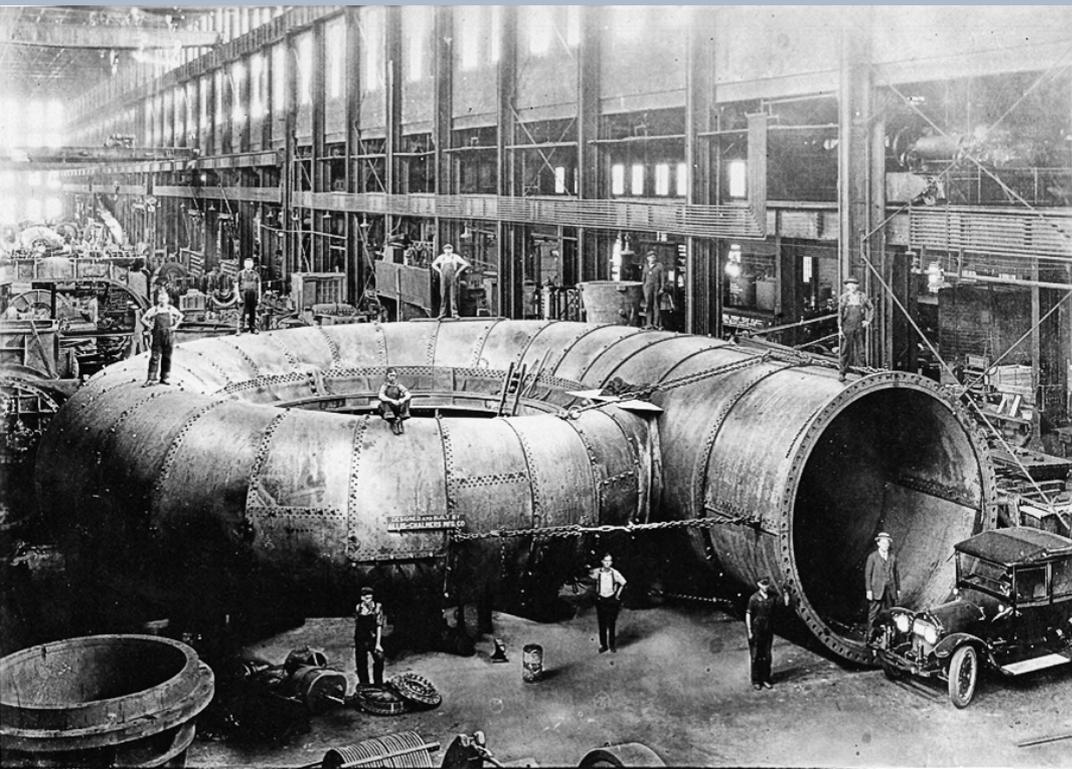
Développement industriel



89331 : 37,500 HP., 214 ft. head, 32,500 Kw.-A., 12,000 Volts,
Allis-Chalmers Mfg. Co.: 150 RPM, Combined Hydro-Electric Unit. Built for
: The Niagara Falls Power Company.

En **1919**, la Niagara Power Co. a installé trois turbines de **37,500 HP** opérant à 150 rpm pour une chute de **213,5 m**. Les 2 unités fournies par I. P. Morris Co. ont montrée une **efficacité de 93,3%** sur le terrain et l'unité fournie par Allis Chalmers Mfg Co., a atteint approximativement la même efficacité.

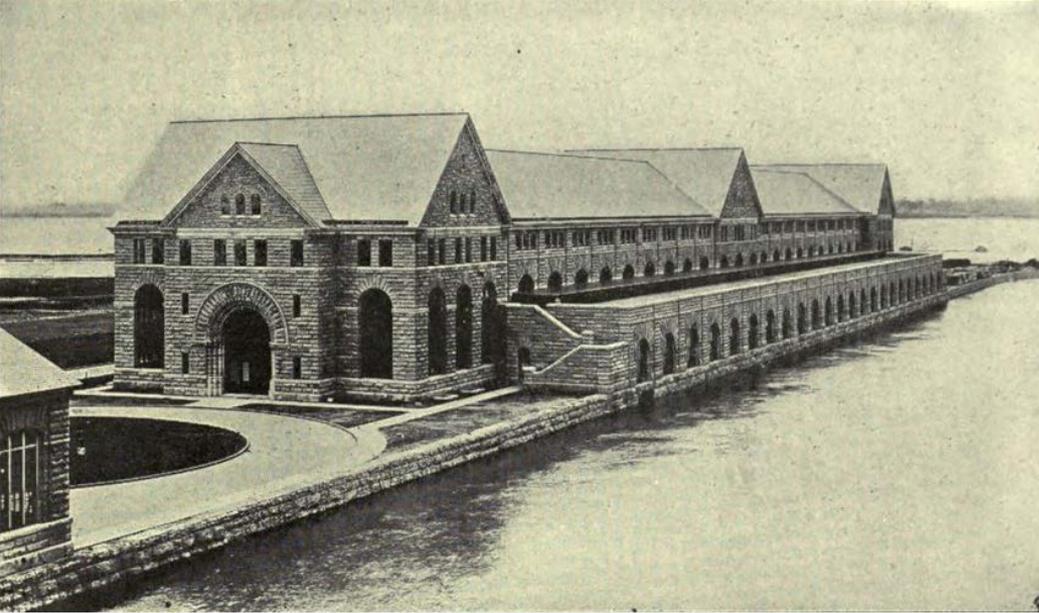
Développement industriel



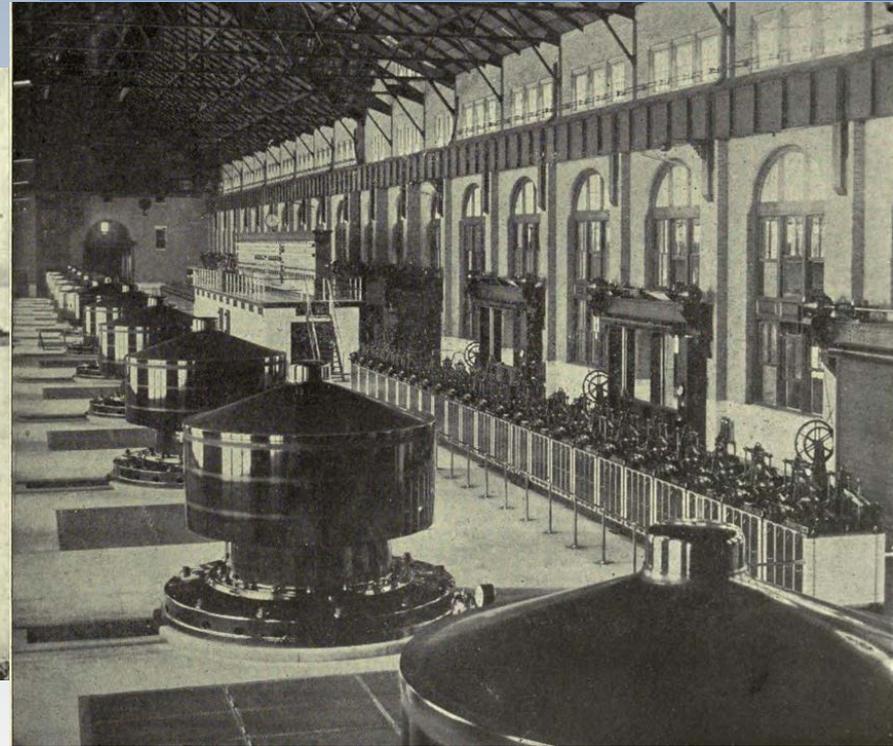
En **1923**, la Niagara Falls Power Co. a installé trois autres turbines pour la tête de 213,5 m, mais opérant à **107 rpm** pour une production de puissance de **70,000 HP** par unité. C'était la plus grande installation de l'époque. Les unités de I.P. Morris et de l'Allis Chalmers ont atteint encore le même **rendement**, à savoir **93,8%**.

No. 92171 Plate Steel Spiral Gasing for 70000 H.P., 213' Hd., 107 RPM,
Allis-Chalmers Sing. Vert. Pl. St. Spiral Cased Hydraulic Turbine. Gasing
Mfg. Co. inlet dia. 15'. Plate thicknesses 7/8" to 1 1/4". Overall dia.
50'. Niagara Falls Power Co.

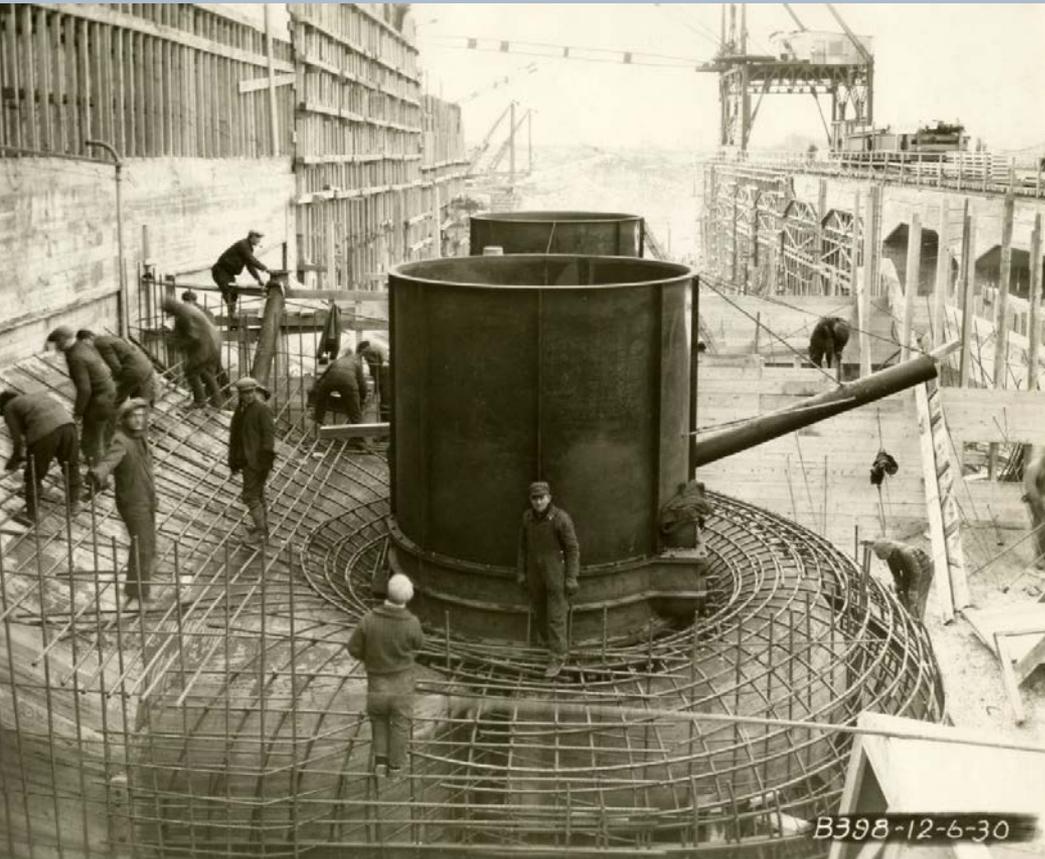
Développement industriel



Niagara Falls Power Co



Développement industriel



La centrale de **Beauharnois** au fil de l'eau sur le fleuve Saint Laurent a été construite en trois phases entre **1929 et 1961**. Après réhabilitation, elle compte avec 38 groupes turbines-alternateurs pouvant produire **1903 MW**

La centrale en 1930

B398-12-6-30





Turbines modernes

Roue



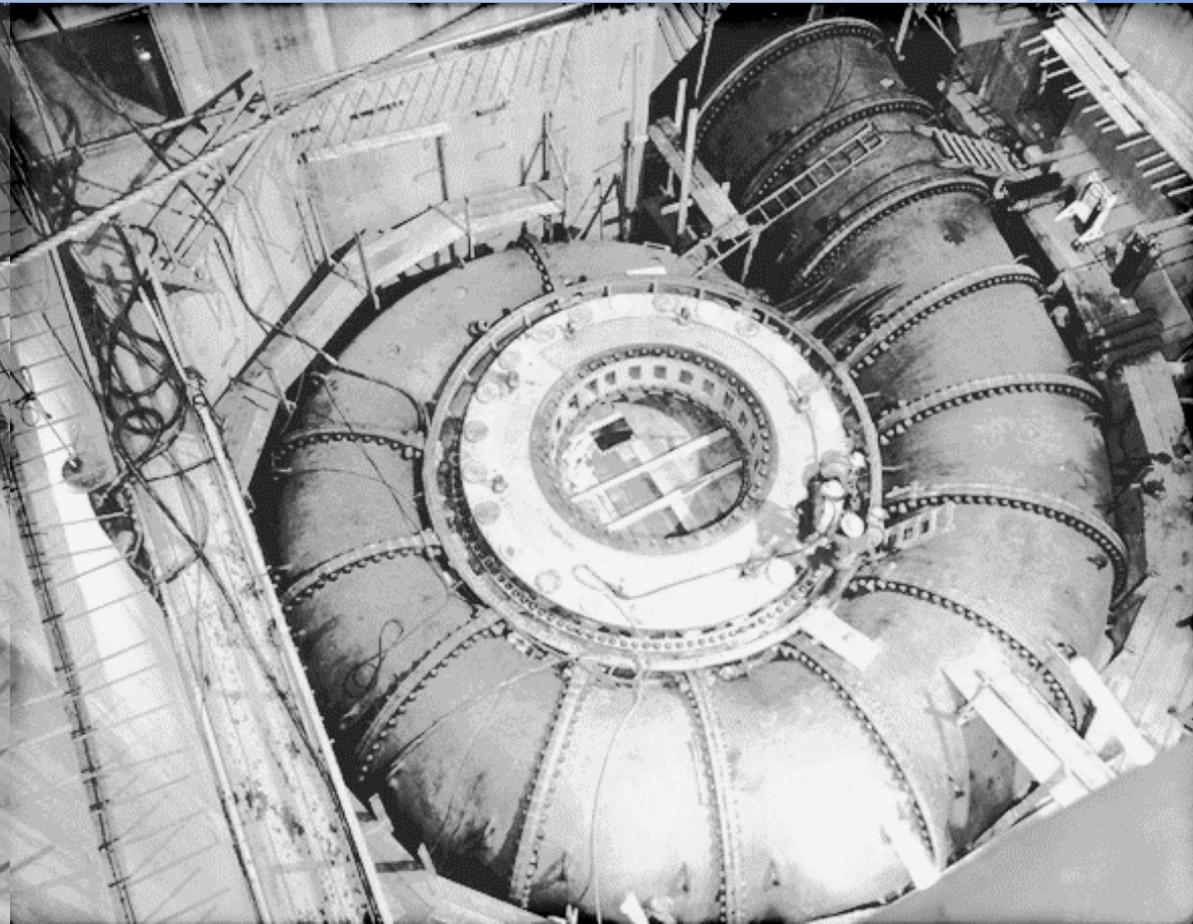
Turbines modernes

Aubes directrices



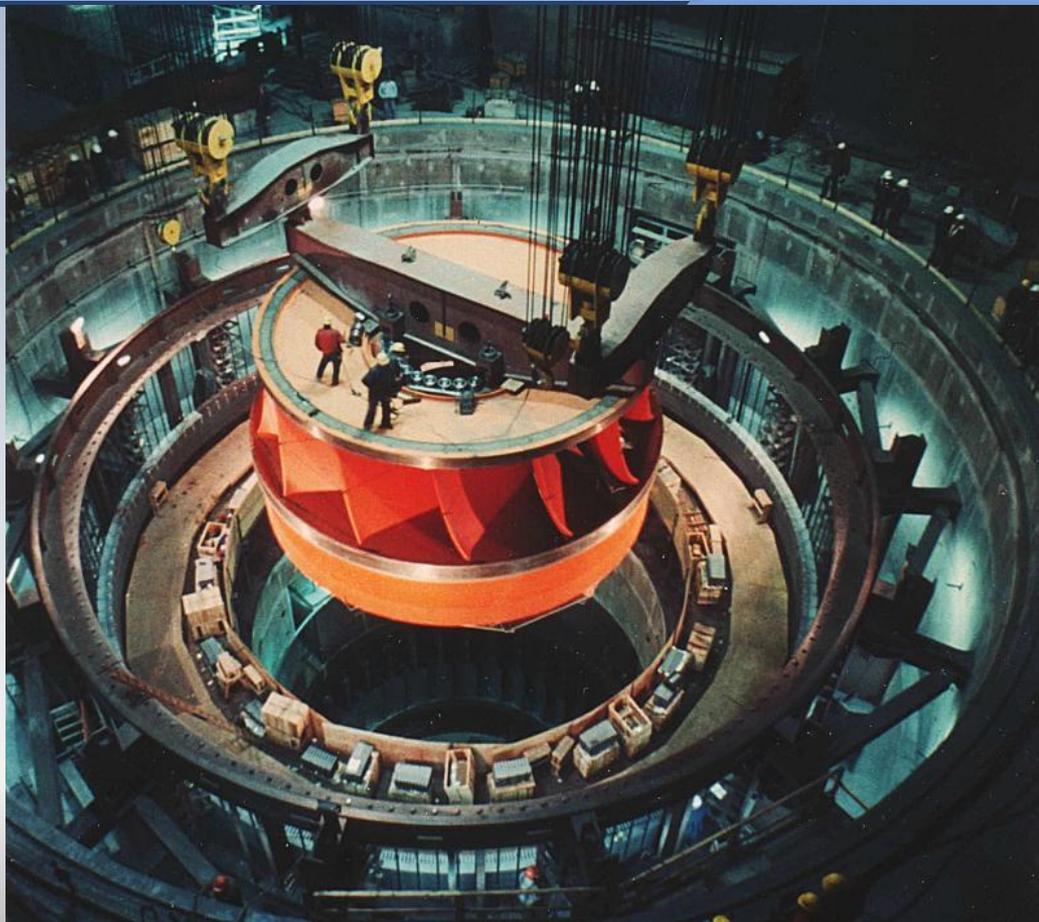
Turbines modernes

Bâche spirale



Turbines modernes

Installation



Diffuseur ou aspirateur



Diffuseur ou aspirateur

L'aspirateur ou diffuseur convertit **l'énergie cinétique** résiduelle à la sortie de la roue en **énergie de pression**. En particulier, il crée une **dépression** à la sortie de la roue, dont l'origine du nom qui lui est attribué

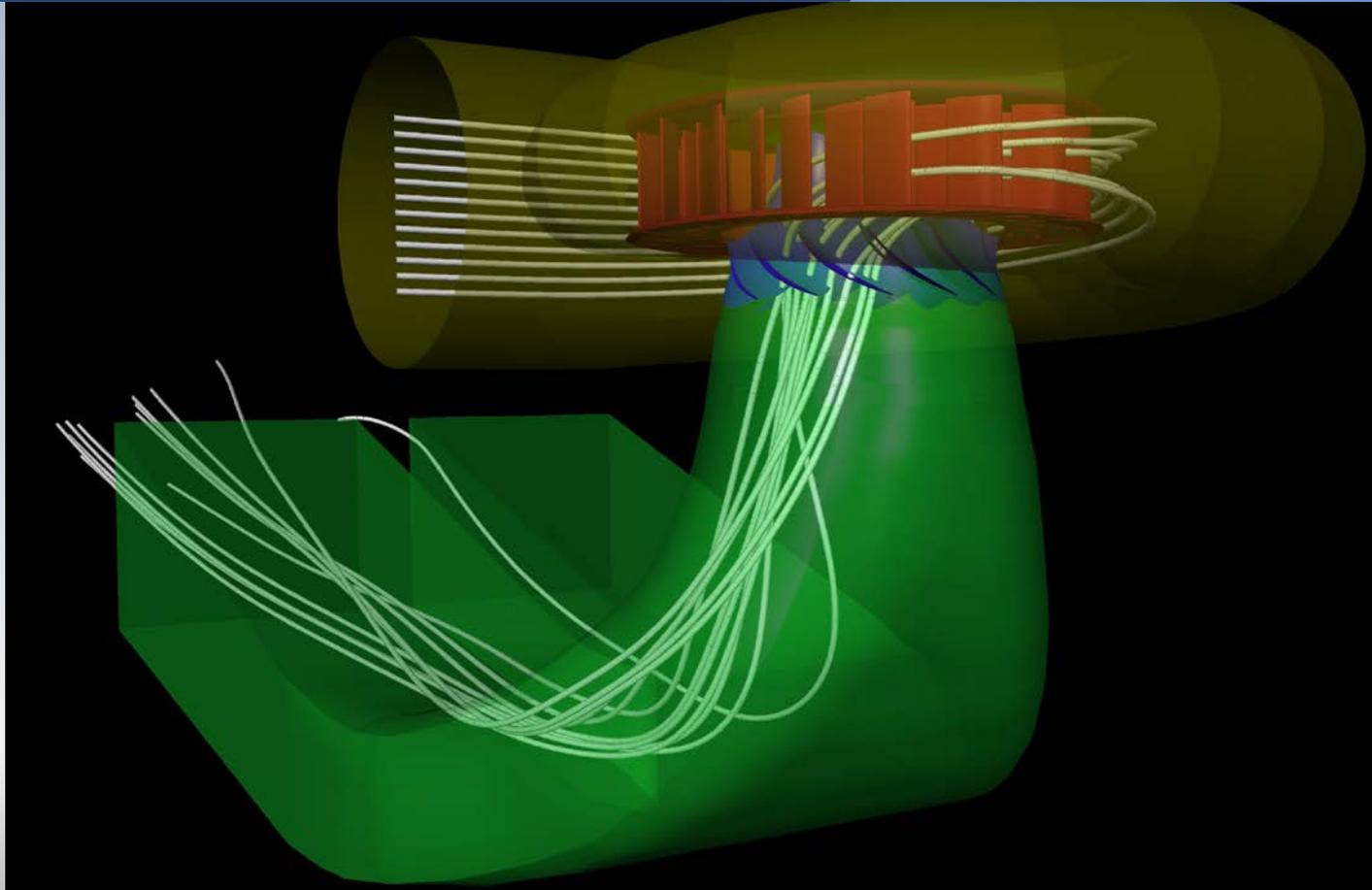
Cet organe est formé soit par un divergent, ou bien par un divergent comportant une **déviatation de 90°**. Ce dernier permet d'accomplir la tâche de récupération de pression **en limitant la profondeur de l'excavation**. La partie verticale est fondamentalement conique. La section circulaire de celle-ci devient rectangulaire dans le coude pour le demeurer ainsi dans la partie horizontale divergente

Turbines modernes

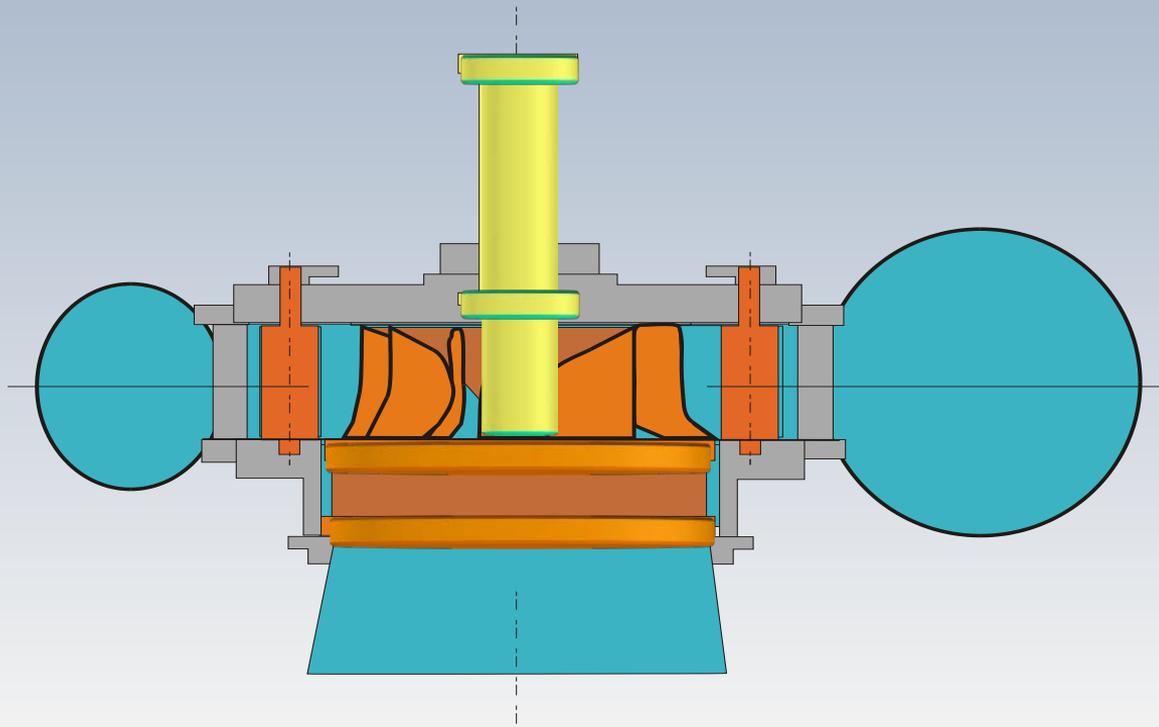
Aspirateur (Nedre Røssåga)



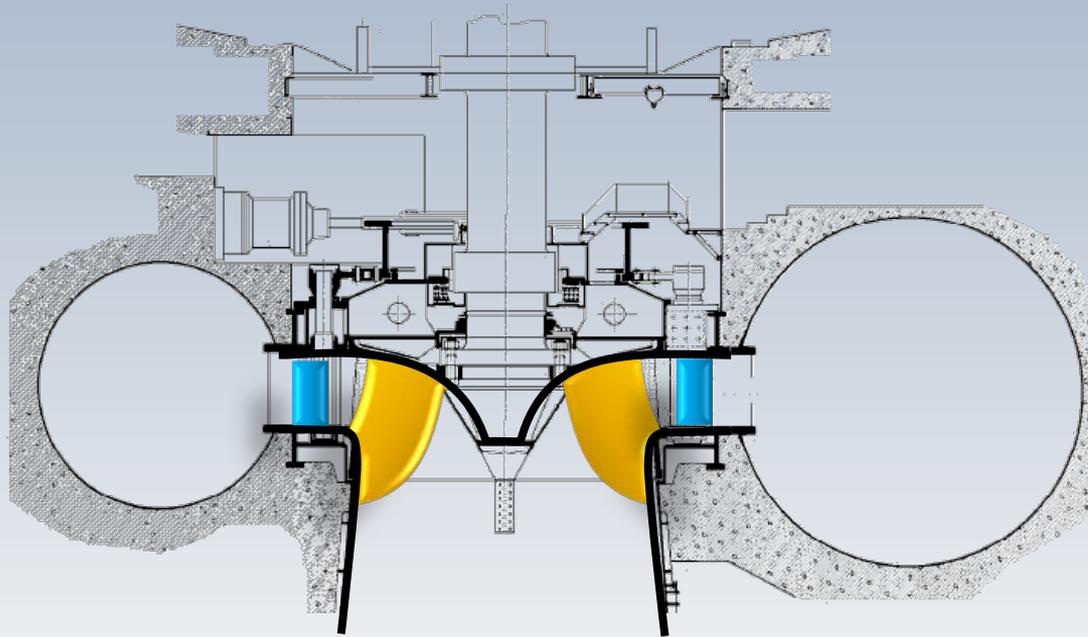
Simulation numérique



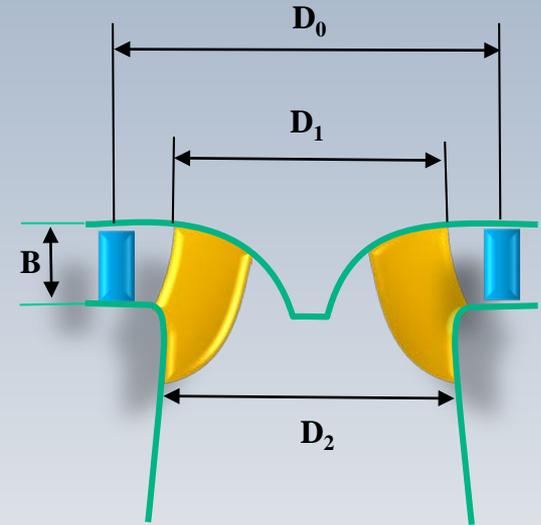
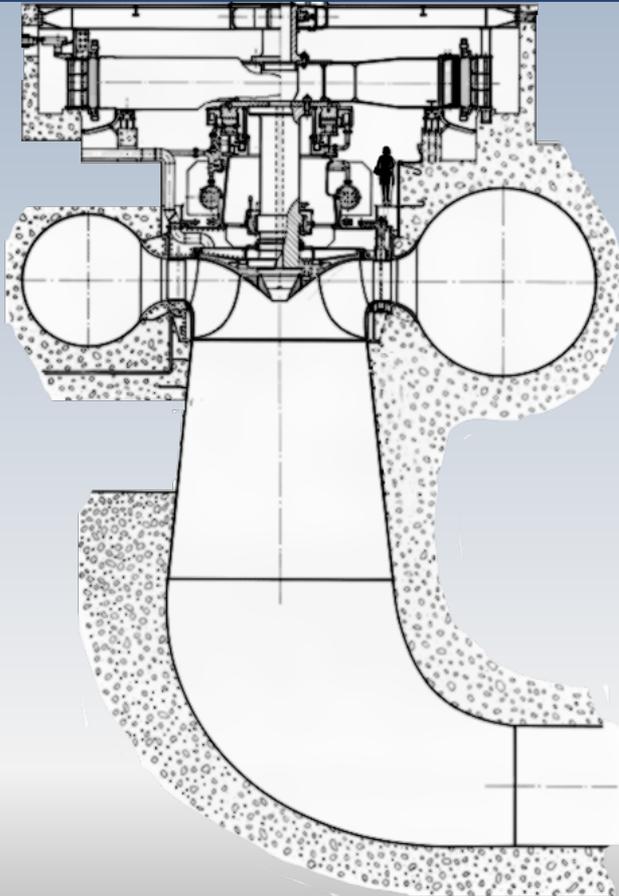
Coupe



Schéma



Robert-Bourassa



$P = 169 \text{ MW}$

$H = 72 \text{ m}$

$Q = 265 \text{ m}^3/\text{s}$

$D_0 = 6,68 \text{ m}$

$D_2 = 5,71 \text{ m}$

$D_1 = 2,35 \text{ m}$

$B_0 = 1,4 \text{ m}$

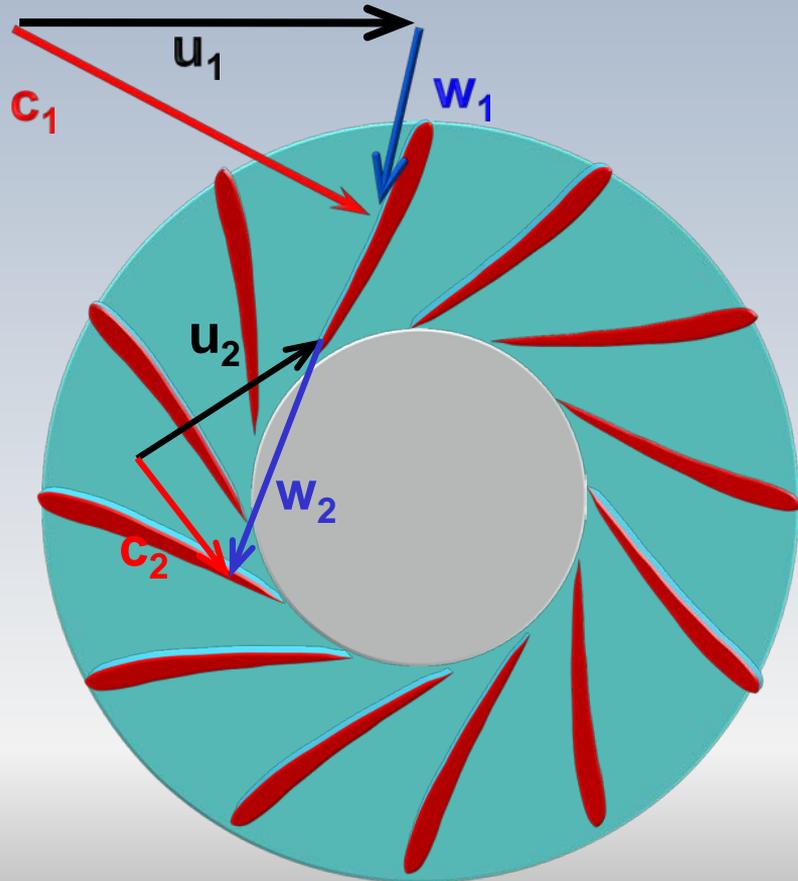
$n = 112,5 \text{ rpm}$

Agua del Toro

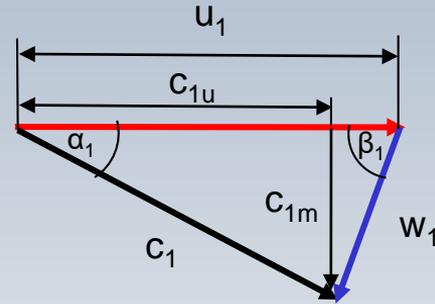
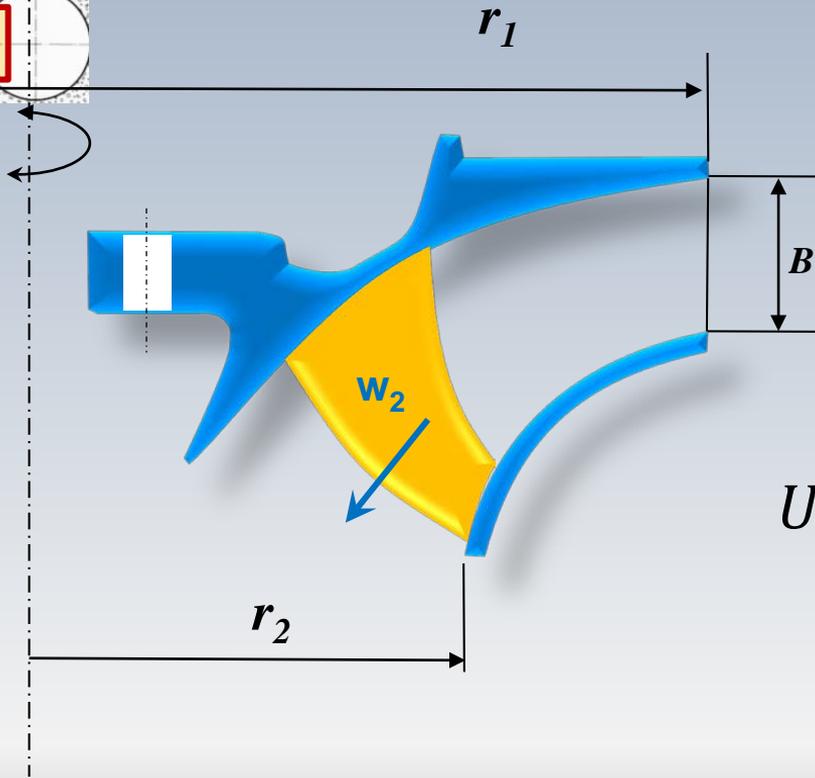
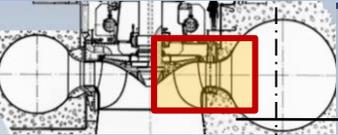
Deux Francis de
75 MW



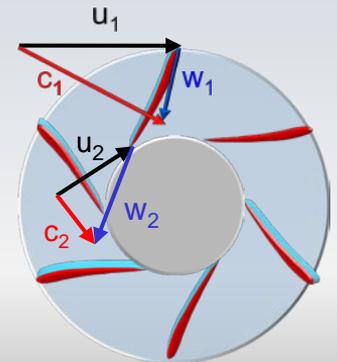
Triangle de vitesses



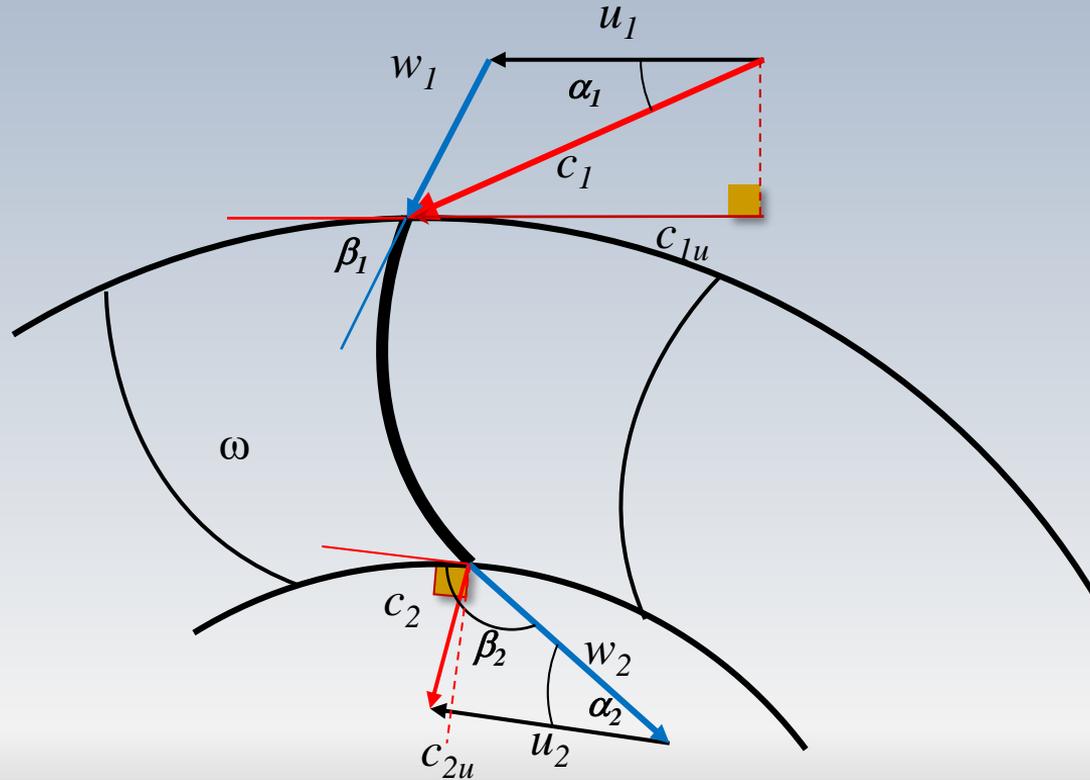
Triangle de vitesses



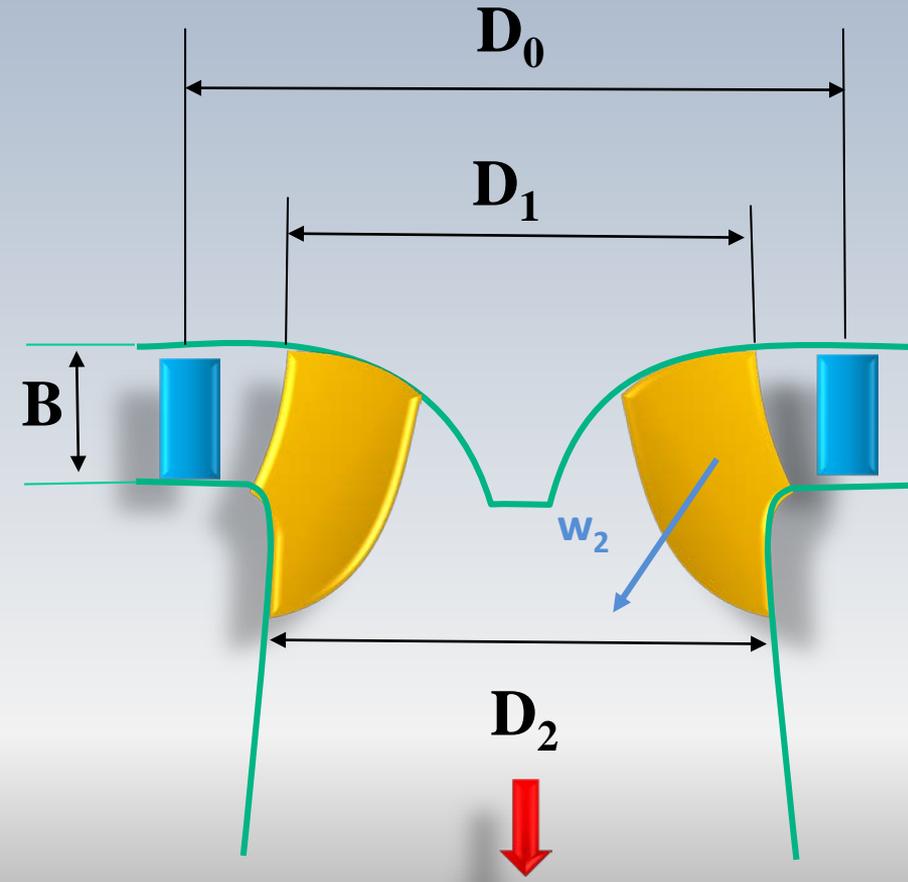
$$U = r\omega$$



Triangle de vitesses II



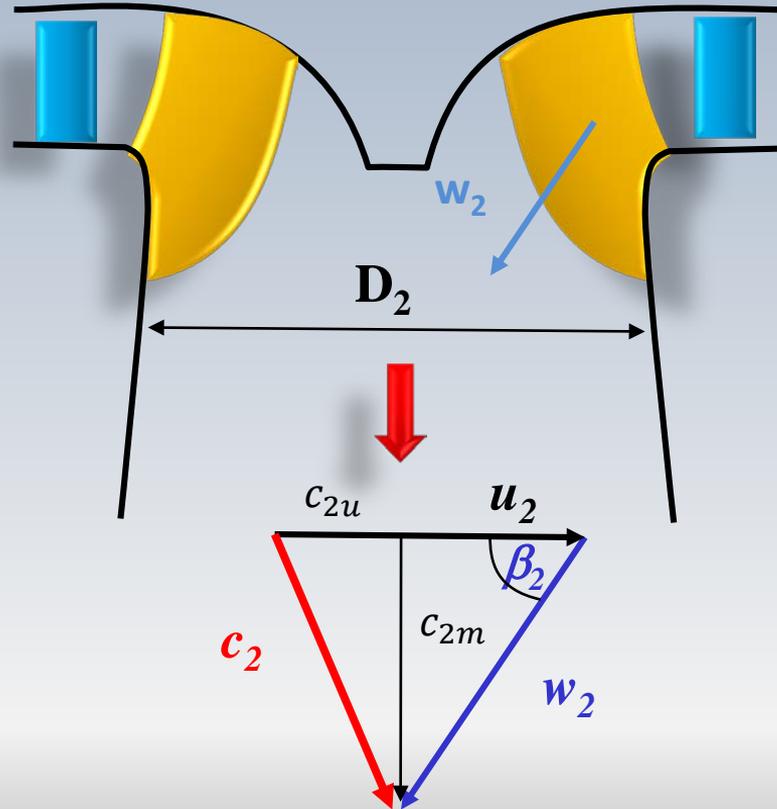
Dimensions



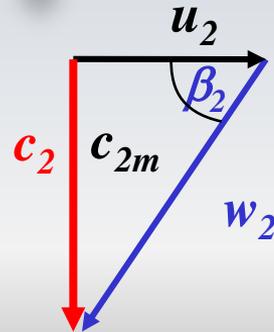
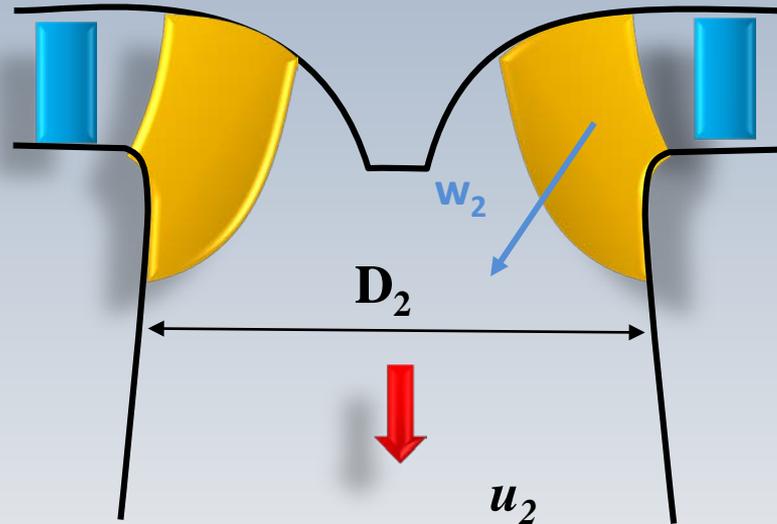
- D_2 : Diamètre à la sortie
- D_0, D_1 : Diamètres à l'entrée
- B : Hauteur à l'entrée



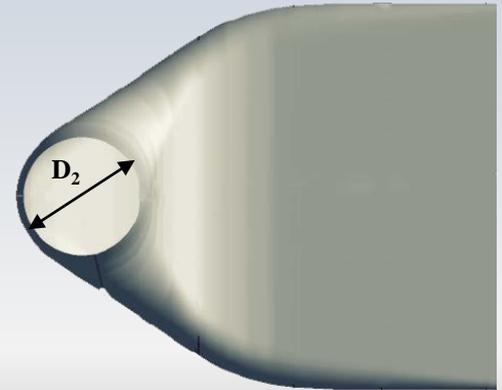
Conditions de sortie: hors design



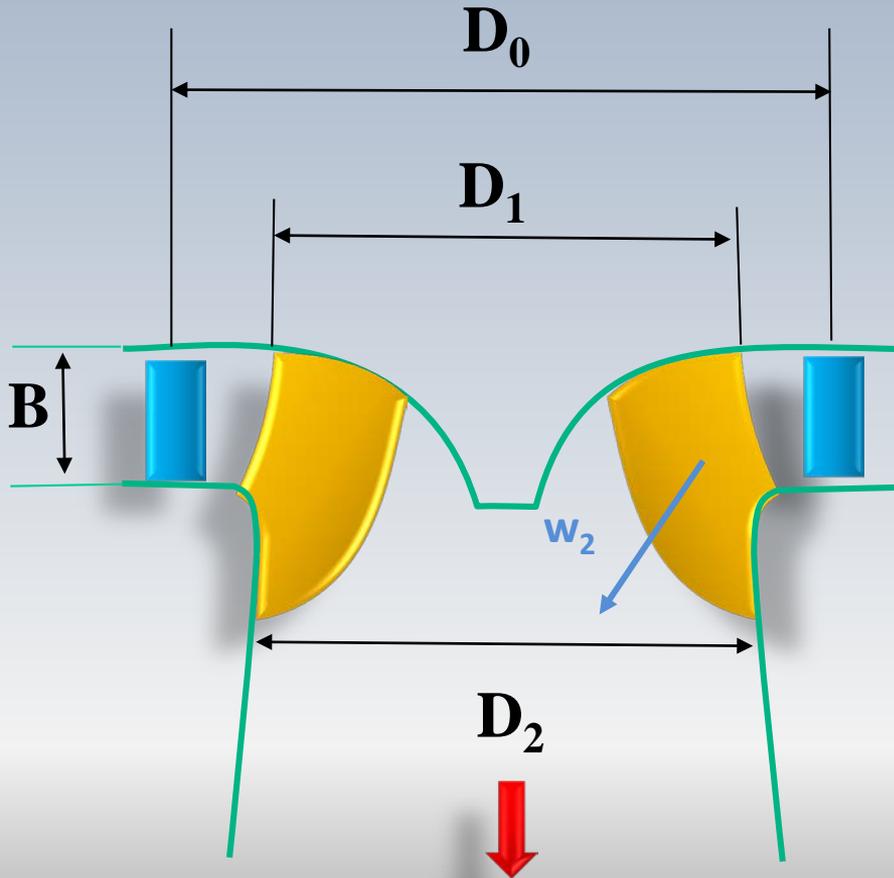
Point nominal (design)



$$c_{2m} = u_2 \tan \beta_2 \text{ (sortie axiale)}$$

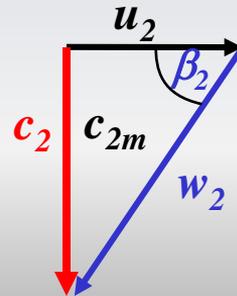


Quantités à la sortie



$$Q = \frac{c_{2m} \pi D_2^2}{4} \Rightarrow D_2 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi c_{2m}}}$$

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} \Rightarrow n = \frac{60 u_2}{\pi D_2}$$



Coefficients ξ φ λ μ κ

Dans l'industrie, on utilise des **coefficients empiriques** pour quantifier diverses vitesses dans la turbine en fonction de la vitesse maximale théorique générée par la chute H . En particulier:

$$u_1 = \xi_1 \sqrt{2gH_n}, \quad c_1 = \varphi_1 \sqrt{2gH_n}, \quad w_1 = \lambda_1 \sqrt{2gH_n} \quad (H_n = H - \text{pertes})$$

$$c_{1u} = \mu_1 \sqrt{2gH_n} \quad c_{1m} = \kappa_1 \sqrt{2gH_n}$$

$$\eta_h = \frac{c_{2u}u_2 - c_{1u}u_1}{gH_n} = 2(\xi_1\mu_1 - \xi_2\mu_2)$$

Coefficients ξ φ λ μ κ

Le degré de réaction

$$R = \frac{\Delta h_{0(2-1)} + c_1^2/2 - c_2^2/2}{\Delta h_{0(2-1)}} = 1 - \frac{c_2^2/2 - c_1^2/2}{\Delta h_{0(2-1)}} = 1 - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2gH_n}$$

$$c_1 = \varphi_1 \sqrt{2gH_n}$$
$$c_2 = \varphi_2 \sqrt{2gH_n}$$

$$\Delta h_{0(2-1)} = W_e = gH_n$$

$$R = 1 - (\varphi_2^2 - \varphi_1^2)$$

$$R = 1 \rightarrow c_1 = c_2 \quad R = 0 \rightarrow H_n = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$$

Zone de Réaction
(pression)

Zone d'Action



Rappel

Vitesse-Diamètre spécifique

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{(W_e)^{3/4}} = \frac{\Phi^{1/2}}{\Psi^{3/4}}$$

$$D_s = \frac{D(W_e)^{1/4}}{Q^{1/2}} = \frac{\Psi^{1/4}}{\Phi^{1/2}}$$

Les quantités adimensionnelles, vitesse et diamètre spécifique N_s et D_s , respectivement, permettent de caractériser les turbines hydrauliques (et l'ensemble des turbomachines)

On retrouve des formes particulières pour les turbines hydrauliques (même ayant des dimensions)

Les deux formes pour la vitesses spécifique

$$n_q = \frac{NQ^{1/2}}{H^{3/4}}$$

$$n_s = \frac{N\dot{W}^{1/2}}{H^{5/4}}$$

n_q vitesse spécifique, en d'une machine, en *rpm*, qui est géométriquement similaire à une machine d'étalonnage opérant avec une tête de $H = 1 \text{ m}$ (1pi) et par laquelle circule un débit $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ (1 pi³/s)

n_s vitesse spécifique d'une machine, en *rpm*, qui est géométriquement similaire à une machine d'étalonnage opérant avec une tête de $H = 1 \text{ m}$ (1pi) et qui consomme (produit) une puissance de $W = 1\text{kW}, 1\text{HP}$

Relation entre n_s et n_q

$$\frac{n_s}{n_q} = \frac{\dot{W}^{1/2} N H^{3/4}}{H^{5/4} Q^{1/2}} = \frac{(\rho g)^{1/2} H^{1/2} Q^{1/2} H^{3/4} N}{H^{5/4} Q^{1/2} N} =$$

$$\frac{n_s}{n_q} = \sqrt{\rho g} = \mathbf{99 \text{ (SI)}}$$

Remarque: Le facteur de conversion ci-dessus entre n_s et n_q n'est valable que pour le système international d'unités.

Variables réduites

En pratique industrielle, des **variables réduites** sont définies pour la construction de cartes destinées au passage des données du modèle vers le prototype

Ces grandeurs, notées avec un double indice **1**, correspondent à un fonctionnement en similitude sous une chute H de **1 m** ($1pi$) et un rotor de diamètre D de **1 m** ($1pi$)

Le système n_{11} Q_{11}

Vitesse angulaire réduite

$$N_{11} = \frac{ND}{H^{1/2}}$$

Débit réduit

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 H^{1/2}}$$

Puissance réduite

$$P_{11} = \frac{\dot{W}}{D^2 H^{3/2}}$$

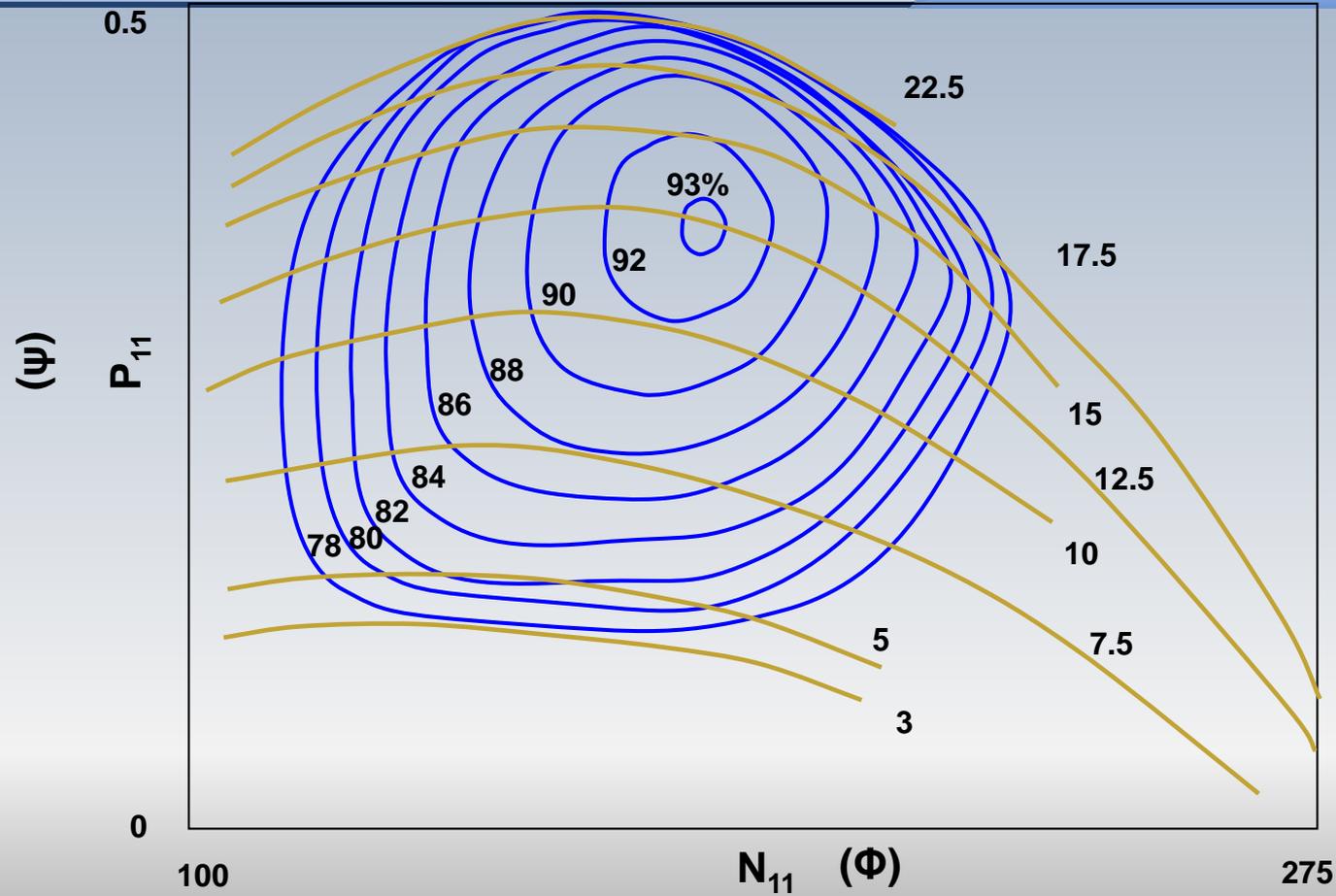
Ces trois quantités sont dimensionnelles

Pour construire la **colline de rendement**, on effectue une série d'essais pour différentes ouvertures. Par la suite, on convertit la chute $H(m)$ et le débit $Q(m^3/s)$ sous une forme pratique industrielle avec, P_{11} et N_{11} par exemple, ou sous la forme scientifique adimensionnelle Ψ et Φ

La colline de rendement constitue "l'empreinte digital" d'un type de turbine qui permet de prédire le comportement d'une turbine à plein grandeur à partir des essais sur un modèle à échelle réduite en laboratoire

Colline de rendement

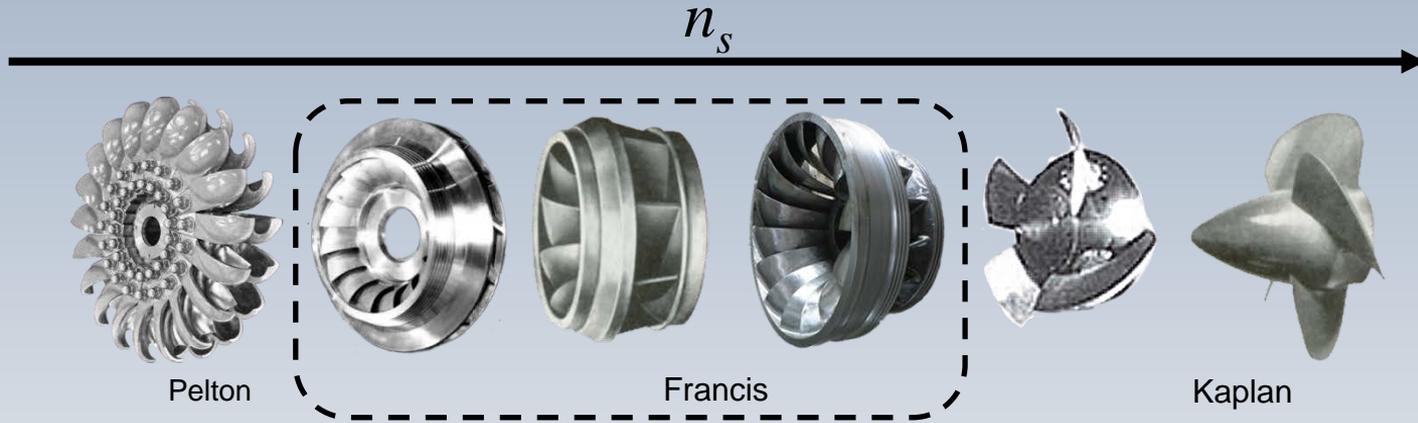
Francis



$$P_{11} = \frac{\dot{W}}{D^2 H^{3/2}}$$

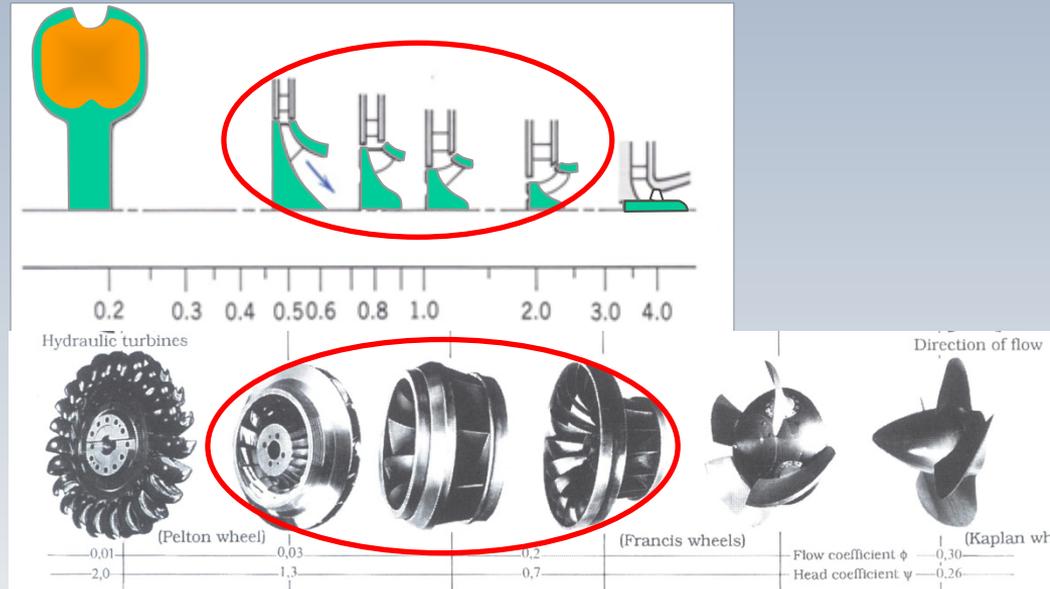
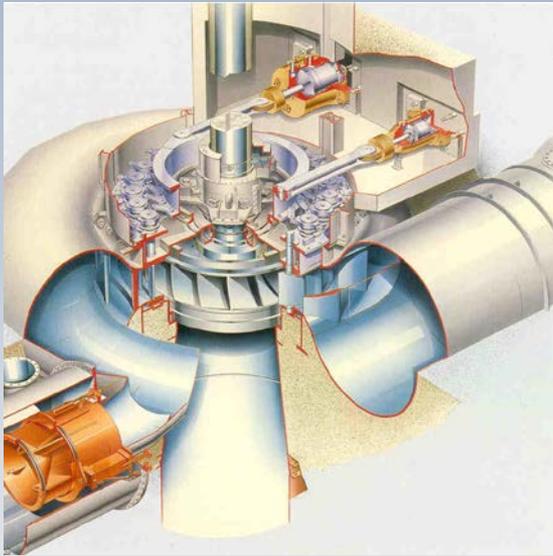
$$N_{11} = \frac{ND}{H^{1/2}}$$

Classification

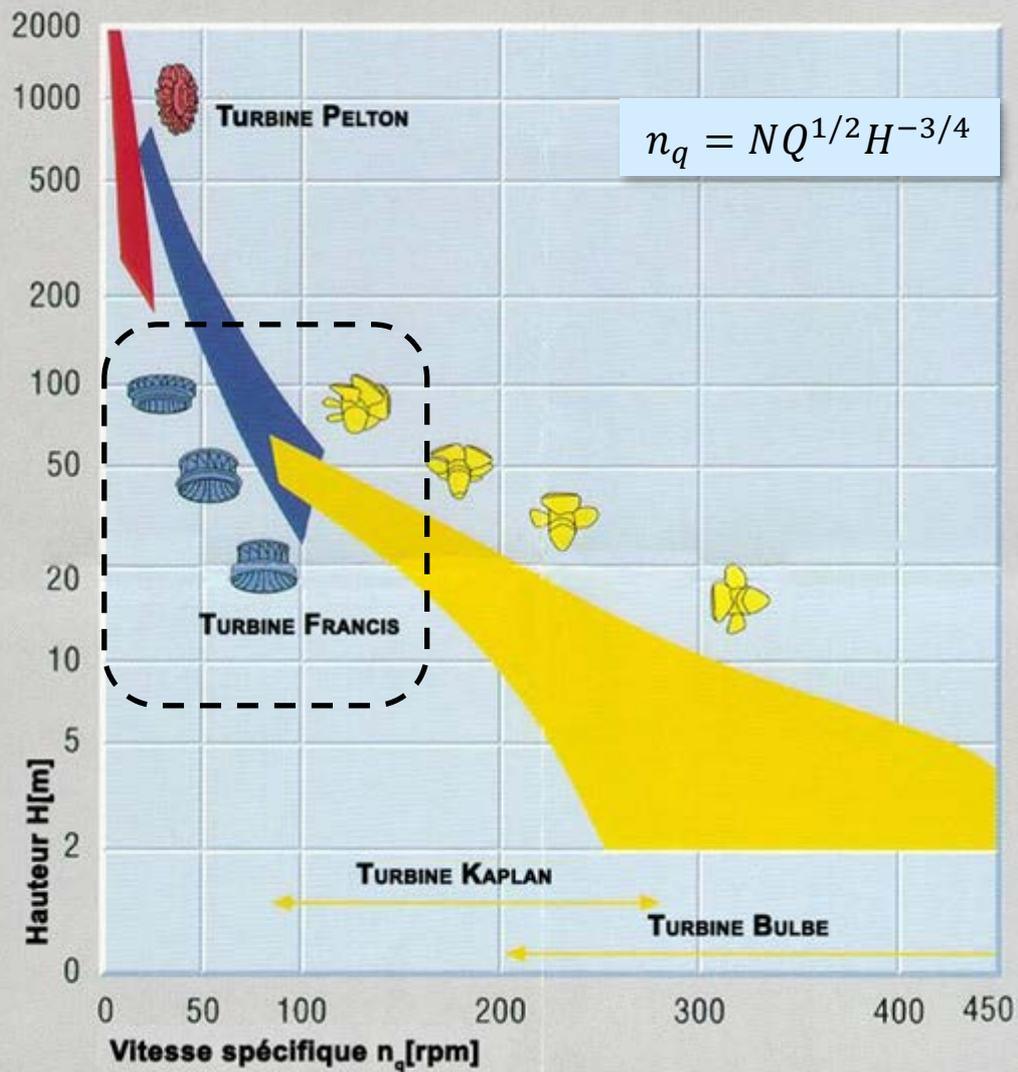


L'étendue de la vitesse spécifique pour les turbines Francis, est plus grande que pour les autres turbines

La turbine Francis et la n_s

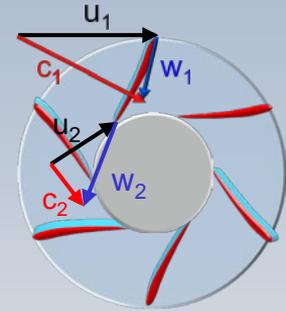
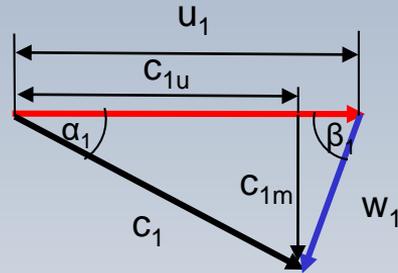
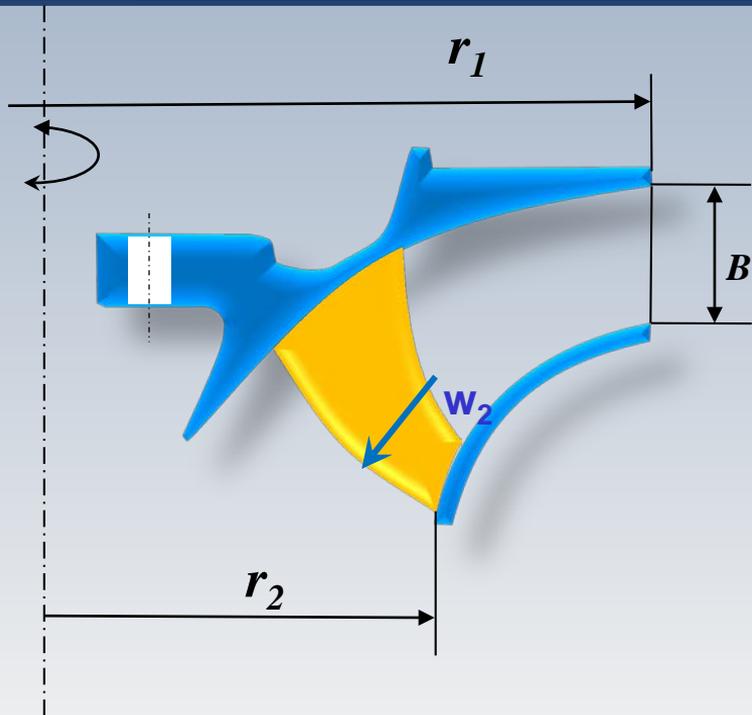


Pour ce type de turbines, les valeurs de n_s sont **moyennes**. Elles opèrent sur un vaste domaine de chutes H et de débits Q



La forme du rotor et n_s

Francis

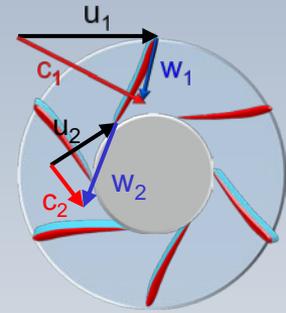
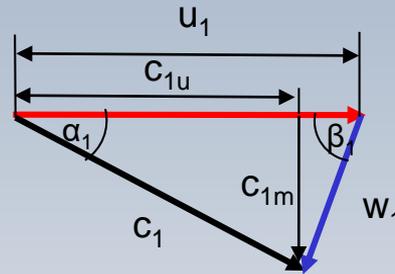
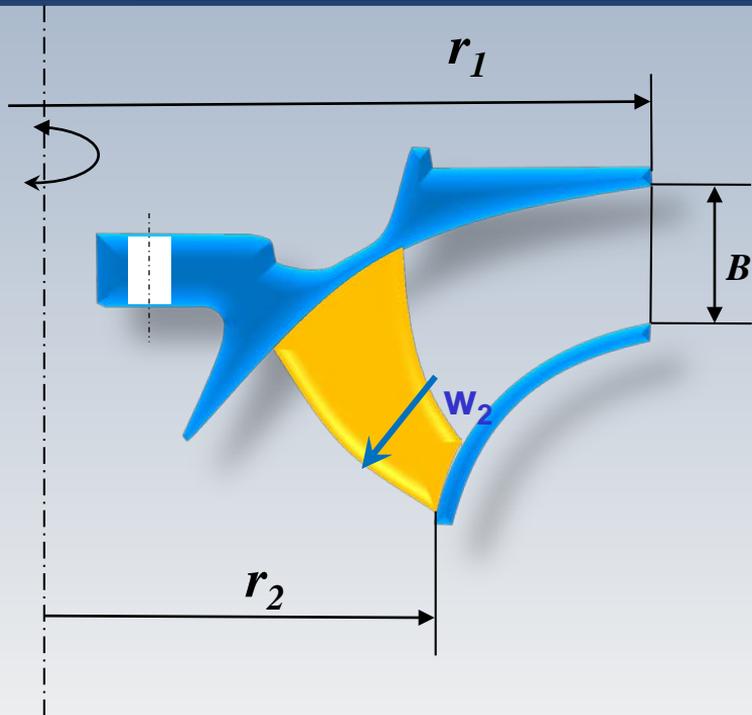


Une analyse sur le rotor permet d'expliquer la relation entre sa géométrie et la vitesse spécifique
D'abord nous regardons le débit

$$Q = \pi B D_1 c_1 \sin \alpha$$

La forme du rotor et n_s

Francis



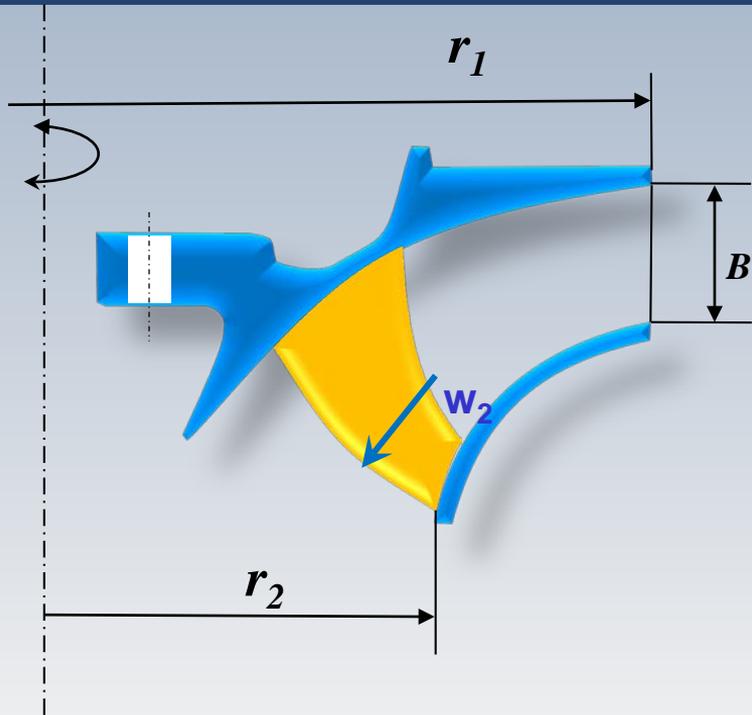
Ensuite, nous regardons la puissance théorique

$$\dot{W} = \rho Q g H$$

$$= \rho g H \pi B D_1 c_1 \sin \alpha$$

La forme du rotor et n_s

$$\dot{W} = \rho g H \pi B D_1 c_1 \sin \alpha$$



Si nous remplaçons la puissance dans l'expression pour n_s

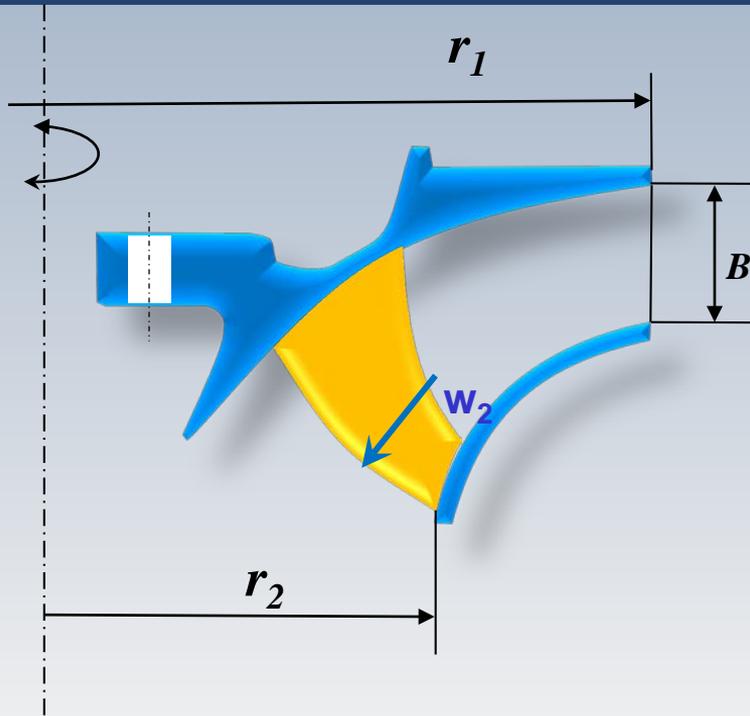
$$n_s = \frac{n \dot{W}^{1/2}}{H^{5/4}}$$

nous trouvons

$$n_s = \frac{u_1}{\pi D_1} \sqrt{\rho g \pi B D_1 c_1 \sin \alpha H^{-3/2}}$$

La forme du rotor et n_s

$$\dot{W} = \rho g H \pi B D_1 c_1 \sin \alpha$$

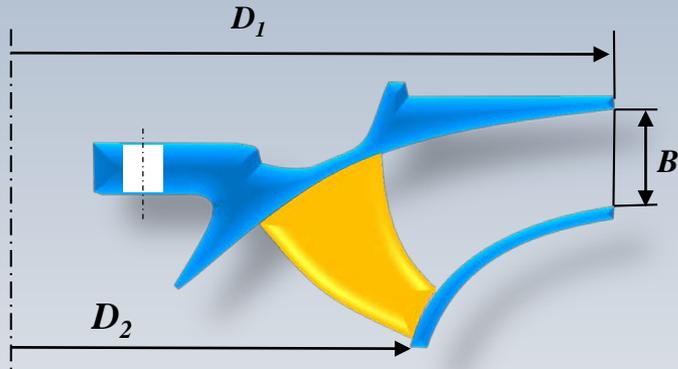


ou encore

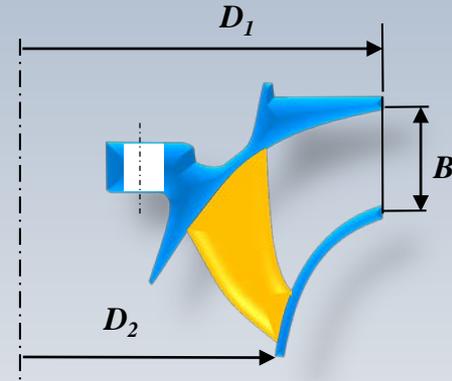
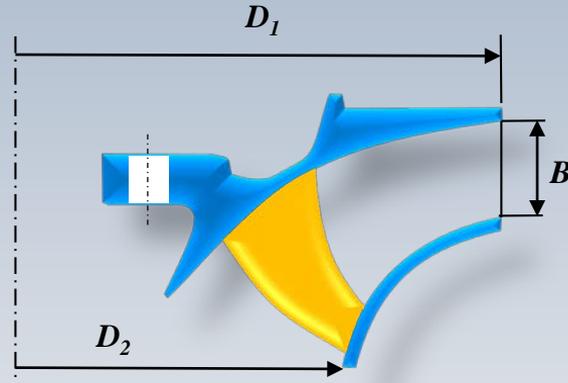
$$n_s = \sqrt{\frac{\rho g^2}{\pi D_1} \frac{B}{D_1} \frac{c_{1u} u_1}{gH} \tan \alpha_1 \frac{u_1}{(gH)^{1/2}}}$$

Le rapport B/D_1 peut varier en modifiant B sans changer D_1 . Ainsi, u_1 et c_{1u} demeurent fixes tel que le reste des quantités dans la racine carrée

La forme et n_s



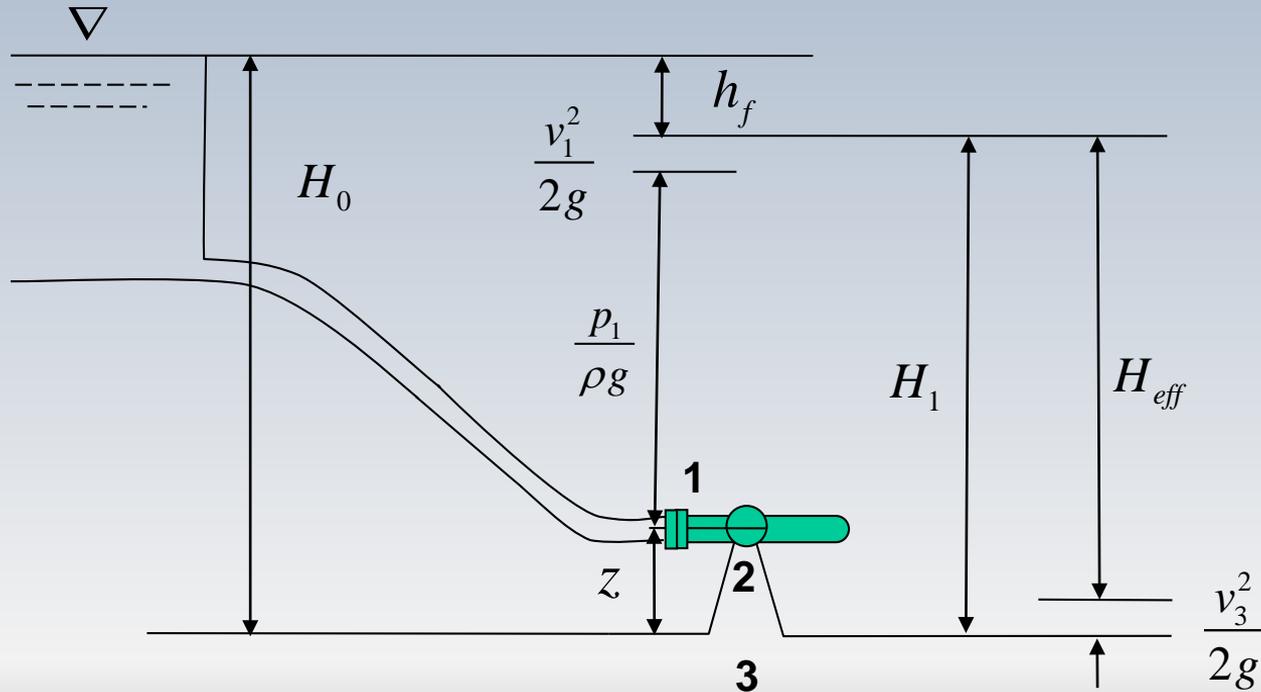
Turbine lente: B/D_1 petit



Turbine rapide: B/D_1 grand

$$n_s = \sqrt{\frac{\rho g}{\pi D_1} \left(\frac{B}{D_1} \right) \frac{c_{1u} u_1}{gH} \tan \alpha_1 \frac{u_1}{(gH)^{1/2}}}$$

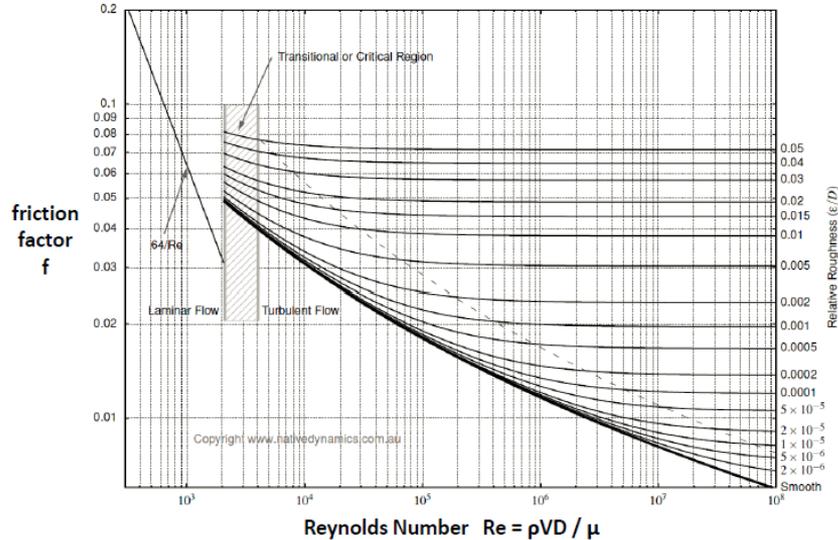
Aménagement et aspirateur



Conduite forcée

$$h_f = \frac{f l v_1^2}{D 2g}$$

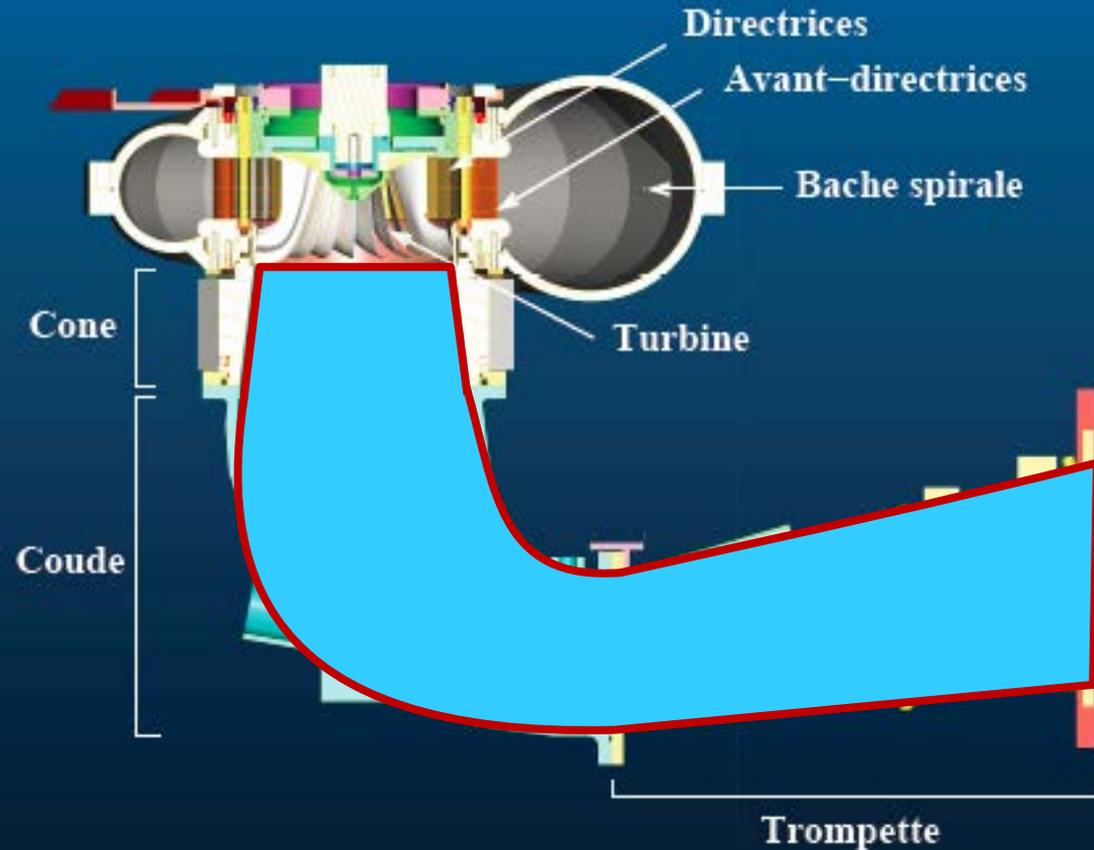
Moody Diagram



Dans la conduite forcée, les pertes peuvent être calculées à l'aide de l'abaque de Moody ou des formules équivalentes

Pour l'aspirateur, une courte analyse sera faite

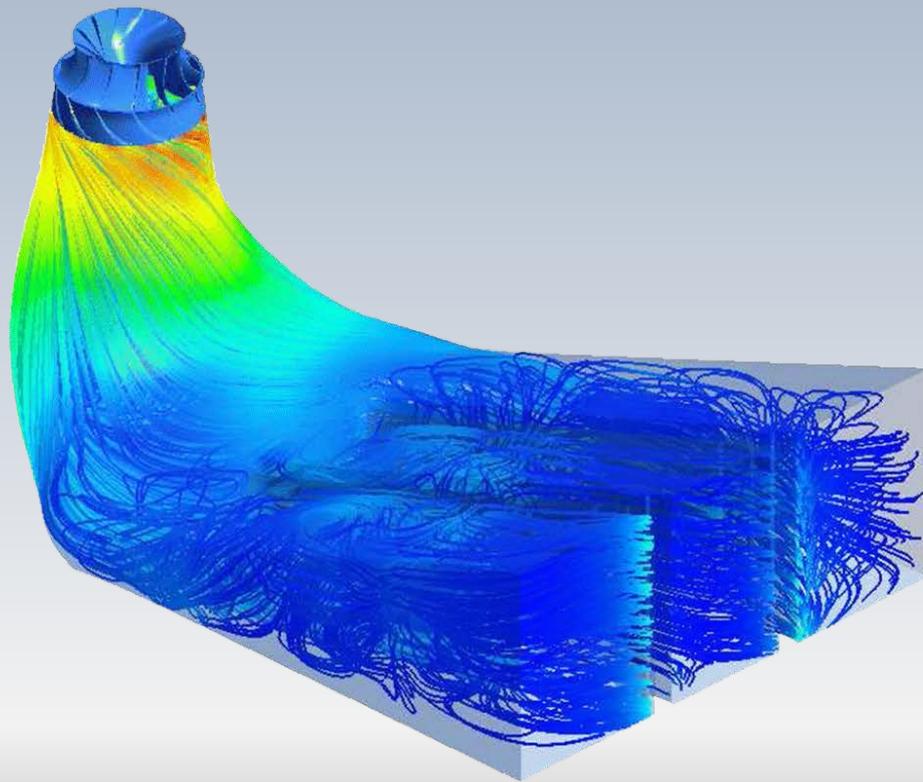
Composantes



Aspirateur

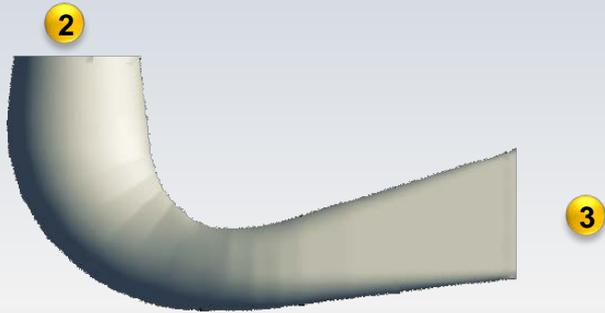


Simulation



Aménagement et aspirateur

À la sortie de la roue (2), l'écoulement possède encore une vitesse et donc une énergie cinétique qui n'a pas été convertie en mécanique. Afin de récupérer le maximum de cette énergie, on ajoute le diffuseur (2-3) dont le rôle est de ralentir l'écoulement et créer une zone de dépression en aval du rotor. On obtiendra ainsi une plus grande extraction d'énergie par la turbine.

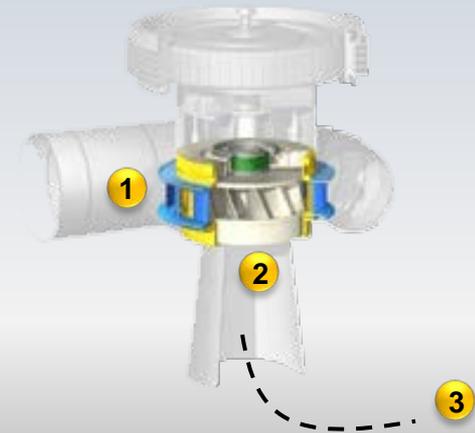
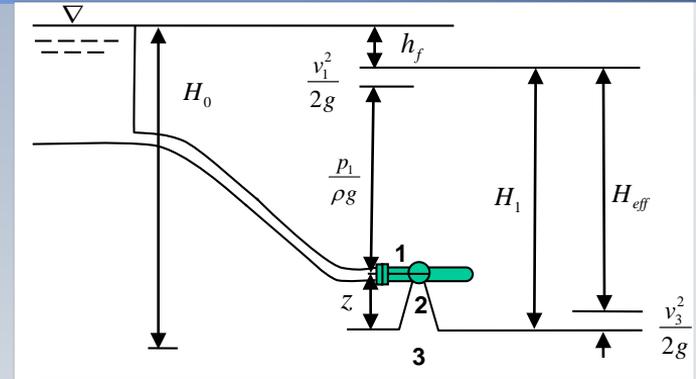


Aménagement et aspirateur

$$H_0 = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z + h_f$$

$$H_1 = H_0 - h_f = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z$$

$$H_1 - \frac{v_3^2}{2g} = \left[\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z \right] - \frac{v_3^2}{2g}$$
$$= (H_0 - h_f) - \frac{v_3^2}{2g}$$



Aménagement et aspirateur

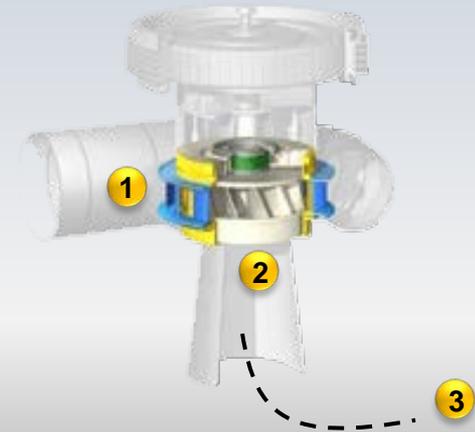
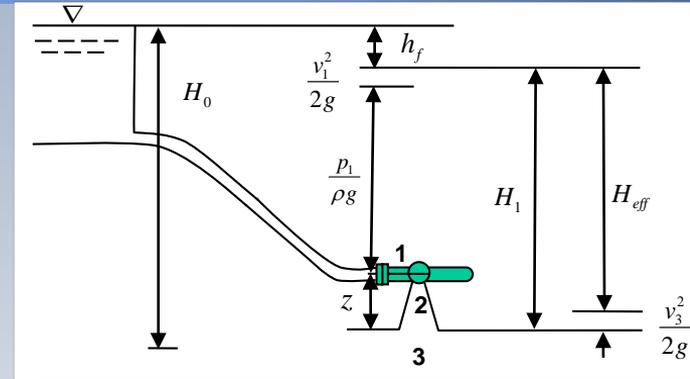
$$H_1 - \frac{v_3^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z - \frac{v_3^2}{2g}$$

$$= (H_0 - h_f) - \left[\frac{v_3^2}{2g} \right] \leftarrow \text{Idéalement zéro}$$

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z = 0 + \frac{v_3^2}{2g} + 0$$

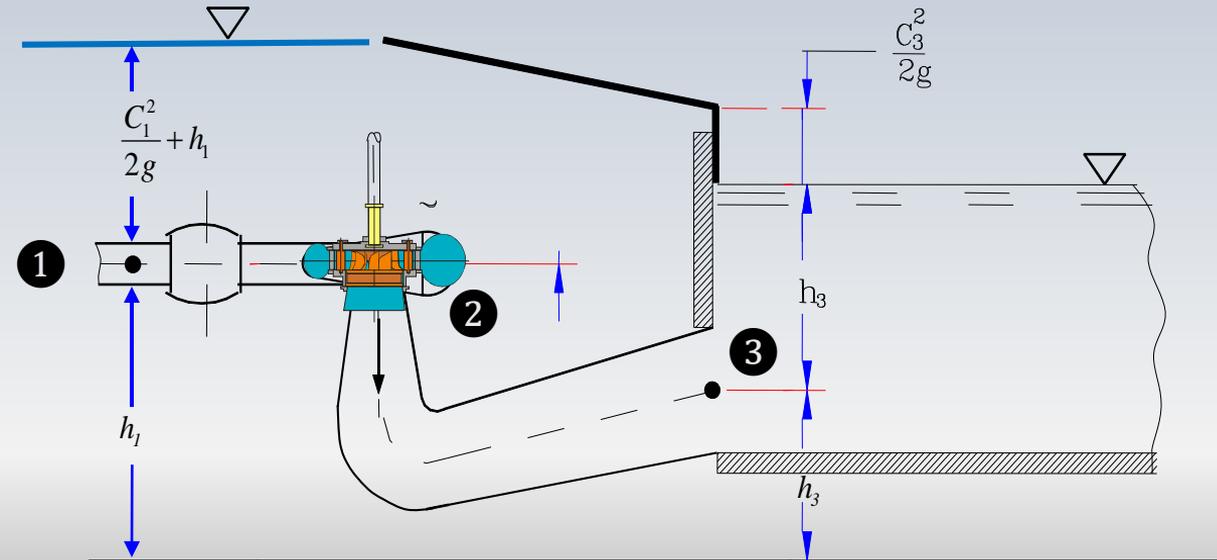
$$\frac{p_2}{\rho g} = - \left(z + \frac{v_2^2 - v_3^2}{2g} \right)$$

Pression "negative" induite par l'aspirateur



Rendement hydraulique

$$\eta_h = \frac{c_{1u}u_1 - c_{2u}u_2}{gH}$$



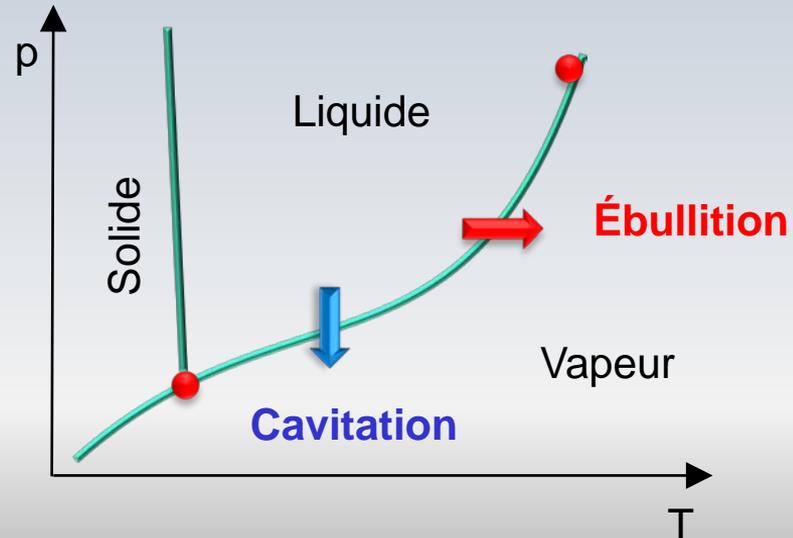
Hauteur nette (Norme IEC)

Selon la norme 60193(IEC standard, 1991), la hauteur nette représente la différence entre la pression totale à l'entrée (bâche spirale) et la pression totale à la sortie (aspirateur)

$$H = \frac{\left(p_{stat.,ent.} + \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A_{ent.}} \right)^2 \right) - \left(p_{stat.,sort.} + \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A_{sort.}} \right)^2 \right)}{\rho g}$$

Cavitation

Apparition de bulles de vapeur dans un liquide causées par une diminution de pression sans apport de chaleur. Dans un écoulement, la durée de vie des poches est extrêmement brève (de l'ordre de la milli seconde). Lorsque l'écoulement atteint des régions de haute pression, les bulles implosent et ce phénomène répétitif et violent peut causer des érosions importants sur les parois. La cavitation peut se manifester par du bruit et des vibrations accompagnées d'une diminution des performances (puissance, rendement, etc.)



Cavitation

Le terme cavitation est attribué à William Froude, tandis que le nombre de cavitation a été introduit par D. Thoma en 1923 dans le contexte des turbines et des pompes. Il a proposé un nombre adimensionnel qui peut être utilisé pour caractériser la cavitation dans les turbines hydrauliques à réaction (Francis et Kaplan)

$$\sigma = \frac{H_b - H_s}{H}$$



W.Froude

H_b est la pression atmosphérique en m colonne d'eau, H_s est la pression e d'aspiration à la sortie du rotor de la turbine et H est la chute en m .

Thoma, Dieter. Die Kavitation bei Wasserturbinen, Hydraulische Probleme, pp. 65-74, présenté à Goettingen 1925, VDI, Berlin, 1926.

Dieter Thoma

Le Pr. Thoma a été le responsable du laboratoire l'Institut Polytechnique de Munchen(1920), où il a conduit des recherches sur le phénomène de cavitation dans les machines hydrauliques. Il a développé un paramètre adimensionnel pour caractériser la cavitation que plus tard deviendrait le nombre de Thoma. Pendant sa carrière, il a étudié la succion dans les turbines Francis, dont les résultats ont été présentés à la première conférence mondiale sur l'énergie, en Londres (1924).



1881 - 1942

Cavitation



Cavitation sur un profil hydrodynamique

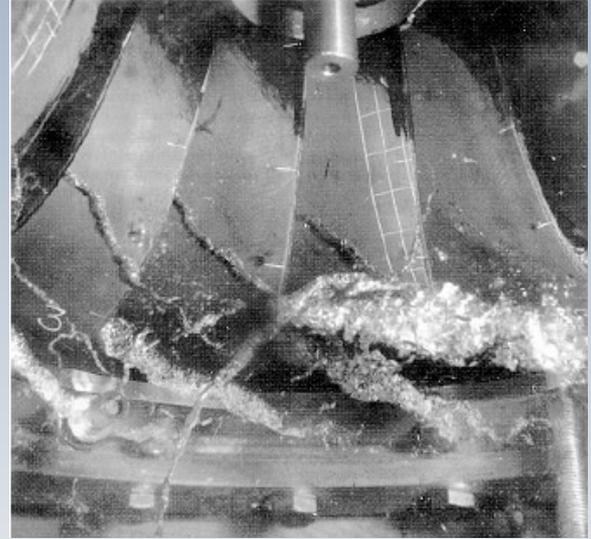
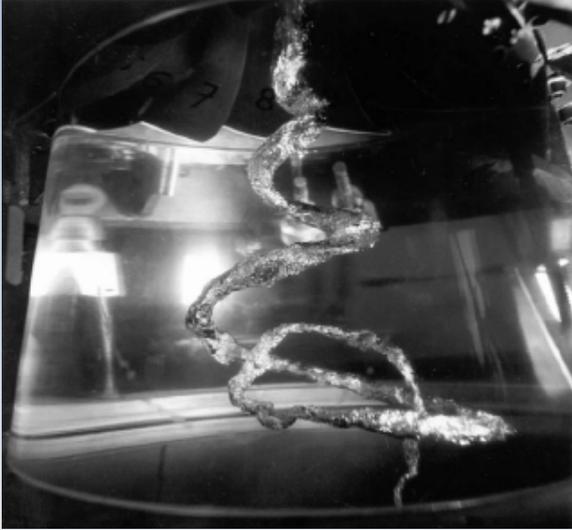
Cavitation

- Effets
 - Érosion
 - Vibrations
 - Détérioration de la performance

Remarque: Dans les turbines hydrauliques, la cavitation apparaît “ naturellement ”. On trouve ce phénomène en aval du rotor à cause de la **dépression engendrée par l’aspirateur**. Ce phénomène est connu sous le nom de **torche cavitante**. À charge partielle, la cavitation fait déjà son apparition dans les canaux interaubes de la roue.

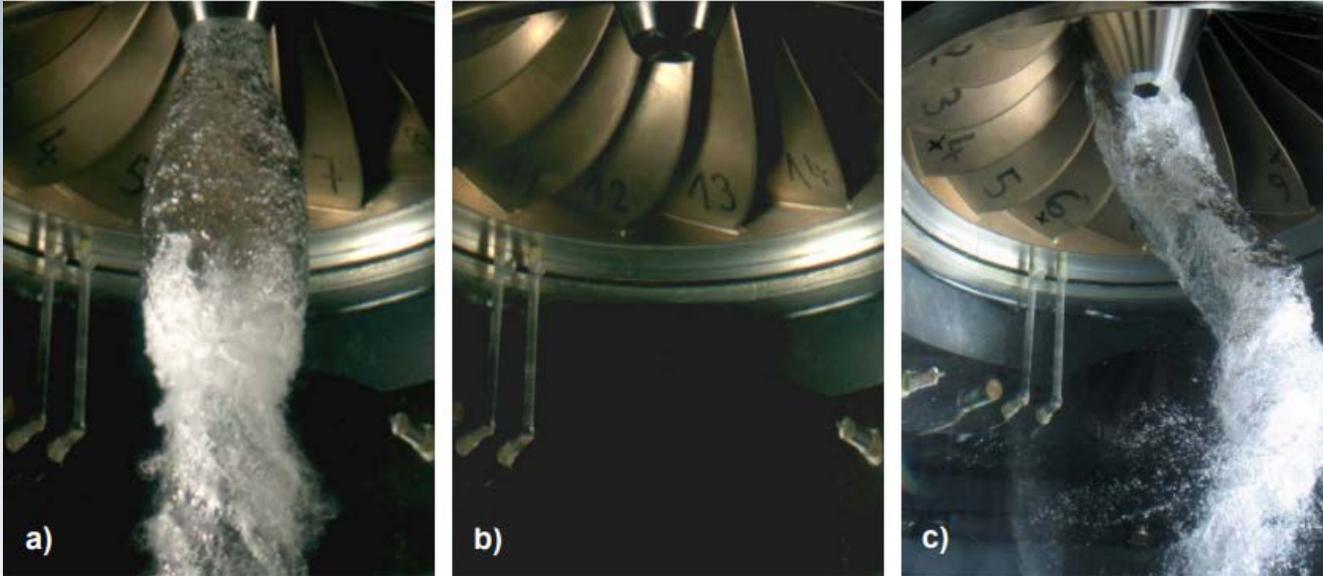
À pleine charge, la forme de la torche est essentiellement axiale, tandis que à charge partielle, elle devient hélicoïdale.

Cavitation



Torche cavitante, à gauche, et cavitation sur les aubes, à droite

Cavitation



Torche de cavitation à la sortie de la roue: a) charge élevée, b) condition de design c) charge partielle.

Érosion

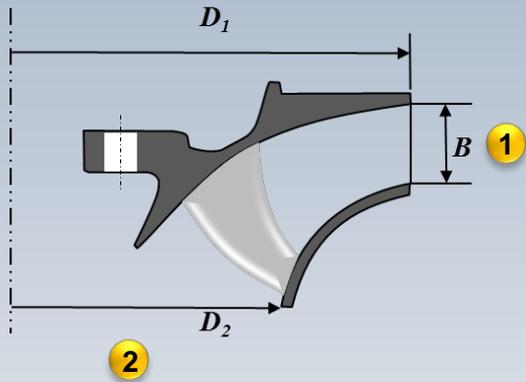




PROBLÈMES

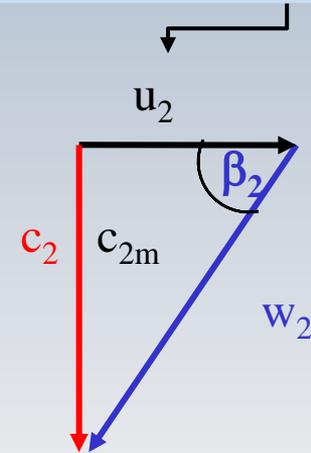


Exemple I: données



$$\begin{aligned} Q &= 71.5 \text{ m}^3/\text{s} \\ H &= 543 \text{ m} \\ \beta_2 &= 22^\circ \\ u_2 &= 40.9 \text{ m/s} \\ \eta_h &= 96\% \end{aligned}$$

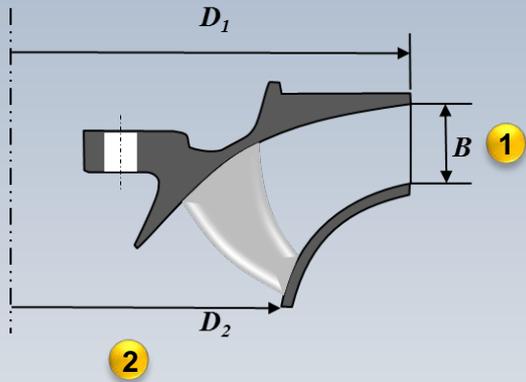
Triangle de vitesses à la sortie 2



Hypothèse 1 $c_{2m} = c_{1m}$

Hypothèse 2 $\xi_1 = 1$ $\left(u_1 = \xi_1 \sqrt{2gH} \right)$

Exemple I



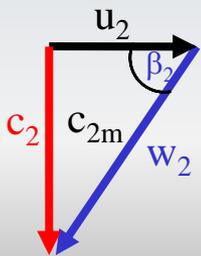
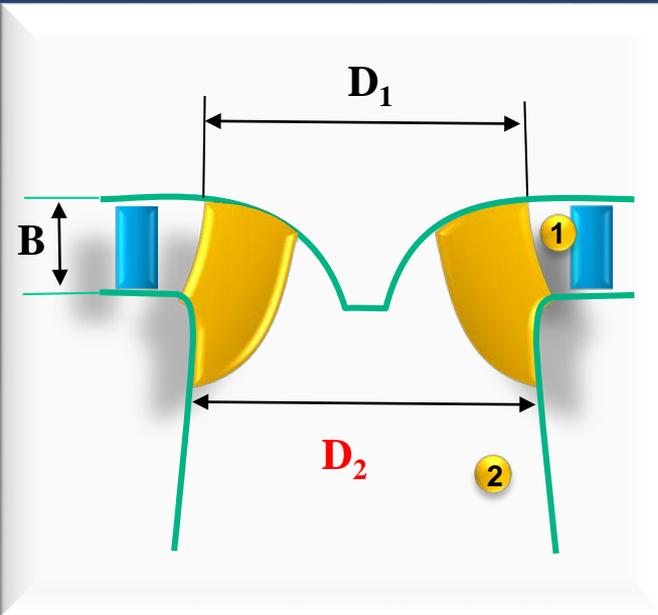
$$\begin{aligned} Q &= 71.5 \text{ m}^3/\text{s} \\ H &= 543 \text{ m} \\ \beta_2 &= 22^\circ \\ u_2 &= 40,9 \text{ m/s} \\ \eta_h &= 96\% \\ c_{2m} &= c_{1m} \end{aligned}$$

-On doit trouver D_2 , n , c_{1u} , D_p , B , β_1

-Modifier D_2 en fonction de la vitesse synchrone la plus proche?
Considérer la même forme pour le triangle de vitesse à la sortie

Exemple I

$D_2, n, c_{1u}, D_1, B, \beta_1$

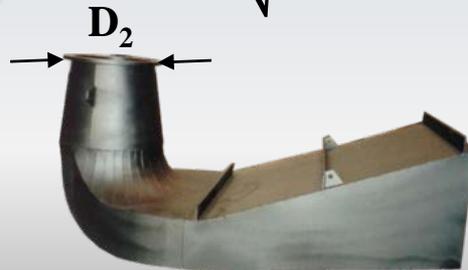


Cons. du débit volumique Q

$$D_2 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi c_{2m}}} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi u_2 \tan \beta_2}}$$

$Q = 71.5 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = 543 \text{ m}$
 $\beta_2 = 22^\circ$
 $u_2 = 40,9 \text{ m/s}$
 $\eta_h = 96\%$
 $c_{2m} = c_{1m}$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \times 71.5}{\pi \times 40.9 \times \tan 22^\circ}} = 2.347 \text{ m}$$



Exemple I

$D_2, n, c_{1u}, D_1, B, \beta_1$

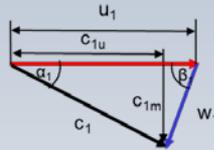
Vitesse de rotation n

$$n = \frac{u_2 60}{\pi D_2} = \frac{40.9 \times 60}{\pi \times 2.347} = 332.8 \text{ rpm}$$



$Q = 71.5 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = 543 \text{ m}$
 $\beta_2 = 22^\circ$
 $u_2 = 40,9 \text{ m/s}$
 $\eta_h = 96\%$
 $c_{2m} = c_{1m}$

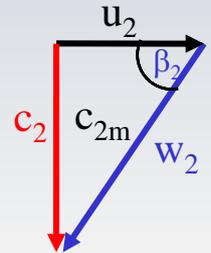
Composante c_{1u}



$$\eta_h = \frac{c_{1u} u_1 - c_{2u} u_2}{gH}$$

Au point nominal, $c_{2u} = 0$

$$\eta_h = 0.96 = \frac{c_{1u} u_1}{gH} \quad u_1?$$



Exemple I

$D_2, n, c_{1u}, D_1, B, \beta_1$

Hypothèse 2 $\xi_1=1$

$$u_1 \approx \xi_1 \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 543} = 103.2 \text{ m/s}$$

$$\eta_h = \frac{c_{1u} u_1}{gH} \Rightarrow c_{1u} = \frac{9.8 \times 543 \times 0.96}{103.2} = 49.5 \text{ m/s} \quad \checkmark$$

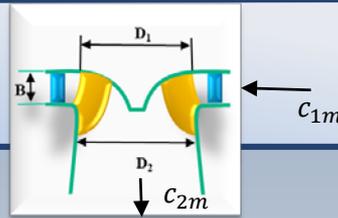
$Q = 71.5 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = 543 \text{ m}$
 $\beta_2 = 22^\circ$
 $u_2 = 40.9 \text{ m/s}$
 $\eta_h = 96\%$
 $c_{2m} = c_{1m}$

Hypothèse 2 $\xi_1=1$

Diamètre D_1

$$u_1 = \frac{n\pi D_1}{60} \Rightarrow D_1 = \frac{60u_1}{\pi n} = \frac{103.22 \times 60}{322\pi} = 6.12 \text{ m} \quad \checkmark$$

Exemple I



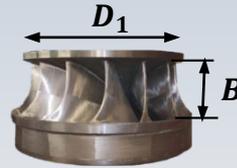
$D_2, n, c_{1u}, D_1, B, \beta_1$

Hauteur B

Cons. masse : $c_{1m}A_1 = c_{2m}A_2$ ($\rho = \text{cnste}$)

Hypothèse 1 $c_{2m} = c_{1m} \longrightarrow A_1 = A_2$

 $\pi D_1 B = \frac{\pi D_2^2}{4}$



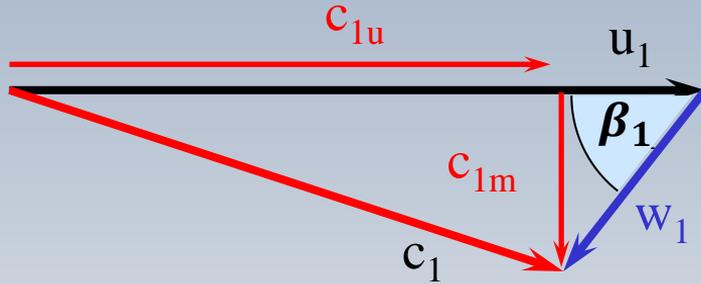
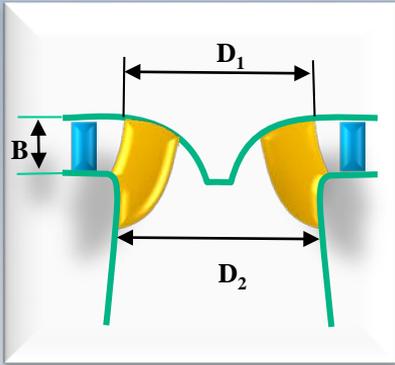
$$B = \frac{D_2^2}{4D_1} = \frac{2.37^2}{4 \times 6.12} = 0.23m$$

$Q = 71.5 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = 543 \text{ m}$
 $\beta_2 = 22^\circ$
 $u_2 = 40,9 \text{ m/s}$
 $\eta_h = 96\%$
 $c_{2m} = c_{1m}$

Exemple I

Angle β_1

$D_2, n, c_{1u}, D_1, B, \beta_1$



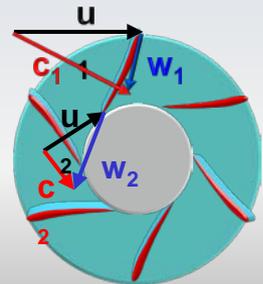
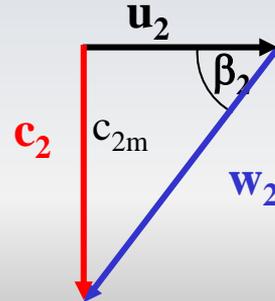
$Q = 71.5 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = 543 \text{ m}$
 $\beta_2 = 22^\circ$
 $u_2 = 40,9 \text{ m/s}$
 $\eta_h = 96\%$
 $c_{2m} = c_{1m}$

Hypothèse 1

$$c_2 = \boxed{c_{1m} = c_{2m}} = u_2 \tan \beta_2 = 40.9 \text{ m/s} \tan 22^\circ = \mathbf{16.52 \text{ m/s}}$$

$(c_2 = c_{2m} = u_2 \tan \beta_2 \text{ (sortie axiale)})$

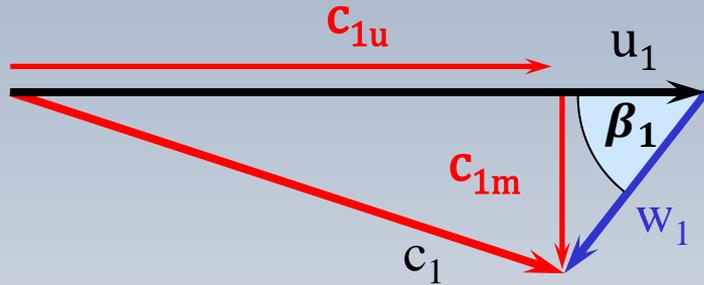
$$c_{2m} = \mathbf{16.52 \text{ m/s}} = c_{1m}$$



Exemple I

$$\begin{aligned}c_{1m} &= 16.52 \text{ m/s} \\u_1 &= 103.2 \text{ m/s} \\c_{1u} &= 49.5 \text{ m/s}\end{aligned}$$

$$D_2, n, c_{1u}, D_1, B, \beta_1$$



$$\tan \beta_1 = \frac{c_{1m}}{u_1 - c_{1u}}$$

$$\begin{aligned}Q &= 71.5 \text{ m}^3/\text{s} \\H &= 543 \text{ m} \\\beta_2 &= 22^\circ \\u_2 &= 40,9 \text{ m/s} \\\eta_h &= 96\% \\c_{2m} &= c_{1m}\end{aligned}$$

$$\beta_1 = \arctan \left(\frac{c_{1m}}{u_1 - c_{1u}} \right) = \arctan \left(\frac{16.52}{103.2 - 49.5} \right) = 17^\circ$$

Vitesse synchrone

La vitesse du générateur est donnée par le nombre de pôles z_p et par la fréquence du réseau f

$$n(\text{rpm}) = \frac{60f}{z_p}$$



$$f = \frac{z_p n}{60}$$

$f = 50$ cycles/s : Europe

$f = 60$ cycles/s : Québec

Exemple I

$$n = 332.8 \text{ rpm}$$

Modifier D_2 en fonction de la vitesse synchrone la plus proche

$$f = \frac{z_p n}{60} \quad \Rightarrow \quad z_p = \frac{3000}{n} = 9.013 \quad (f = 50)$$

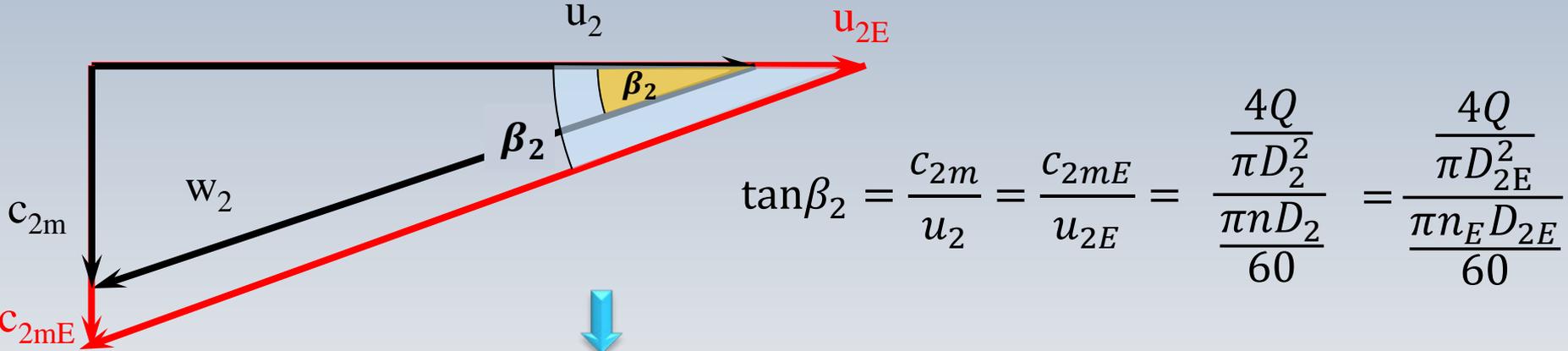
$$\text{avec } z_p = 9 \quad \Rightarrow \quad n_E = \frac{3000}{9} = 333 \text{ rpm}$$

Exemple I



$$D_2 = 2.347m \quad n_E = 333 \text{ rpm}$$
$$n = 332.8 \text{ rpm}$$

On garde la forme du triangle de vitesses (similitude)



$$\tan\beta_2 = \frac{c_{2m}}{u_2} = \frac{c_{2mE}}{u_{2E}} = \frac{\frac{4Q}{\pi D_2^2}}{\frac{\pi n D_2}{60}} = \frac{4Q}{\pi n_E D_{2E}^2} = \frac{4Q}{\pi n_E D_{2E}^2}$$



$$n_E D_{2E}^3 = n D_2^3$$



$$D_{2E} = D_2 \sqrt[3]{\frac{n}{n_E}} = 2.347m \sqrt[3]{\frac{332.8}{333}} = 2.35m$$

Exemple II

Pour une turbine Francis on a les données suivantes:

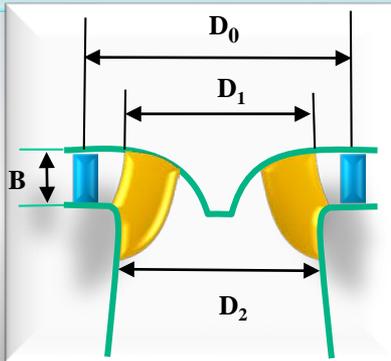
Diamètre et hauteur du rotor à l'entrée, $D_1=2m$, et $B=0.2m$

Diamètre du rotor à la sortie $D_2=1m$, les angles $\beta_1=120^\circ$ et $\beta_2=45^\circ$

Vitesse de rotation $n=375\text{ rpm}$

% de la surface occupée par les aubes (entrée et sortie) 10%

La chute $H=200m$ et la turbine opère *au point optimal* ($c_{2u}=0$)



Exemple II

- a) Obtenir le débit Q
- b) Construire les triangles de vitesse à l'entrée et à la sortie
Calculer l'angle α_1 ainsi que la vitesse absolue c_1
- c) Calculer la hauteur effective H_e et la puissance correspondante \dot{W}_e

On définit la hauteur effective H_e comme celle prédite par l'équation 'Euler

Exemple II

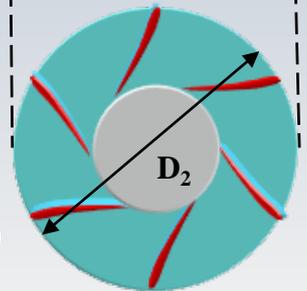
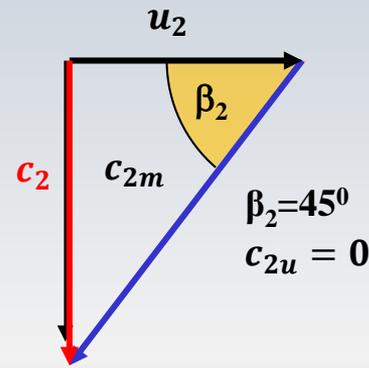
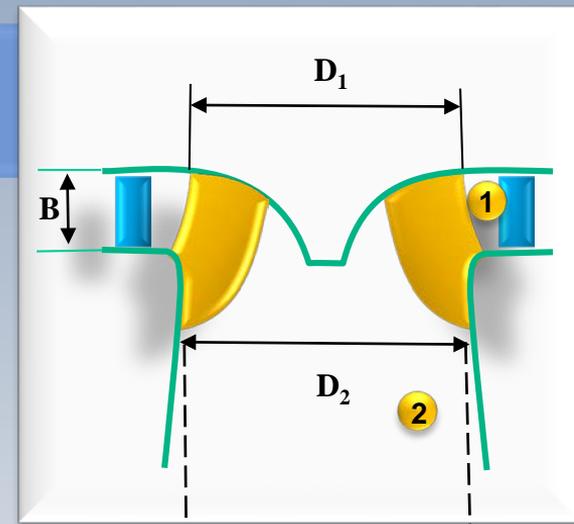
a) le débit $Q = c_{2m} \frac{\pi D_2^2}{4} \times (1 - 0.1)$

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} = \frac{\pi \times 1 \times 375}{60} = 19.63 \text{ m/s}$$

$$u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \times 2 \times 375}{60} = 39.27 \text{ m/s}$$

$$\tan \beta_2 = \frac{c_{2m}}{u_2} \quad \rightarrow$$

$B=0.2 \text{ m}$, $D_1=2 \text{ m}$, $D_2=1 \text{ m}$, $\beta_1=120^\circ$, $\beta_2=45^\circ$
 $c_{2u}=0$, $H=200 \text{ m}$, $n=375 \text{ rpm}$, $ep=10\%$



Exemple II

c_1 et α

$$c_{2m} = u_2 \tan \beta_2 = 19.63 \text{ m/s}$$

$$u_2 = 19.63 \text{ m/s}$$

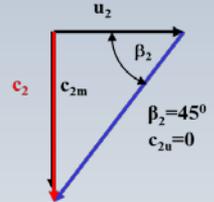
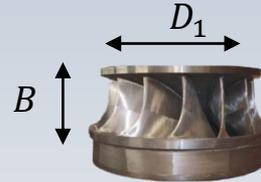
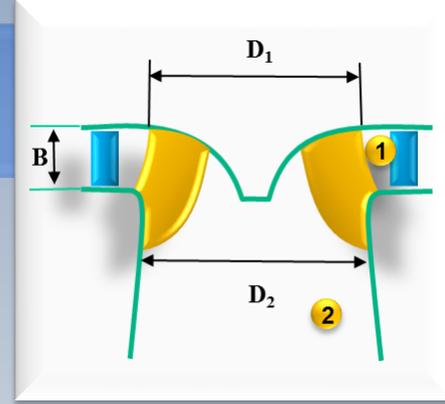
Sortie

$$Q = c_{2m} \frac{\pi D_2^2}{4} \times (1 - 0.1) = 19.63 \frac{\pi \times 1}{4} 0.9 = 13.88 \text{ m}^3/\text{s}$$

Entrée $c_1 = f(u_1, c_{1m}, c_{1u})$

$$Q = c_{1m} A_1 = c_{1m} \pi D_1 \times B \times (1 - 0.1)$$

$$c_{1m} = Q / (\pi D_1 B (1 - 0.1)) = 13.88 / (\pi \times 2 \times 0.2 \times 0.9) = 12.27 \text{ m/s}$$



$B=0.2 \text{ m}$, $D_1=2 \text{ m}$, $D_2=1 \text{ m}$, $\beta_1=120^\circ$, $\beta_2=45^\circ$
 $c_{2u}=0$, $H=200 \text{ m}$, $n=375 \text{ rpm}$, $\text{ep}=10\%$

Exemple II

c_1 et α

$$c_{1m} = 12.27 \text{ m/s}$$

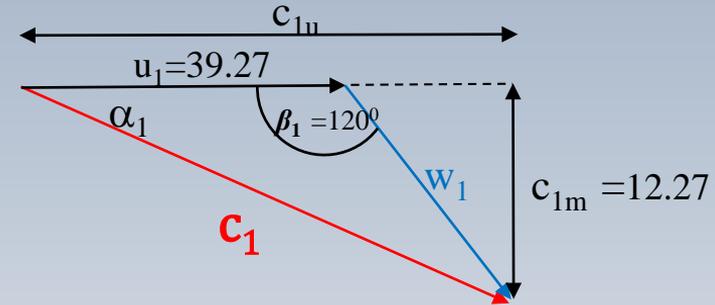
$$u_1 = 39.27 \text{ m/s}$$

b) le triangle de vitesses à l'entrée

$$\tan(180 - \beta_1) = \frac{c_{1m}}{c_{1u} - u_1}$$

$$c_{1u} = u_1 + \frac{c_{1m}}{\tan(180^\circ - \beta_1)} = 46.35 \text{ m/s} \longrightarrow c_1 = \sqrt{c_{1m}^2 + c_{1u}^2} = 47.93 \text{ m}$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{c_{1m}}{c_{1u}} = \frac{12.27}{46.35} \longrightarrow \alpha_1 = 14.82^\circ$$



$B=0.2 \text{ m}, D_1=2 \text{ m}, D_2=1 \text{ m}, \beta_1=120^\circ, \beta_2=45^\circ$
 $c_{2u}=0, H=200 \text{ m}, n=375 \text{ rpm}, \text{ep}=10\%$

Exemple II

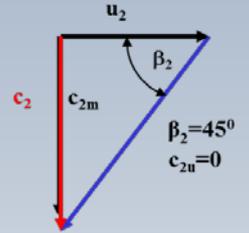
$$c_{1u} = 46.35 \text{ m/s} \quad Q = 13.88 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$u_1 = 39.27 \text{ m/s}$$

c) la chute H_e et la puissance \dot{W}_e

$$H_e = \frac{u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}}{g} = \frac{39.27 \times 46.35}{9.8} = 185.73 \text{ m/s}$$

$$\dot{W}_e = \gamma Q H_e = 25263 \text{ kW}$$

$$\eta_e = \frac{H_e}{H} = \frac{185.73}{200} = 0.9286$$



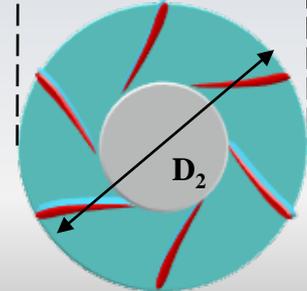
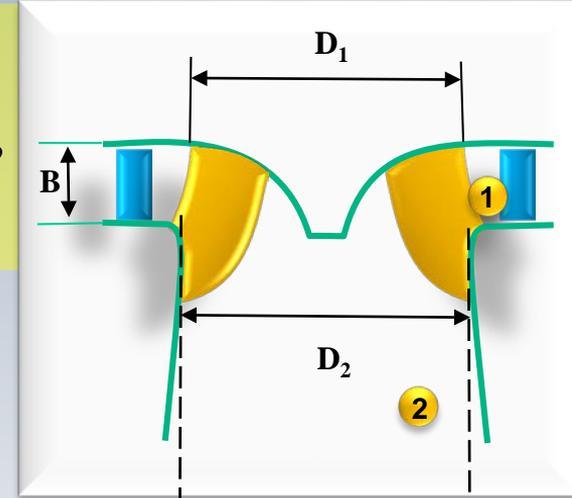
$B=0.2 \text{ m}$, $D_1=2 \text{ m}$, $D_2=1 \text{ m}$, $\beta_1=120^\circ$, $\beta_2=45^\circ$
 $c_{2u}=0$, $H=200 \text{ m}$, $n=375 \text{ rpm}$, $ep=10\%$

Exemple III

On a:

$Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$, $\alpha_1 = 15^\circ$, $D_1 = 1.5 \text{ m}$, $D_2 = 1 \text{ m}$, $c_1 = 75 \text{ m/s}$,
 $H = 200 \text{ m}$, $c_{2u} = 0$, $n = 500 \text{ rpm}$, $\eta_h = 97\%$, $w_2 = 19.1 \text{ m/s}$

On doit trouver: u_1 , w_1 , u_2 , W_e , \dot{W} , H_e



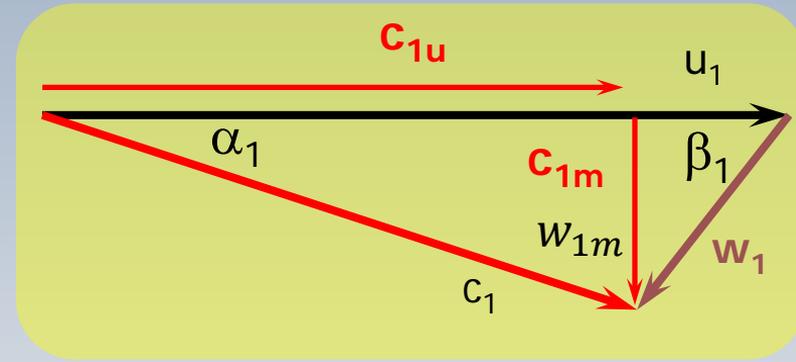
Exemple III

$u_1, w_1, u_2, W_e, \dot{W}, H_e$

$$u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60} = 26.17 \text{ m/s} \quad \checkmark$$

$$w_{1m} = c_{1m} = c_1 \sin \alpha_1 = 19.41 \text{ m/s}$$

$$c_{1u} = c_1 \cos \alpha_1 = 72.44 \text{ m/s} \quad (c_{1u} > u_1)$$



$Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}, \alpha_1 = 15^\circ, D_1 = 1.5 \text{ m}, D_2 = 1 \text{ m}, c_1 = 75 \text{ m/s},$
 $H = 200 \text{ m}, c_{2u} = 0, n = 500 \text{ rpm}, \eta_h = 97\%, w_2 = 49 \text{ m/s}$

Exemple III

$$c_{1u} = 38.63 \text{ m/s}$$

$$u_1 = 19.63 \text{ m/s} \quad w_{1m} = 10.35 \text{ m/s}$$

$$u_1, w_1, u_2, W_e, \dot{W}, H_e$$

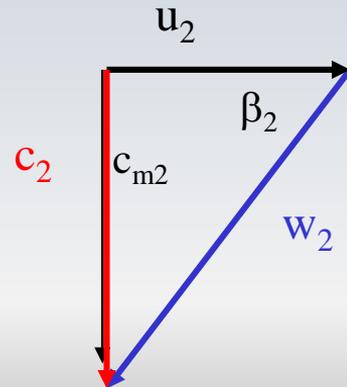
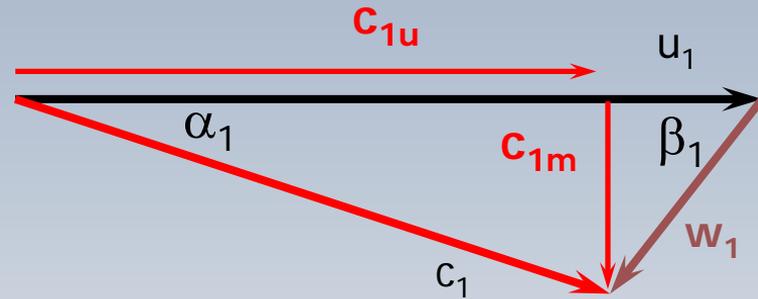
$$w_{1u} = (c_{1u} - u_1) = 44.26 \text{ m/s}$$

$$w_1 = \sqrt{w_{1u}^2 + w_{1m}^2} = 50.17 \text{ m/s} \quad \checkmark$$

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} = 39.27 \text{ m/s} \quad \checkmark$$

$$Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}, \alpha_1 = 15^\circ, D_1 = 1.5 \text{ m}, D_2 = 1 \text{ m}, c_1 = 75 \text{ m/s},$$

$$H = 200 \text{ m}, c_{2u} = 0, n = 500 \text{ rpm}, \eta_h = 97\%, w_2 = 49 \text{ m/s}$$



Exemple III

$$u_2 = 13.09 \text{ m/s}$$

$$u_1 = 19.63 \text{ m/s}$$

$$c_{1u} = 38.63 \text{ m/s}$$

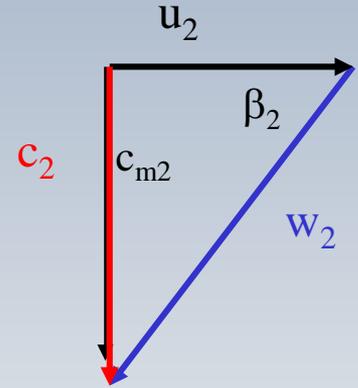
$$w_{1m} = 10.35 \text{ m/s}$$

$$u_1, w_1, u_2, W_e, \dot{W}, H_e$$

$$c_2 = \sqrt{w_2^2 - u_2^2} = 29.3 \text{ m/s}$$

$$W_e = c_{1u} u_1 - 0 = 1901.20 \text{ J/kg} \quad \checkmark$$

$$\dot{W} = \underbrace{\eta_h \rho Q}_{\dot{m}} W_e = 22129 \text{ kW} \quad \checkmark$$



$$H_e = \frac{\dot{W}}{\rho g Q}$$

$Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$, $\alpha_1 = 15^\circ$, $D_1 = 1.5 \text{ m}$, $D_2 = 1 \text{ m}$, $c_1 = 75 \text{ m/s}$,
 $H = 200 \text{ m}$, $c_{2u} = 0$, $n = 500 \text{ rpm}$, $\eta_h = 97\%$, $w_2 = 49 \text{ m/s}$

Exemple IV

On a

$$Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\xi_1 = 0.65$$

$$\xi_2 = 0.43$$

$$B/D_1 = 0.115$$

$$f = 50 \text{ cycles/sec}$$

$$\eta_h = 0.85$$

$$n_s < 66 \text{ (}\dot{W} \text{ en CV)!}$$

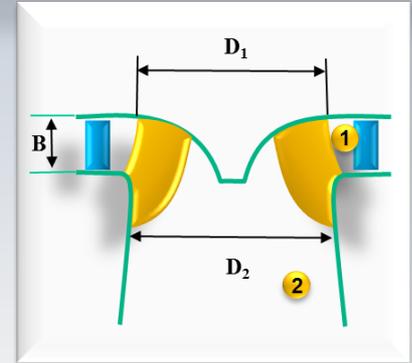
$$H = 200 \text{ m}$$

On doit trouver

\dot{W} [kW], n [rpm], z_p , (paires de pôles) D_1, D_2 [m], B [m]

$$u_1 = \xi_1 \sqrt{2gH}$$

$$u_2 = \xi_2 \sqrt{2gH}$$



$$n_s = \frac{n \sqrt{\dot{W}}}{H^{5/4}}$$

Exemple IV

\dot{W} [kW], n [rpm], z_p , D_1 , D_2 [m], B

$$\dot{W} = \rho g Q H \eta = 9.8 \times 1000 \times 3 \times 200 \times 0.85 = 4998 \text{ kW} \quad \checkmark$$

$$n_s = \frac{n \sqrt{\dot{W}}}{H^{5/4}} \quad (\dot{W} = \dot{W} / 735 = 6800) \quad n_s = \frac{n \sqrt{6800}}{200^{5/4}} = 0.1096 n$$

$$n_s = 0.1096 n < 66 \quad \Rightarrow \quad n < \frac{66}{0.1096} = 605.5 \text{ rpm} \quad \checkmark$$

contrainte

$Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$, $\xi_1 = 0.65$, $\xi_2 = 0.43$, $B/D_1 = 0.115$, $f = 50 \text{ cycles/sec}$, $\eta_h = 0.85$, $n_s < 66$ (\dot{W} en CV), $H = 200 \text{ m}$

Exemple IV

$$n(\text{rpm}) = \frac{60f}{z_p}$$

$$z_p n = 60 \times f = 60 \times 50 = 3000$$

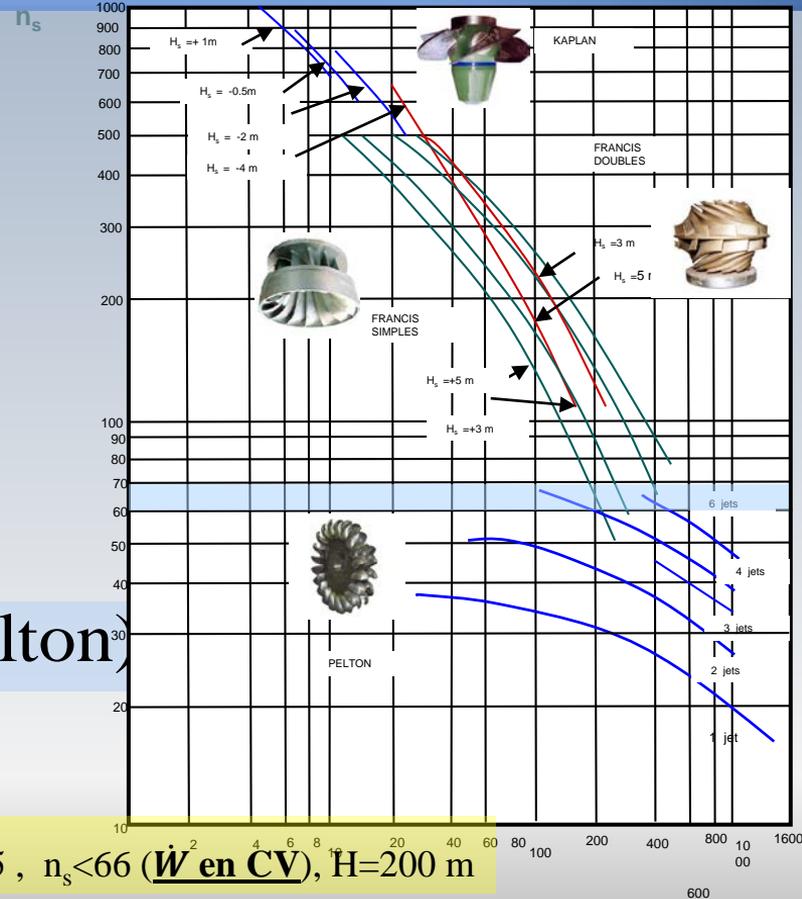
$$z_p = 5 \quad \leftarrow \quad n \sim 605.5 \text{ rpm}$$

$$z_p = 5 \Rightarrow n = \frac{3000}{5} = 600 \text{ rpm}$$

$$n_s = 0.1096n = 65.7$$

Francis (Pelton)

$W [kW], n [\text{rpm}], z_p, D_1, D_2 [m], B$



$Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}, \xi_1 = 0.65, \xi_2 = 0.43, B/D_1 = 0.115, f = 50 \text{ cycles/sec}, \eta_h = 0.85, n_s < 66$ (W en CV), $H = 200 \text{ m}$

Exemple IV

W [kW], n [rpm], z_p , D_1 , D_2 [m], B

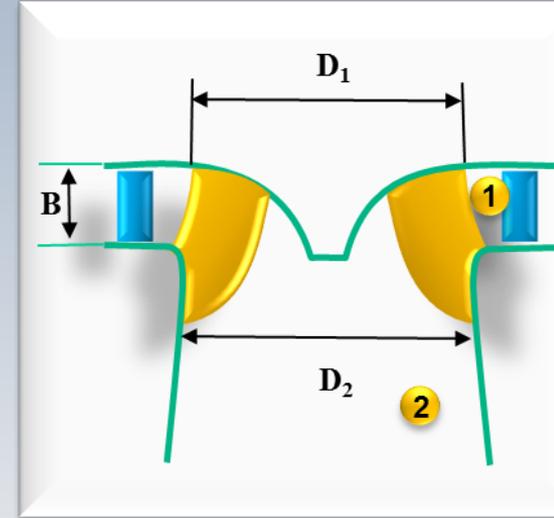
$$u_1 = \xi_1 \sqrt{2gH} = 0.65 \sqrt{2g \times 200} = 40.7 \text{ m/s}$$

$$u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60} \Rightarrow D_1 = 1.29 \text{ m}$$

$$u_2 = \xi_2 \sqrt{2gH} = 0.43 \sqrt{2g \times 200} = 26.9 \text{ m/s}$$

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} \Rightarrow D_2 = 0.857 \text{ m}$$

$$\frac{B}{D_1} = 0.115 \Rightarrow B = 1.29 \text{ m} \times 0.115 = 0.149 \text{ m}$$



$Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$, $\xi_1 = 0.65$, $\xi_2 = 0.43$, $B/D_1 = 0.115$, $f = 50 \text{ cycles/sec}$, $\eta_h = 0.85$, $n_s < 66$ (\dot{W} en CV), $H = 200 \text{ m}$

Exemple V

Pour une turbine Francis on a les données suivantes:

La puissance produite, $\dot{W} = 5000kW$, le coefficient $\varphi_1 = 0.28$ pour la composante radiale de la vitesse absolue à l'entrée, l'angle des avant directrices $\alpha_1 = 30^\circ$.

Le rendement hydraulique est $\eta = 0.90$ et le rendement global $\eta_g = 0.86$. La chute est $H = 30m$ et la vitesse spécifique *dimensionnelle* est $n_s = 270 (\dot{W}[kW], H[m], n[rpm])$

$$c_{1m} = \varphi_1 \sqrt{2gH}$$



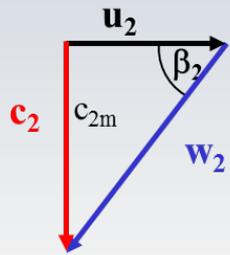
Exemple V

La vitesse à la sortie est axiale et on doit calculer:

La vitesse de rotation $n(\text{rpm})$

Le diamètre D_1 et l'épaisseur b_1 de la roue à l'entrée

L'angle théorique β_1 à l'entrée

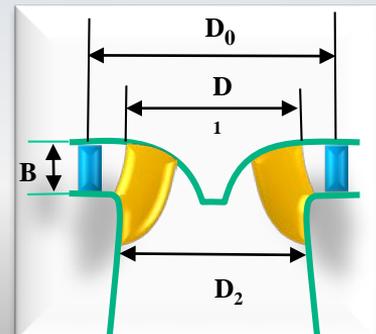


$$c_{2u} = 0$$

Triangle de vitesses à la sortie **2**

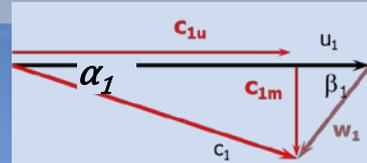
$$c_{1m} = \varphi_1 \sqrt{2gH}$$

$$\dot{W} = 5000 \text{ kW}, \quad \varphi_1 = 0.28, \quad \alpha_1 = 30^\circ, \quad \eta_h = 0.90, \quad \eta_g = 0.86, \quad H = 30 \text{ m}, \quad n_s = 270$$



Exemple V

$n(\text{rpm}), D_1, B_1, \beta_1$



La vitesse de rotation $n(\text{rpm})$

$$n_s = \frac{n\sqrt{\dot{W}}}{H^{5/4}} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{n_s H^{5/4}}{\sqrt{\dot{W}}} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{270(30)^{5/4}}{\sqrt{5000}} = 267 \text{ rpm} \quad \checkmark$$

Le diamètre $D_1 = 60U_1/\pi n$; $U_1?$ \rightarrow équation d'Euler

$$c_{1m} = \varphi_1 \sqrt{2gH} \quad c_{1m} = 0.28\sqrt{2 \times 9.8 \times 30} = 6.79 \text{ m/s}$$

$$\tan\alpha_1 = \frac{c_{1m}}{c_{1u}} \quad \Rightarrow \quad c_{1u} = \frac{c_{1m}}{\tan\alpha_1} = \frac{6.79}{\tan 30} = 11.76 \text{ m/s}$$

$\dot{W} = 5000 \text{ kW}, \varphi_1 = 0.28, \alpha_1 = 30^\circ, \eta_h = 0.90, \eta_g = 0.86, H = 30 \text{ m}, n_s = 270$

On définit la hauteur effective H_e comme celle prédite par l'équation d'Euler

Exemple V

$n(\text{rpm}), D_1, B_1, \beta_1$

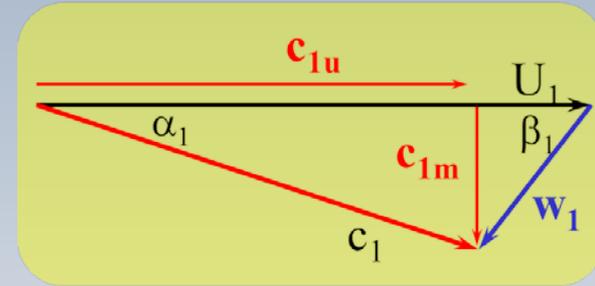
$$c_{2u} = 0$$

$$c_{1u} = 11.76 \text{ m/s}$$

$$H_e = \eta_h H = 0.9 \times 30 = 27 \text{ m}$$

$$H_e = \frac{c_{1u}U_1 - \cancel{c_{2u}U_2}}{g} \quad \rightarrow \quad U_1 = \frac{gH_e}{c_{1u}} = \frac{9.8 \times 27}{11.76} = 22.5 \text{ m/s}$$

$$D_1 = \frac{60U_1}{\pi n} = \frac{60 \times 22.5}{\pi \times 267} = 1.61 \text{ m}$$



$\dot{W} = 5000 \text{ kW}, \varphi_1 = 0.28, \alpha_1 = 30^\circ, \eta_h = 0.90, \eta_g = 0.86, H = 30 \text{ m}, n_s = 270$

On définit la hauteur effective H_e comme celle prédite par l'équation 'Euler

Exemple V

$n(\text{rpm}), D_1, B_1, \beta_1$

$$U_1 = 22.5 \text{ m/s} \quad c_{1m} = 6.79 \text{ m/s}$$
$$c_{1u} = 11.76 \text{ m/s} \quad D_1 = 1.61 \text{ m}$$

L'épaisseur B_1

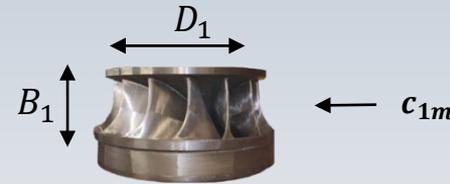
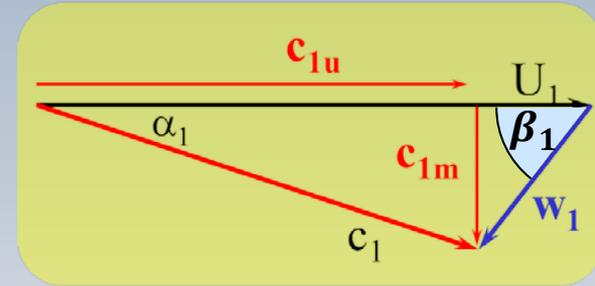
$$\dot{W} = 5000 \text{ kW} = \eta_g \rho g Q H = 0.86 \times 1000 \times 9.8 \times Q \times 30$$

$$\Rightarrow Q = 19.8 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$B_1 = \frac{Q}{\pi D_1 c_{1m}} = \frac{19.8}{\pi \times 1.61 \times 6.79} = 0.579 \text{ m} \quad \checkmark$$

L'angle théorique β_1

$$\tan \beta_1 = \frac{c_{1m}}{U_1 - c_{1u}} = \frac{6.79}{22.5 - 11.76} = 0.632 \quad \Rightarrow \beta_1 = 32.3^\circ \quad \checkmark$$



$$\dot{W} = 5000 \text{ kW}, \quad \varphi_1 = 0.28, \quad \alpha_1 = 30^\circ, \quad \eta_h = 0.90, \quad \eta_g = 0.86, \quad H = 30 \text{ m}, \quad n_s = 270$$

À venir

À venir:
La turbine Kaplan

Les fleuves nous racontent que....