

Conversion électro mécanique de l'énergie

Alexandre LABERGUE

alexandre.labergue@univ-lorraine.fr

Bureau 015 Jaune



Programme & Plan

1. CM n°1

- Introduction générale
- Théorie générale des machines tournantes – Partie 1: rappels
- Théorie générale des machines tournantes – Partie 2: applications aux turbomachines

2. CM n°2

- Turbopompes

3. CM n°3

- Turbines hydrauliques – Partie 1: généralités
- Turbines hydrauliques – Partie 2: turbines à action (Pelton)
- Turbines hydrauliques – Partie 3: turbines à action (Kaplan et Francis)

4. CM n°4

- L'énergie éolien – Partie 1
- L'énergie éolien – Partie 2

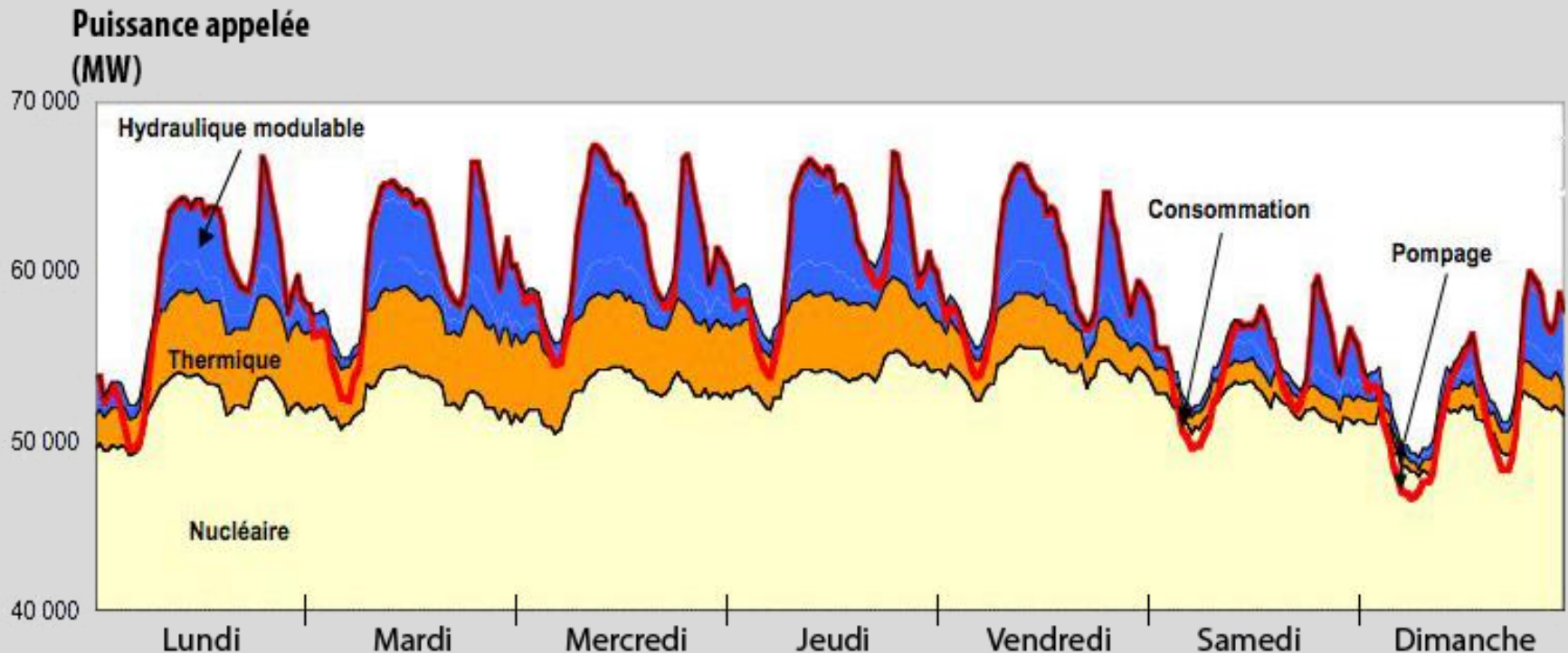
3. CM n°3

Turbines hydrauliques – Partie 1

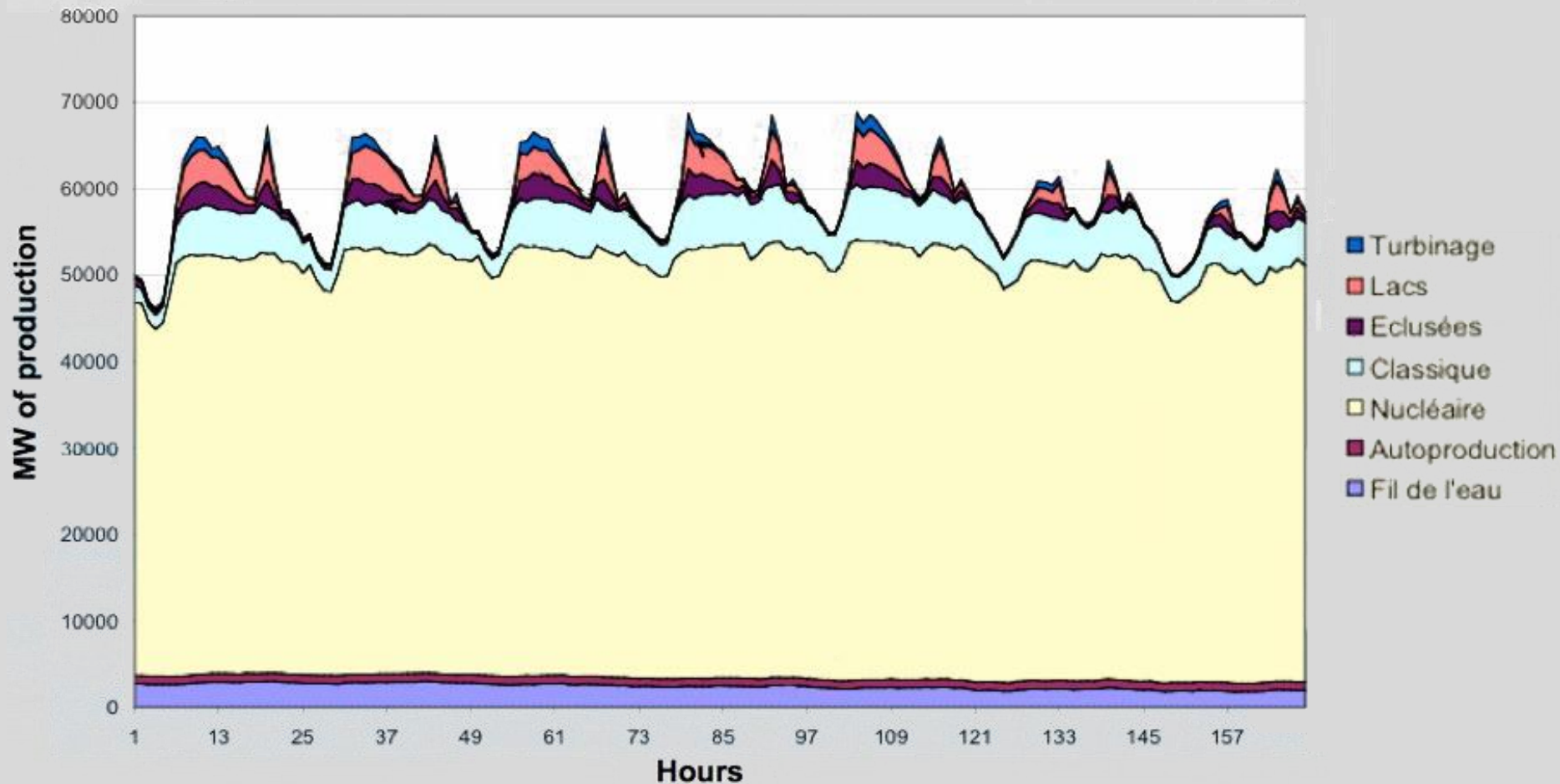
Généralités

Les différentes installations et positionnement dans le mix énergétique

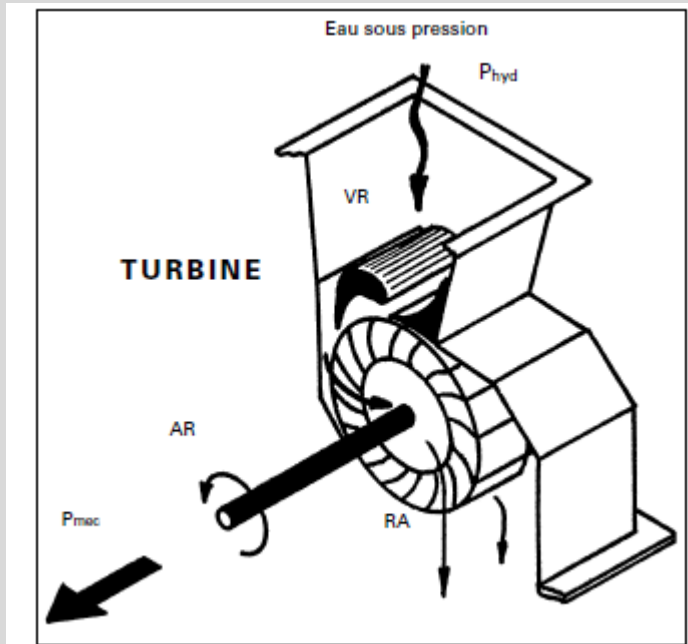
- **Fil de l'eau:** production permanente et contribue à la “base”
 - ☞ **Fréquence sécheresses menace latente?**
- **Lacs de barrages (modulable):** grande flexibilité pour répondre à des pics



Les différentes installations et positionnement dans le mix énergétique



Constitution générale d'une turbine



VR: vanne de réglage du débit d'eau
(nommée **distributeur** ou **injecteur** selon le type de turbine).
Celle-ci permet de régler la puissance en fonction des besoins du consommateur et de l'eau à disposition

RA: roue à aubes ou à augets

AR: arbre en rotation

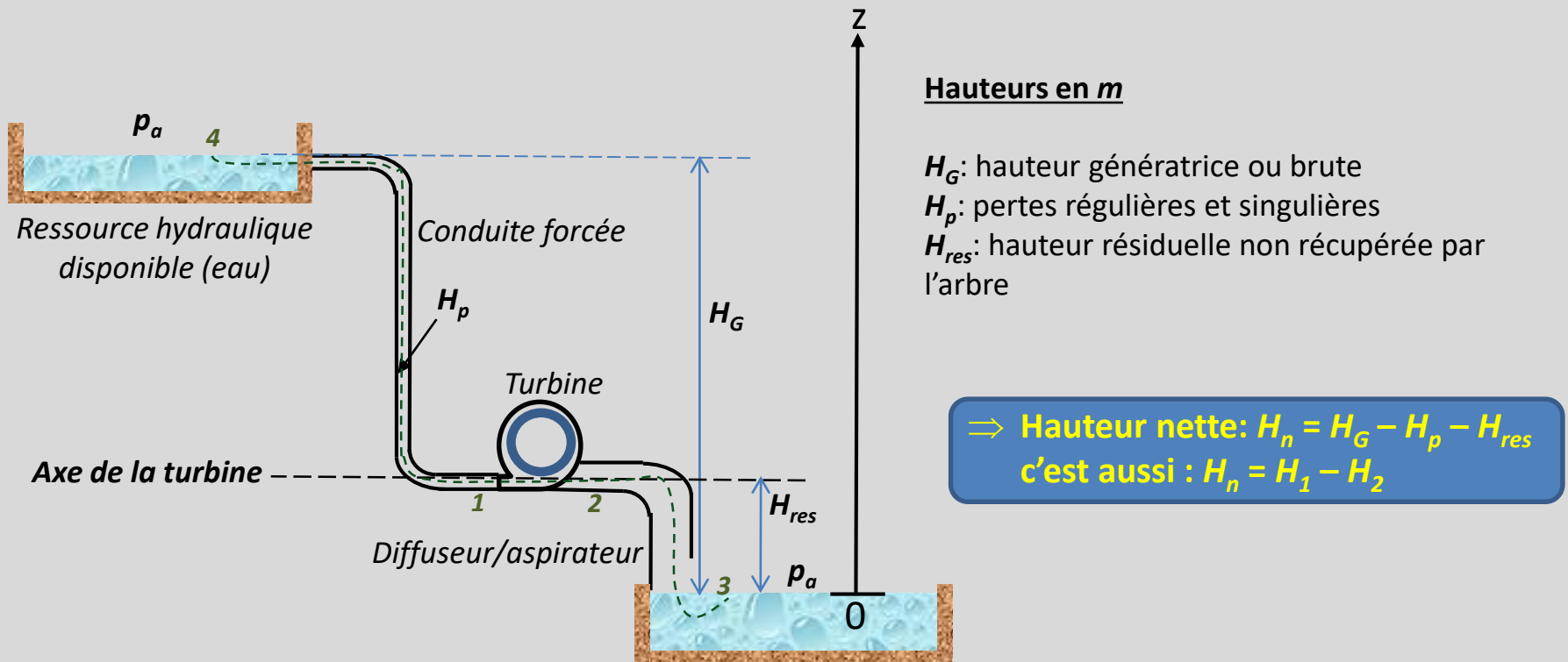
P_{hyd} : puissance hydraulique fournie à la turbine par un débit d'eau sous pression

P_{mec} : puissance mécanique délivrée par la turbine

Toutes les turbines productrices d'énergie électrique comportent au moins:

- Un distributeur: dispositif de réglage du débit (ouverture A)
- Une roue (noyée ou non)
- Une génératrice
- Et d'un diffuseur/aspirateur pour turbines à réactions uniquement

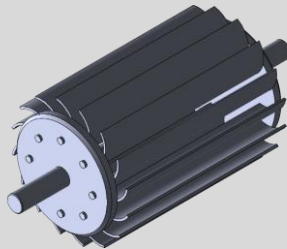
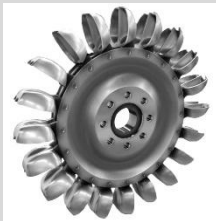
Schéma type d'une installation et cascade d'énergie :



Domaines d'applications des turbines principales

Vitesses spécifiques, hauteur nette et débits d'utilisation des turbines les plus courantes

Turbine	n_{sp} (tr/mn)	H_n (m)	Q_v (m ³ /s)
Pelton	6 à 60; petit	40 à 2000 ; grand	petit
Banki-Mitchell	30 à 210; moyen	2 à 200; petit	moyen
Francis	50 à 350; moyen	6 à 250; moyen	moyen
Kaplan ou hélice	200 à 1000; grand	2 à 20; petit	grand



Classification des turbines

Autre coefficients adimensionnels

Enfin : $r = \frac{P_2 - P_1}{\rho g H} = \frac{P_2 - P_1}{\rho D^2 N^2}$: degré de réaction

Ce dernier coefficient permet de classer les turbines en **deux familles**:

1. Turbines à actions

La diminution de la charge est **exclusivement** due à la perte d'énergie cinétique, ainsi on a **$r = 0$** . La roue est généralement à l'air libre ($P_1 = P_2 = P_{air}$).

☞ *Pelton, Banki M.*

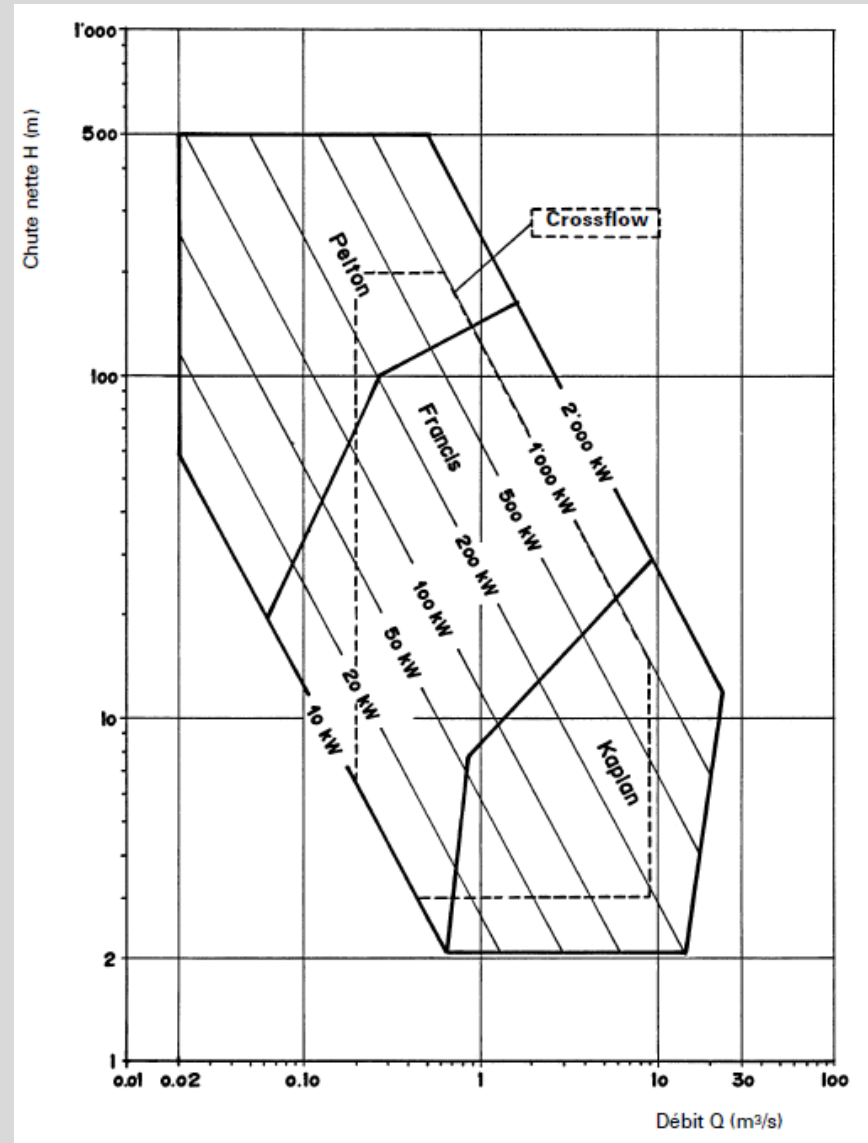
2. Turbines à réactions

Dans ce cas **$r \neq 0$** et la roue est **entièrement noyée** dans le fluide (eau). La mise en rotation est due à la différence de pression entre l'intrados et extrados des aubes et transfert d'énergie cinétique.

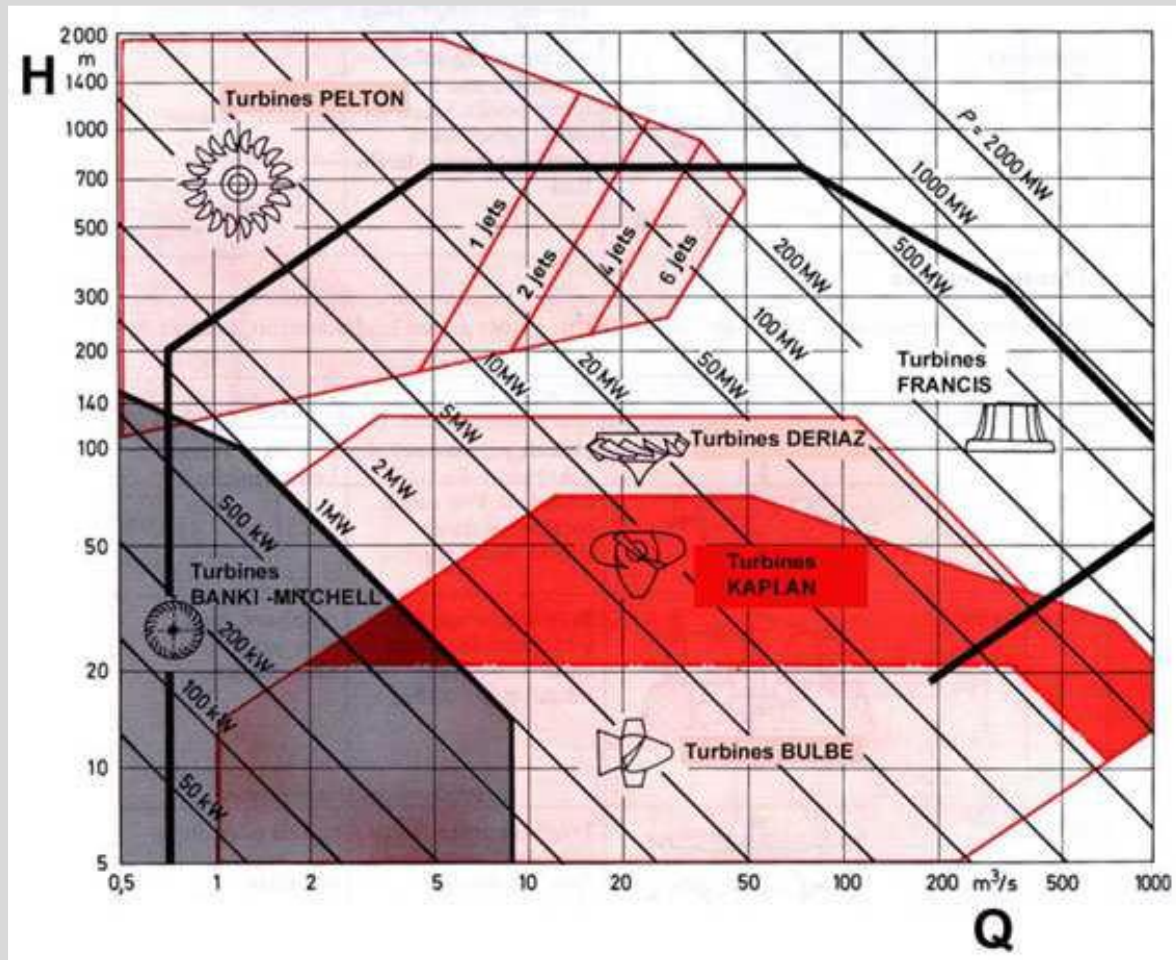
☞ *Kaplan et Francis*

Domaines d'applications des turbines principales

Remarque: Les turbines hydrauliques utilisent l'eau comme ressource primaire et qui est présente dans la nature. Ainsi, la conception d'une centrale hydraulique, et donc le choix de la turbine, est réalisée afin qu'elle soit adaptée à la manière avec laquelle l'eau peut être exploitée.



Domaines d'applications des turbines principales

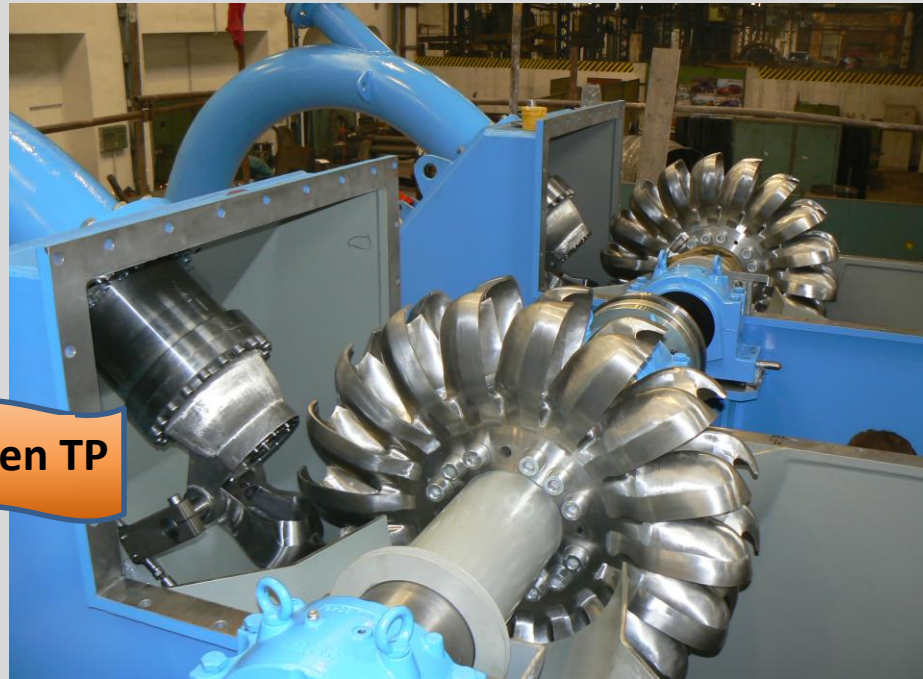


Turbines hydrauliques – Partie 2

Turbines à actions

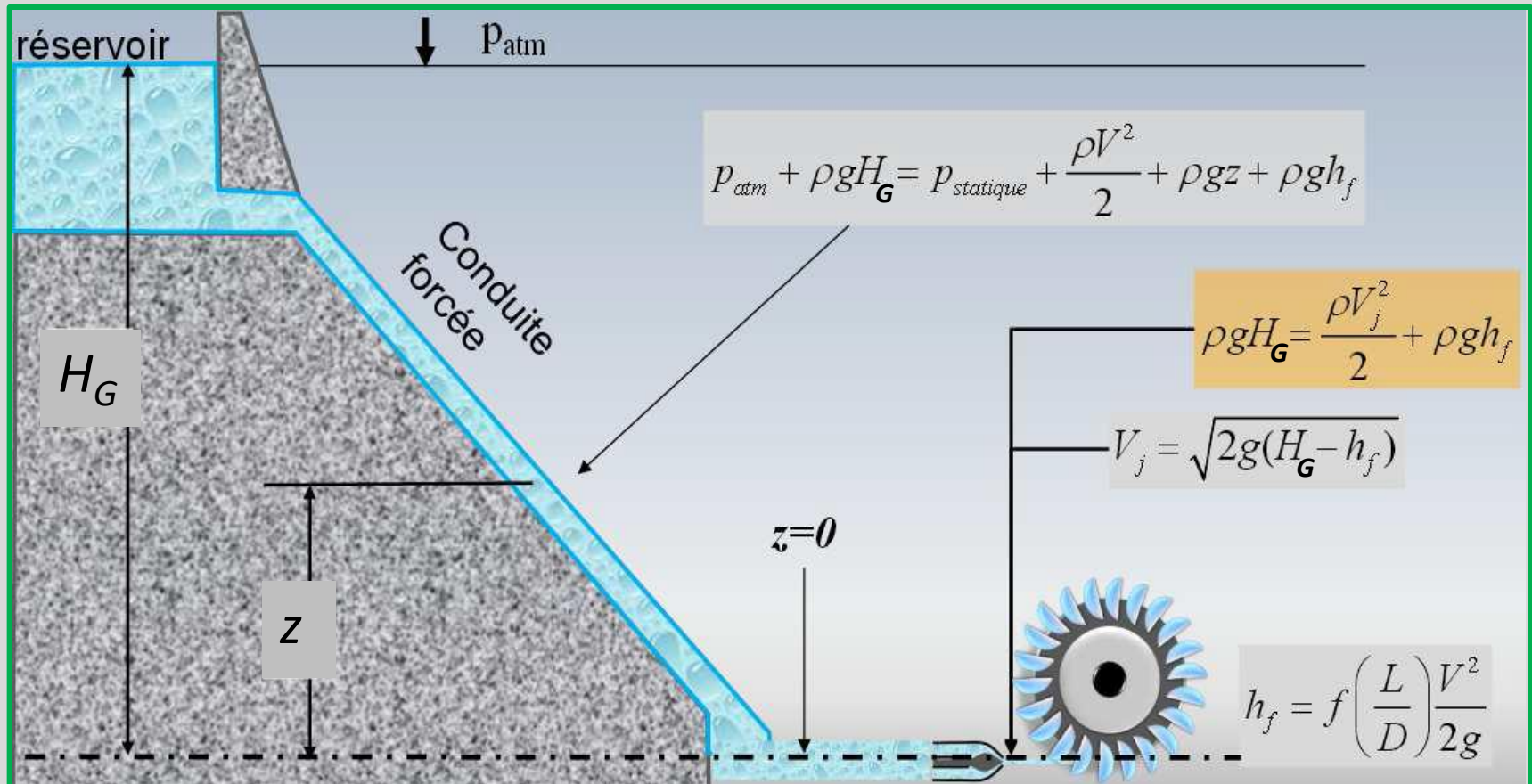
Turbine Pelton – généralités

- Roue à l'air libre: degré de réaction $r = 0$
- Propriétés de fonctionnement: débits Q_V relativement faibles mais chutes d'eau (H_G) grandes (jusque 2000 m)
- Se trouvent donc principalement dans les zones montagneuses ou aux pieds des barrages (cf: STEP)



Sera vue en TP

Turbine Pelton – généralités

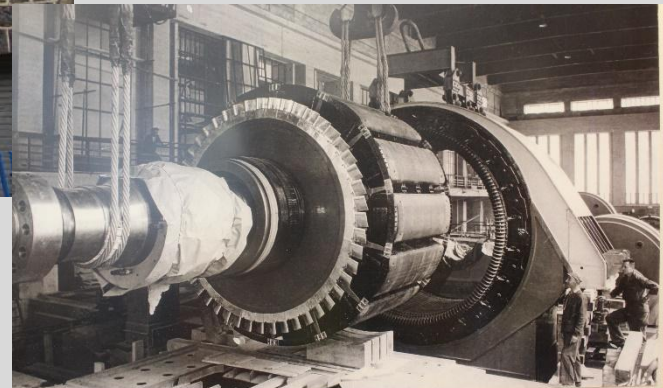


Turbine Pelton – généralités

Installations types

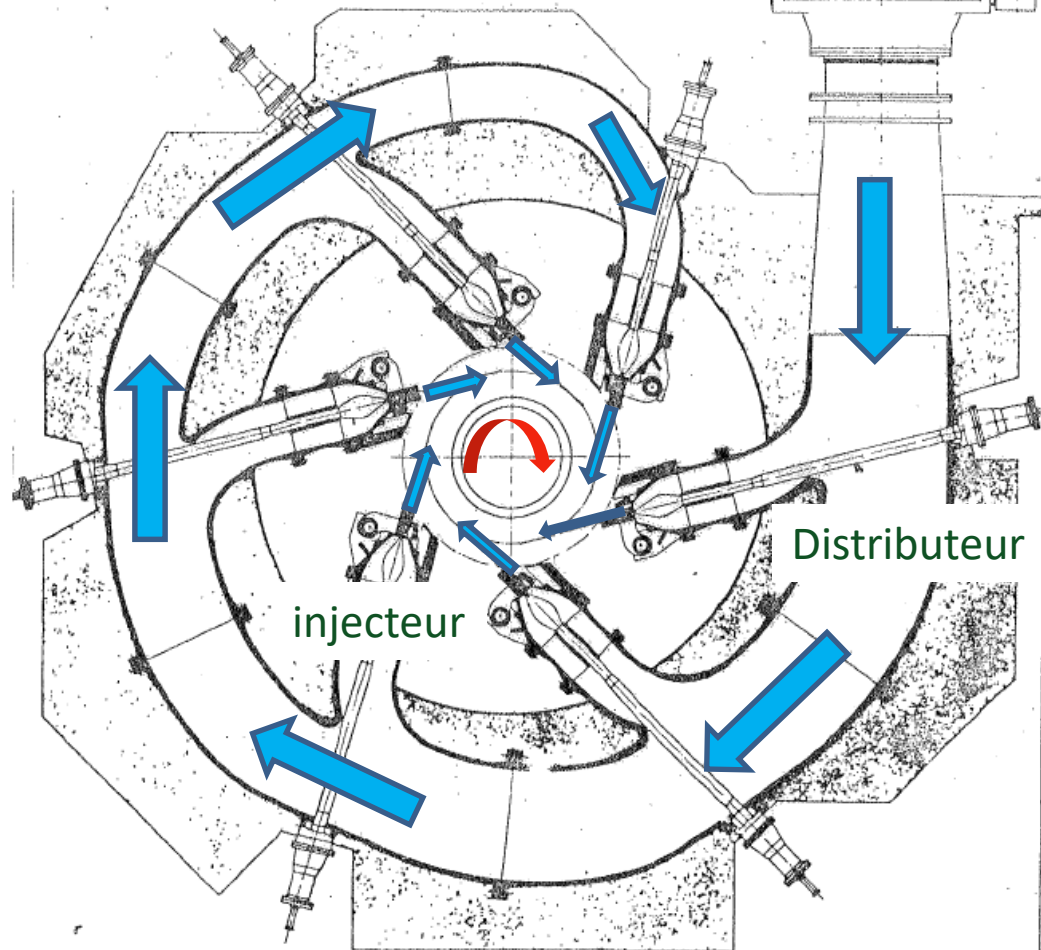


Les roues PELTON sont accouplées à l'alternateur



Le rotor est introduit dans le stator

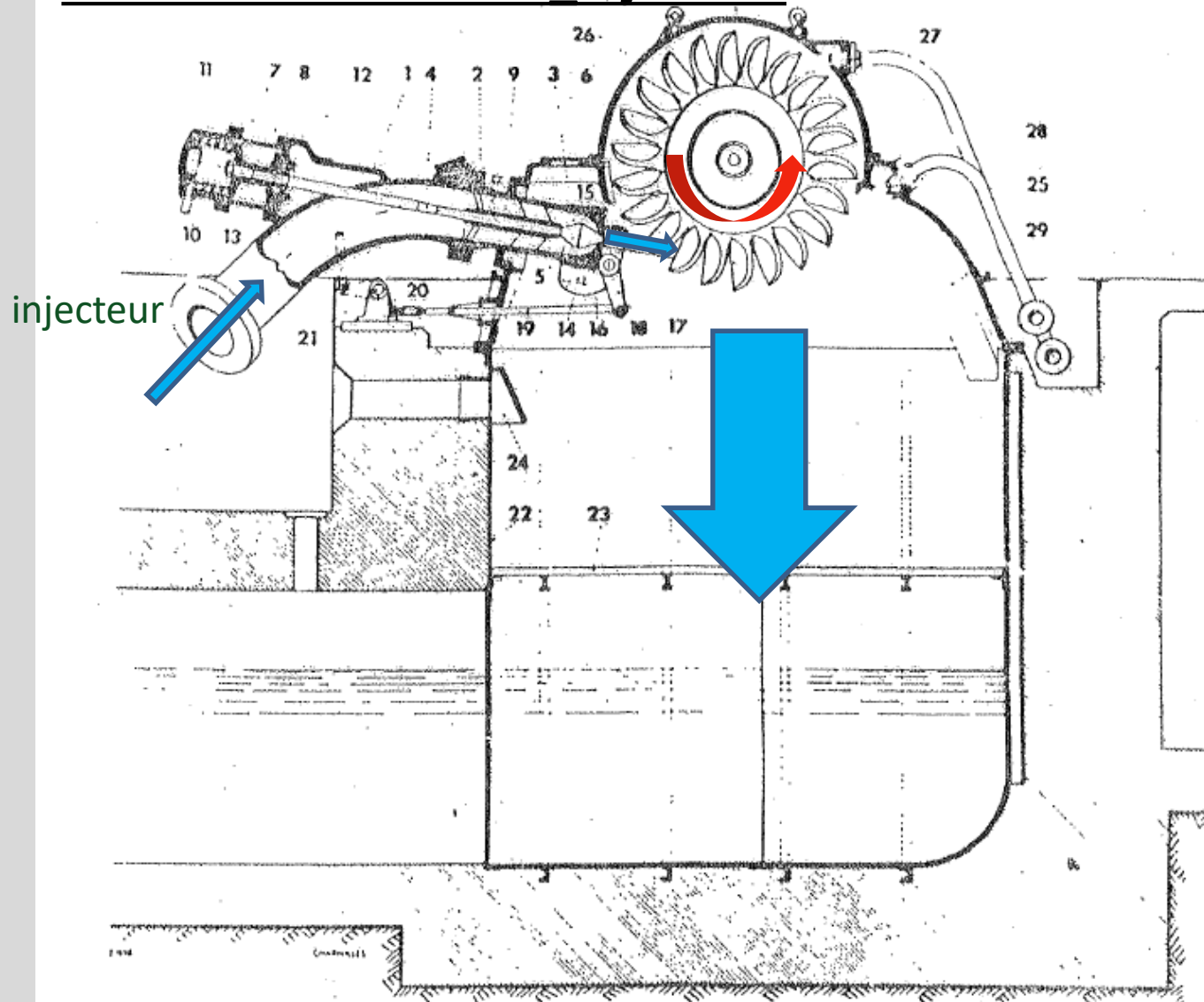
Axe vertical multi injecteurs



2 TURBINES , 62000 KW. 342m. 300trm

Turbine PELTON à 6 jets et axe vertical - Centrale de Bridge River
(Canada) - $H = 342 \text{ m}$ - $N = 300 \text{ tr/min}$ - $P_e = 62 \text{ MW}$

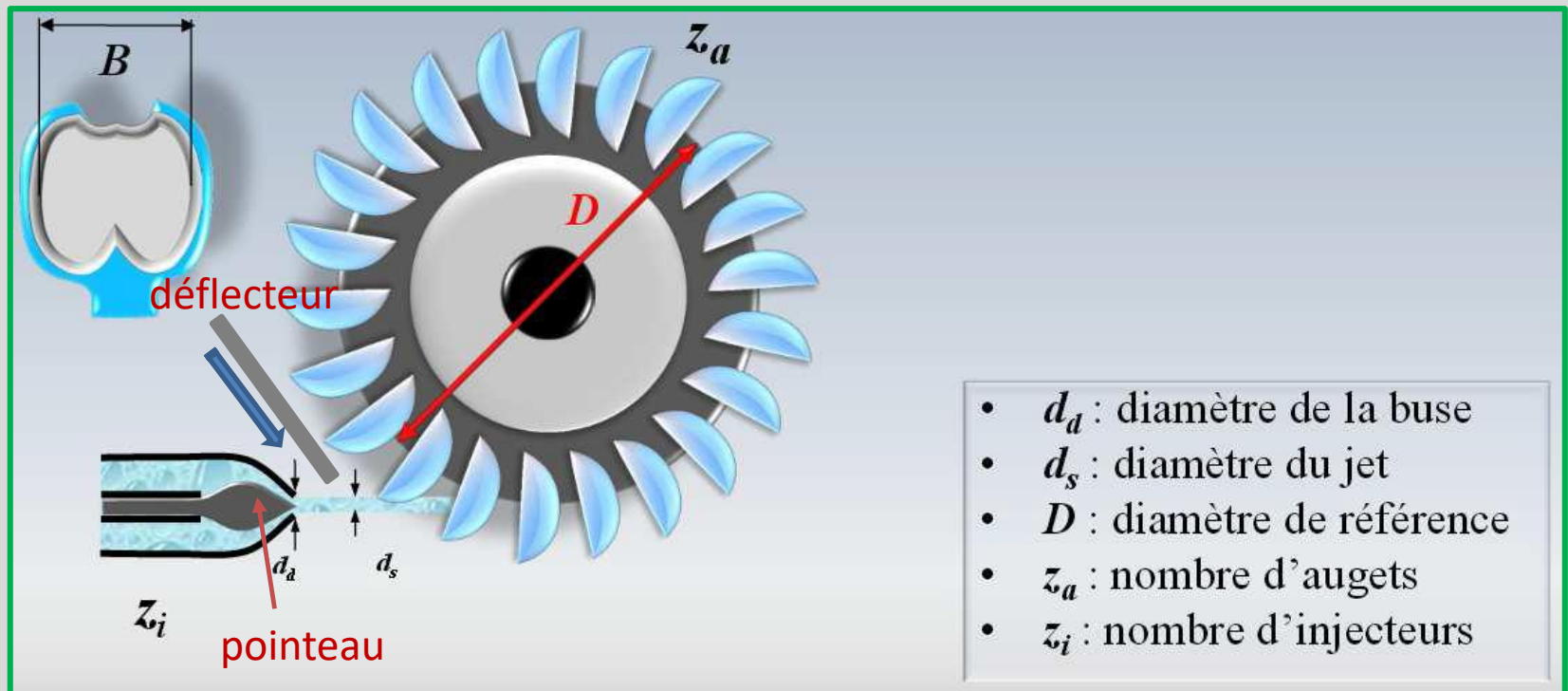
Axe horizontal mono_injecteur



Turbine Pelton – *constitution*

➤ Principaux éléments

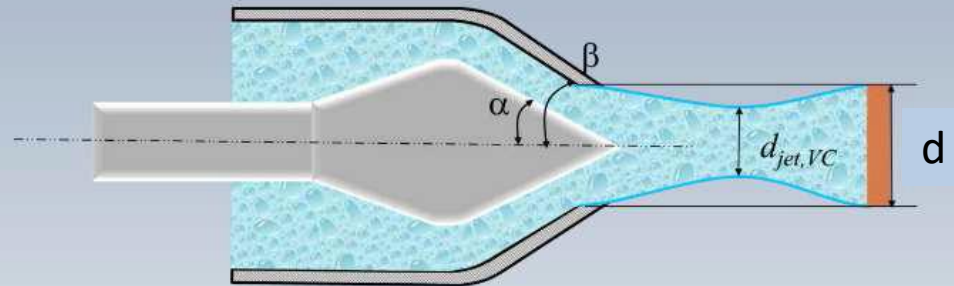
- Injecteur $\equiv$ ouverture A (réglage Q_v)
- Roue à passage tangentiel du fluide et constituée d'augets disposés en périphérie
- Un déflecteur pour dévier le jet et stopper la turbine



Turbine Pelton – *constitution*

➤ Détails de l'injecteur

- Un pointeau à aiguille coulisse dans l'injecteur et permet donc de régler le débit
- Le débit est fixé par la position de l'aiguille et H_G
⇒ Q_v indépendant de la vitesse de rotation N



$$\begin{aligned} 20^\circ \leq \alpha &\leq 30^\circ \\ 30^\circ \leq \beta &\leq 45^\circ. \end{aligned}$$



Turbine Pelton – formules pratiques

➤ Diamètre de la roue D

Rendement de la turbine est optimal pour $\frac{D}{d}=12$

➤ Nombre d'augets z_A

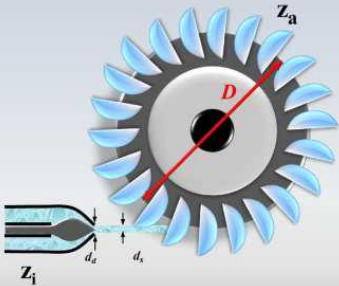
Généralement z_A supérieur à 17

$$z_A = 0.5 \frac{D}{d} + 15$$

➤ Largeur des augets

$$3.1 \leq \left(\frac{B}{d_s} \right) \leq 3.4$$

$B = 3.1 d_s$	1 injecteur
$B = 3.2 d_s$	2 injecteurs
$B = 3.3 d_s$	4-5 injecteurs
$B > 3.3 d_s$	6 injecteurs



Turbine Pelton – *Caractéristiques*

Caclul de la puissance intrinsèque

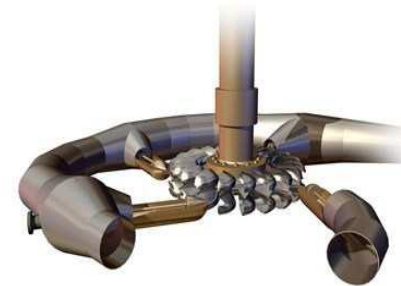
Augets



Turbine Pelton – *Exemple*

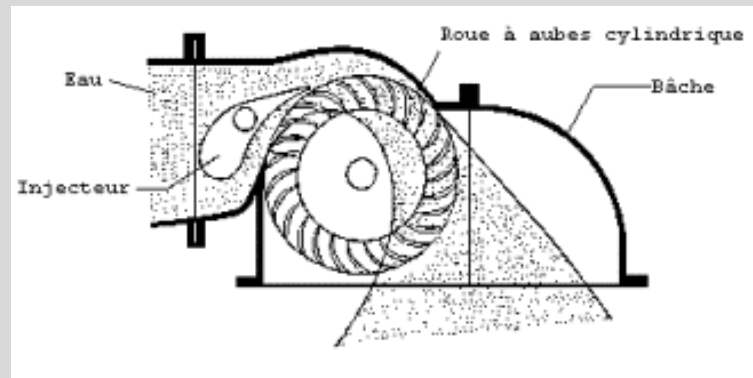
- Centrale électrique de Grande Dixence en Suisse (Canton de Valais)
- Composée de 3 turbines ou unités; les plus grandes turbines en fonctionnement (accident en 2000 et remise en marche en 2010)
- Hauteur de chute max de ~1870 m
- Diamètre de roue de 4,6 m, vitesse de rotation 4100 tr/mn et puissance de 423 MW par unité

Net head, maximum	1'869 m
Net head, minimum	1'633 m
Rated output (per unit)	423 MW
Rated discharge	25 m ³ /s
Rotational speed	428,6 rpm
No. of units	3
No. of jets (per unit)	5
No. of buckets (per runner)	26
Outer diameter of runner	4'630 mm
Turbine contractors	Sulzer Hydro, Hydro Vevey

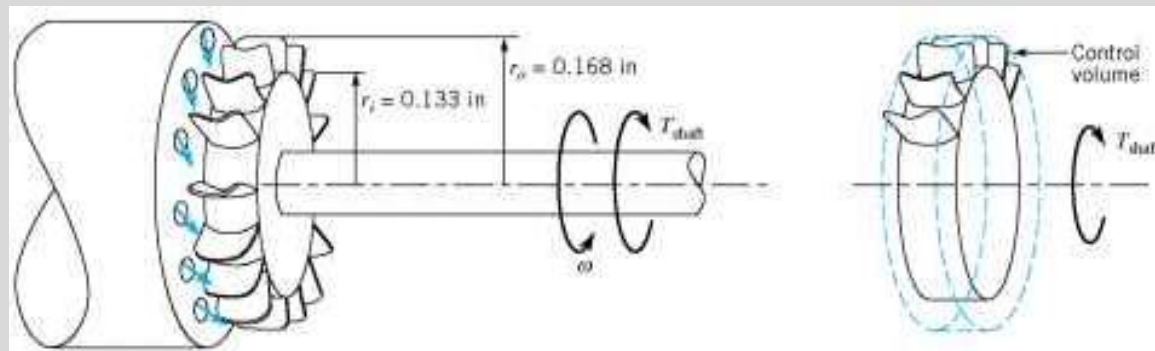


Autres Turbines à actions

- La turbine *crossflow* où le fluide traverse deux fois la roue (d'où son nom). Turbine appelée aussi de Banki-Mitchell et très présente dans les pays en voie de développement



- La *Non-Pelton wheel impulse turbine* où de Dental Drill. Principalement appliquée pour les gaz



Turbines hydrauliques – Partie 2

Turbines à réaction

Rappels

➤ Turbines à réactions

- La pression en amont (entrée) P_1 est supérieure à celle en sortie de roue P_2 ($r \neq 0$)
- Le transfert d'énergie nécessite une grande surface de contact
⇒ La roue est **entièrement noyée** dans le fluide (eau).
- Une partie de l'énergie de pression et cinétique est transférée à la roue. Le reste de l'énergie cinétique et potentielle est collectée ou récupérée par un diffuseur

➤ Principales turbines présentes sur le marché

- Kaplan ou à hélice:

Écoulement axial du fluide; faibles chutes d'eau mais débits élevés; faibles vitesses de rotation ⇒ cas des cours d'eau: fleuves ou grosses rivières

- Francis

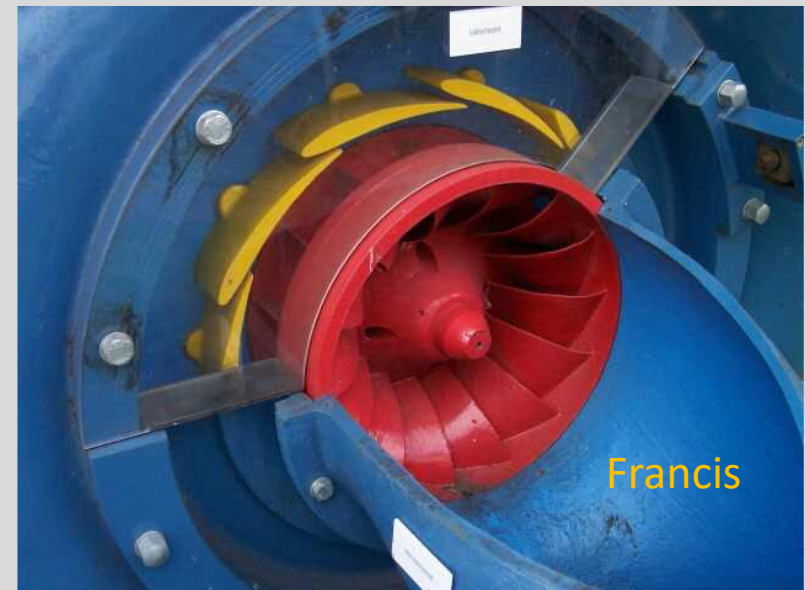
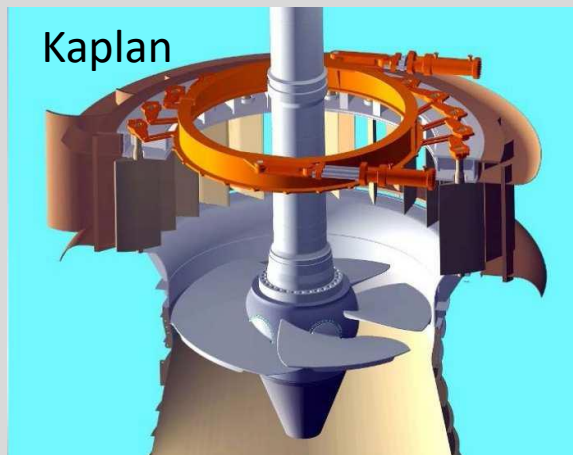
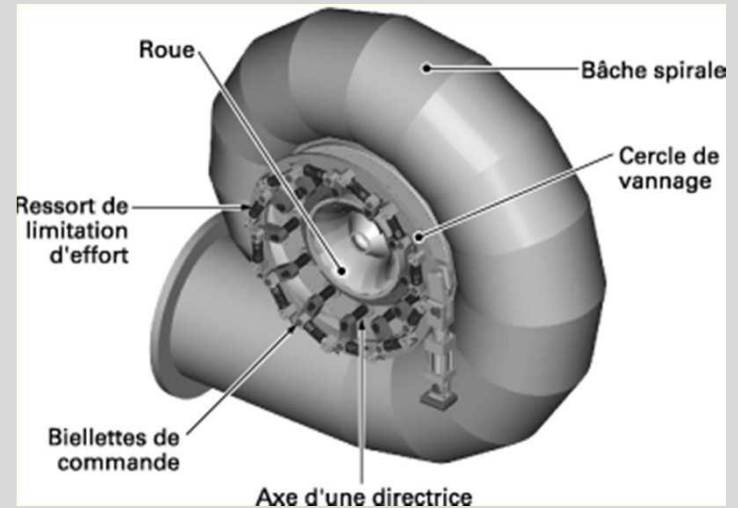
Ecoulement centripète en entrée de roue et axiale en sortie. Moyennes chutes d'eau; Gamme de vitesses de rotations et de débits intermédiaires.

⇒ réversible: pompage et turbinage (cf: STEP)

Alimentation des turbines à réaction

L'alimentation est quasiment commune à toutes turbines et est constituée d'une bêche et d'un distributeur :

- la bêche est raccordée à la conduite amont, elle est en général sous forme de colimaçon (bêche spirale)
- le distributeur (ouverture A) sert à régler le débit (constitué de directrices profilées, solidaires et actionnées par le cercle de vannage) et à faire varier l'angle d'entrée

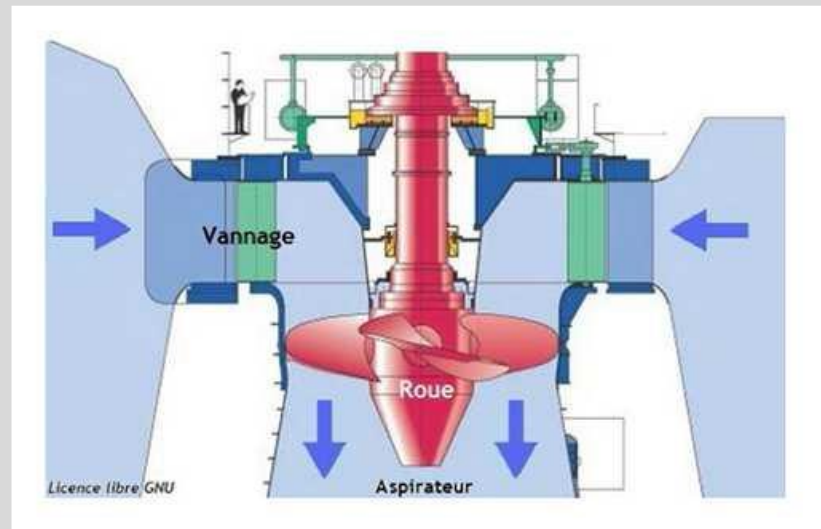


Roue Kaplan

Turbine à réaction la plus complexe

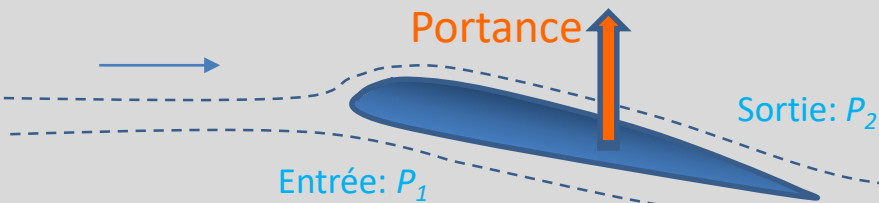
- Distributeur réglable (génératrices profilées) **et** calage des pâles réglable
- Paramètres qui doivent donc être accordés pour rester dans un régime optimal

⇒ Turbine la plus adaptée pour des débits très variables



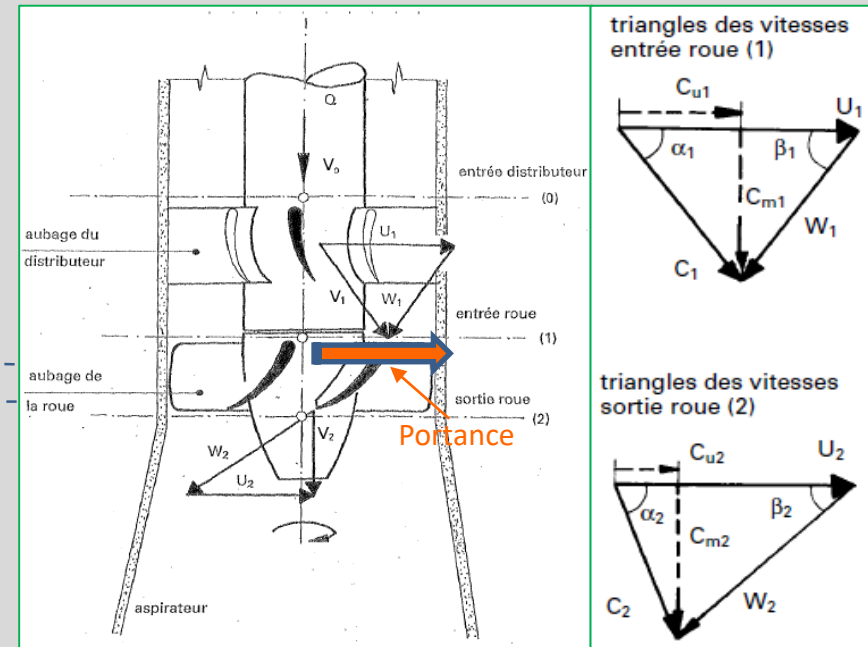
Roue Kaplan

Les pales + génératrices se comportent comme une aile d'avion



⇒ La portance, induite par la différence de pression, induit à son tour un couple

Triangle des vitesses



On démontre que :

$$P_i = \rho Q_v \left(\frac{U}{\pi(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} \frac{\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2} \right) - \rho Q_v U^2$$

Roue Kaplan

Quelques configurations (nombre de pales) et caractéristiques des roues Kaplan

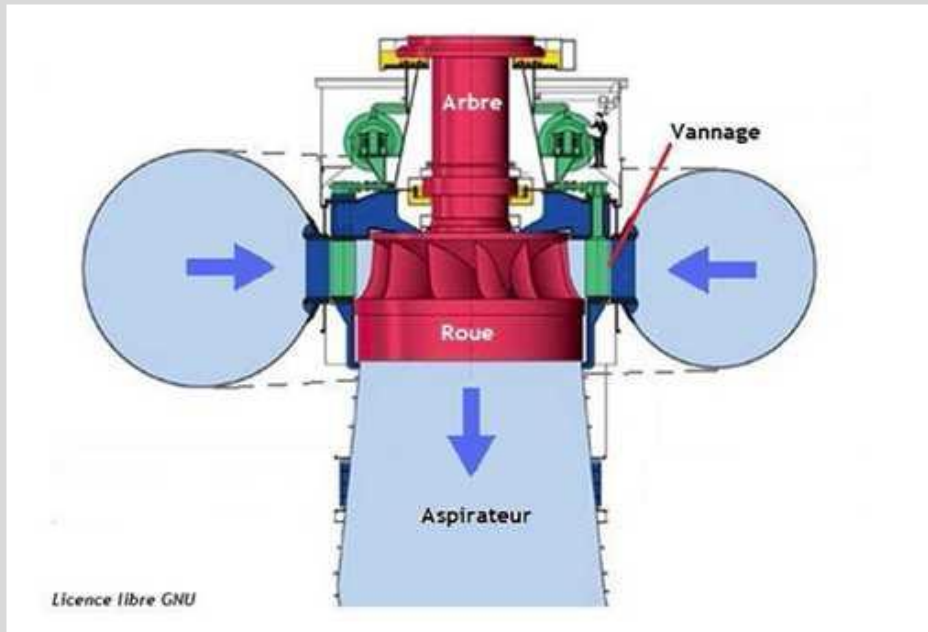
D_m : diamètre moyen de la roue pris à mi hauteur des pales

Nombre de pales	Hauteur H_n (m)	n_{sp} (tr/min)	D_m/D
3	2 à 3	1000	0.38
4	3 à 15	1000 à 800	0.4
5	15 à 20	800 à 600	0.45
6	20 à 25	500 à 600	0.5
7 à 8	30 et plus	200 à 500	0.6

Roue Francis

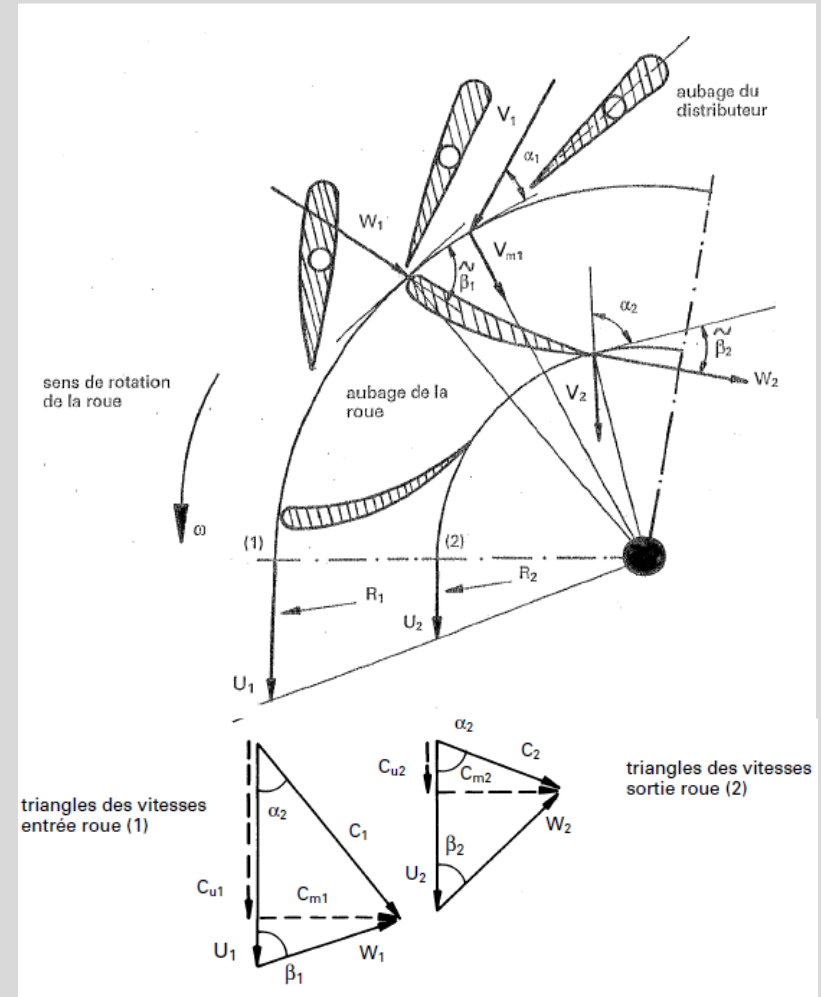
Turbine à réaction la plus complexe

- Distributeur réglable (génératrices profilées)
- Aubages de la roue fixe

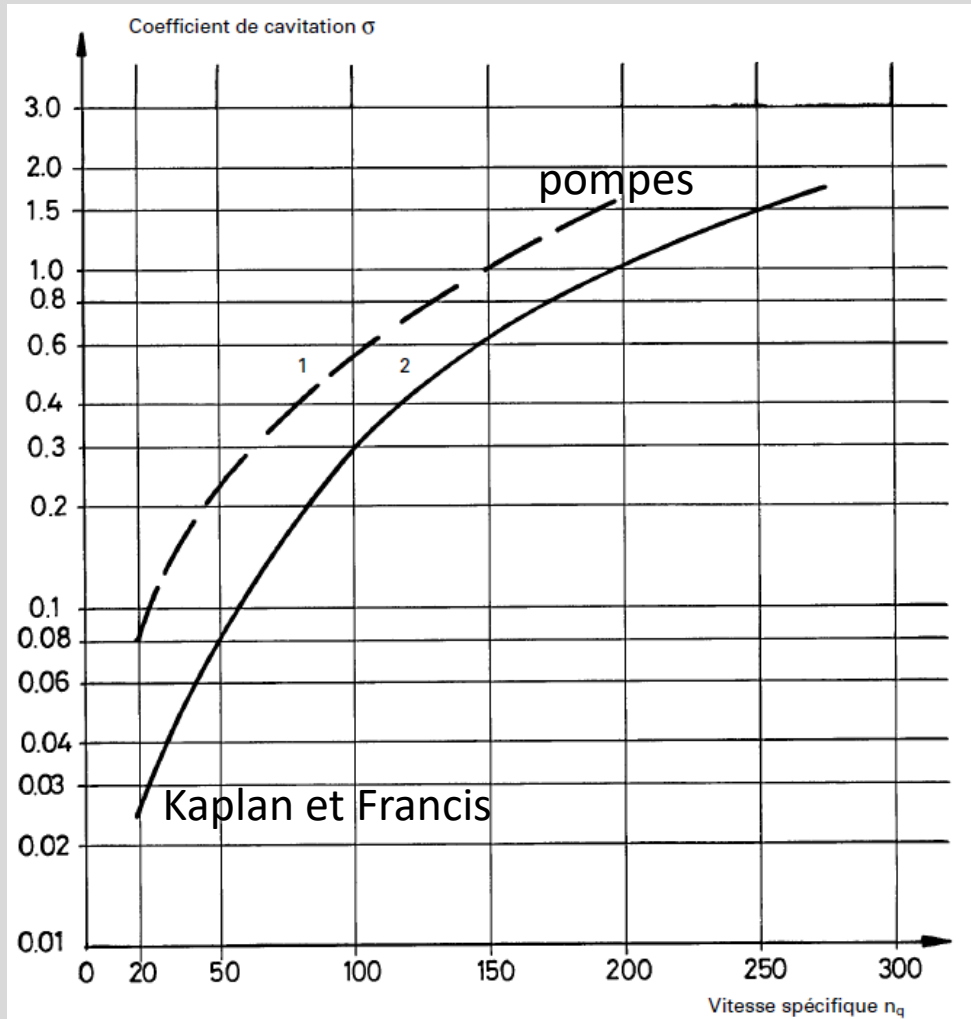


Dans ce cas, on a :

$$P_i = \rho Q_v \omega [-R_2(R_2\omega - W_2 \cos \beta_2) + R_1 V_1 \cos \alpha_1]$$



Calcul de la hauteur d'aspiration H_s limite



$$H_{s,r\acute{e}el} = H_a - H_v - \sigma H_n$$

Remarques:

- H_a dépend de l'altitude
- H_v dépend de la température