

De l'eau à l'électricité : Le rôle des barrages dans la gestion de l'énergie

Réalisé par: Ilyasse BASIT



PLAN D'ÉTUDE:

01 > Introduction:



- la conversion d'énergie dans un barrage
- Problématique

02 > Du débit à la tension : fonctionnement d'un barrage hydroélectrique.



- Fonctionnement des barrages hydrauliques
- La relation de Bernoulli
- La puissance des barrages

03 > Impact de l'érosion sur les turbines hydroélectriques:



- Classification des turbines
- La vitesse spécifique
- Expérience: Étude de l'impact de l'érosion
- La cavitation
- Solutions

04 > Conclusion



01

INTRODUCTION





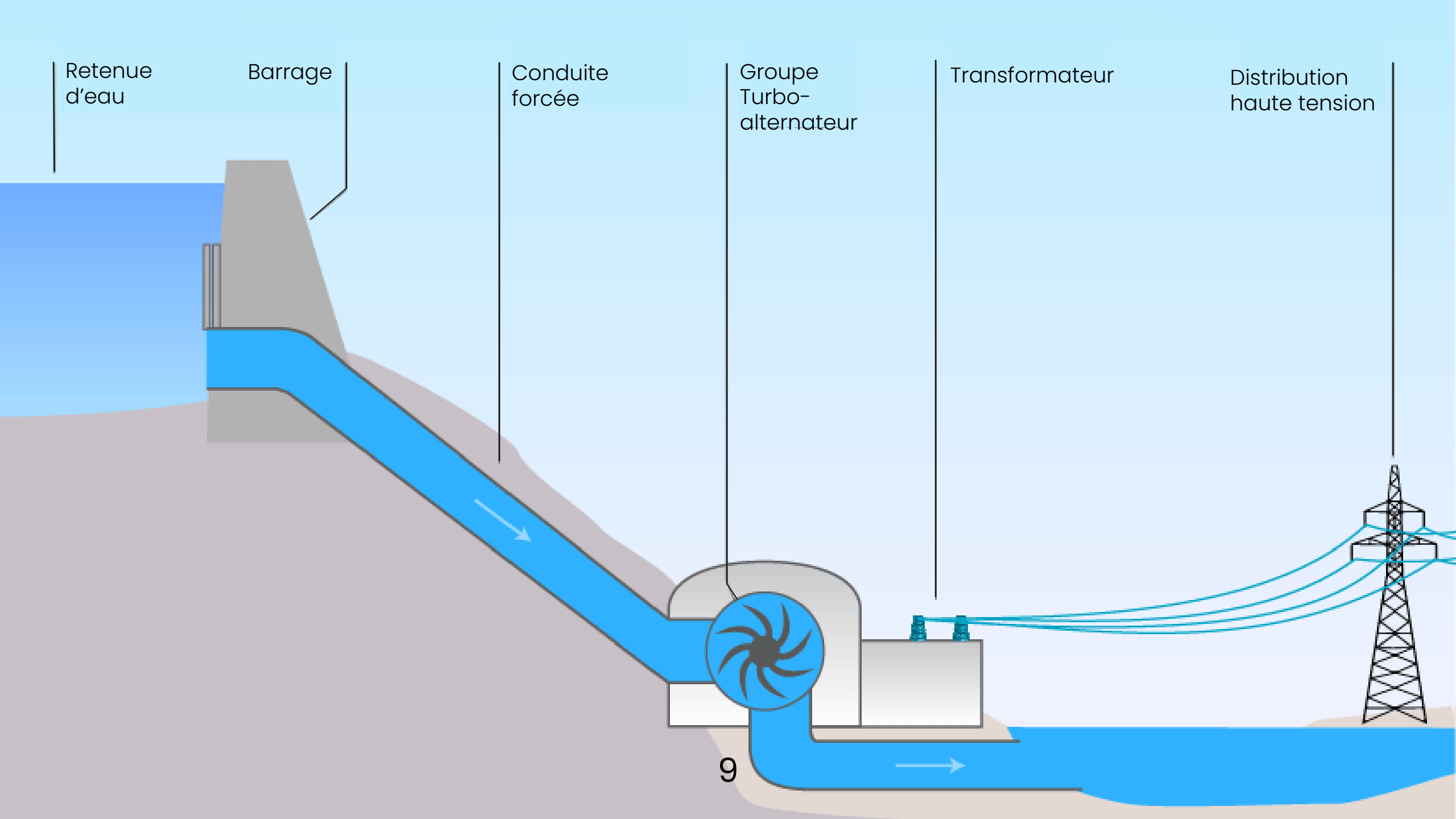


PROBLÉMATIQUE:

Comment l'érosion des turbines affecte-t-elle la conversion d'énergie dans les barrages hydroélectriques, et comment peut-on en limiter les effets ?

02

Du débit à la tension : fonctionnement d'un barrage hydroélectrique



On a donc une Conversion de:

1

Énergie
potentielle

2

Énergie
cinétique

3

Énergie
mécanique

4

Énergie
Électrique

La relation de Bernoulli:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z + P = \text{constante}$$

où :

- ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3)
- v : vitesse du fluide (m/s)
- z : altitude (m)
- P : pression (Pa)



Daniel Bernoulli

✚ On l'applique entre l'entrée du conduit et l'entrée de la turbine :

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 + P_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 + P_2$$

En supposant que :

- Pression atmosphérique est identique en ces deux points $\rightarrow P_1 = P_2$,
- Vitesse négligeable au point haut $v_1 \approx 0$,
- $z_1 - z_2 = H$ (hauteur de chute),

Alors: $\rho g H = \frac{1}{2}\rho v_2^2$

Pour obtenir la **puissance hydraulique**, on multiplie cette énergie par le débit Q :

Alors, $P_{max} = \rho g H \times Q$

En tenant compte des pertes, la puissance réellement récupérée est: $P = \eta \rho g H \times Q$

avec $\eta < 1$

Étude de cas : Ben El Ouidane

Pour le barrage de Ben El Ouidane:

- $Q = 26 \text{ m}^3/\text{s}$
- $H = 133 \text{ m}$

Alors $P_{max} = \rho g H \times Q = 33.9 \text{ MW}$

Pourtant, Ben El Ouidane vise une puissance maximale de 120 MW.



03

Impact de l'érosion sur les turbines hydroélectriques:

Classification des turbines:

à action



Les turbines à action transforment la pression hydraulique (potentielle) en énergie cinétique par un dispositif statique (injecteur), avant d'actionner la partie mobile (rotor).

- La turbine Pelton
- La turbine Banki
- La turbine Turgo

à réaction



Les turbines à réaction exploitent une différence de pression entre l'entrée et la sortie. L'énergie est partiellement convertie dans le distributeur, puis dans le rotor, où l'écoulement est dévié et accéléré.

- Turbine Francis
- Turbine Kaplan

Pour choisir la turbine la mieux adaptée:

On calcule la vitesse spécifique définie par: $N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}}$ (*)

- N: vitesse de rotation (tr/min)
- P: puissance (en CV= 736W)
- H: hauteur (m)

On a $P = \eta \rho g H \times Q \Rightarrow (*) : N_s = \frac{3,25 N}{H^{3/4}} \sqrt{Q}$

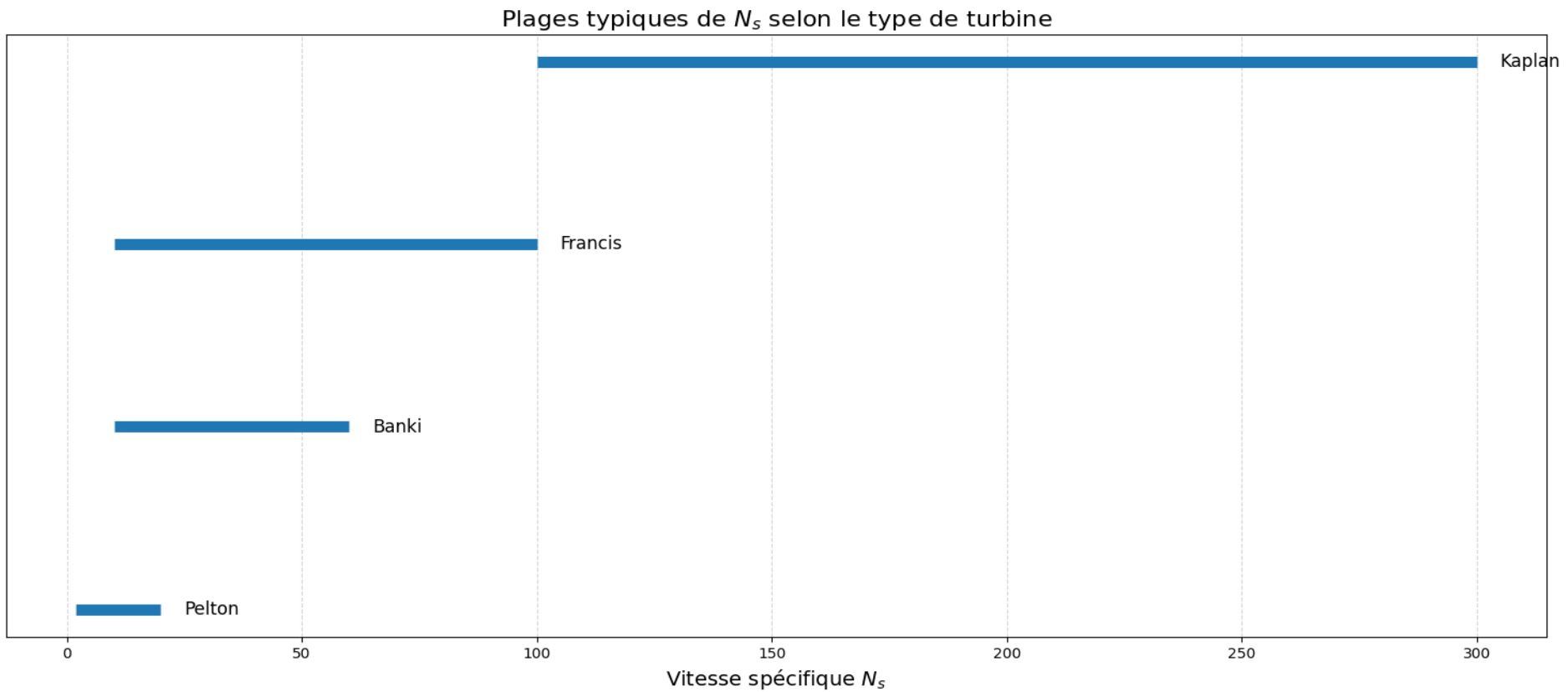
N_s est une grandeur **empirique** utilisée par les ingénieurs pour **comparer les turbines entre elles et choisir le type le plus adapté** selon le débit, la hauteur de chute et la vitesse de rotation.

Turbines à **action** → N_s faible :

- Pelton : entre 2 et 20
- Banki : entre 10 à 60.

Turbines à **réaction** → N_s élevé :

- Francis : entre 10 à 100.
- Kaplan : $N_s > 100$.





Étude de cas : Ben El Ouidane

Pour le barrage de Ben El Ouidane:

- $Q = 26 \text{ m}^3/\text{s}$
- $H = 133 \text{ m}$
- $N = 1000 \text{ tr/min}$

$$\text{Alors } N_s = \frac{3,25 N}{H^{3/4}} \sqrt{Q} = 423 > 100$$

D'où, la turbine la mieux adaptée est Kaplan.

ÉROSION DES TURBINES:



Une turbine hydraulique: type Francis



ÉROSION DE LA TURBINE

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE:

Étude de l'impact de l'érosion sur le rendement d'une turbine hydraulique



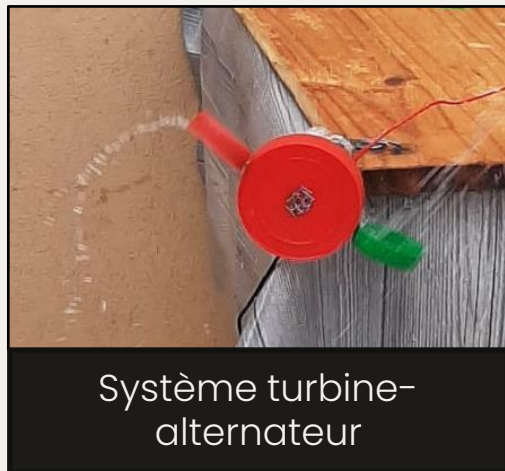
Groupe turbine-alternateur
Pelton industriel






Mini turbine-alternateur
expérimentale

Modélisation expérimentale :

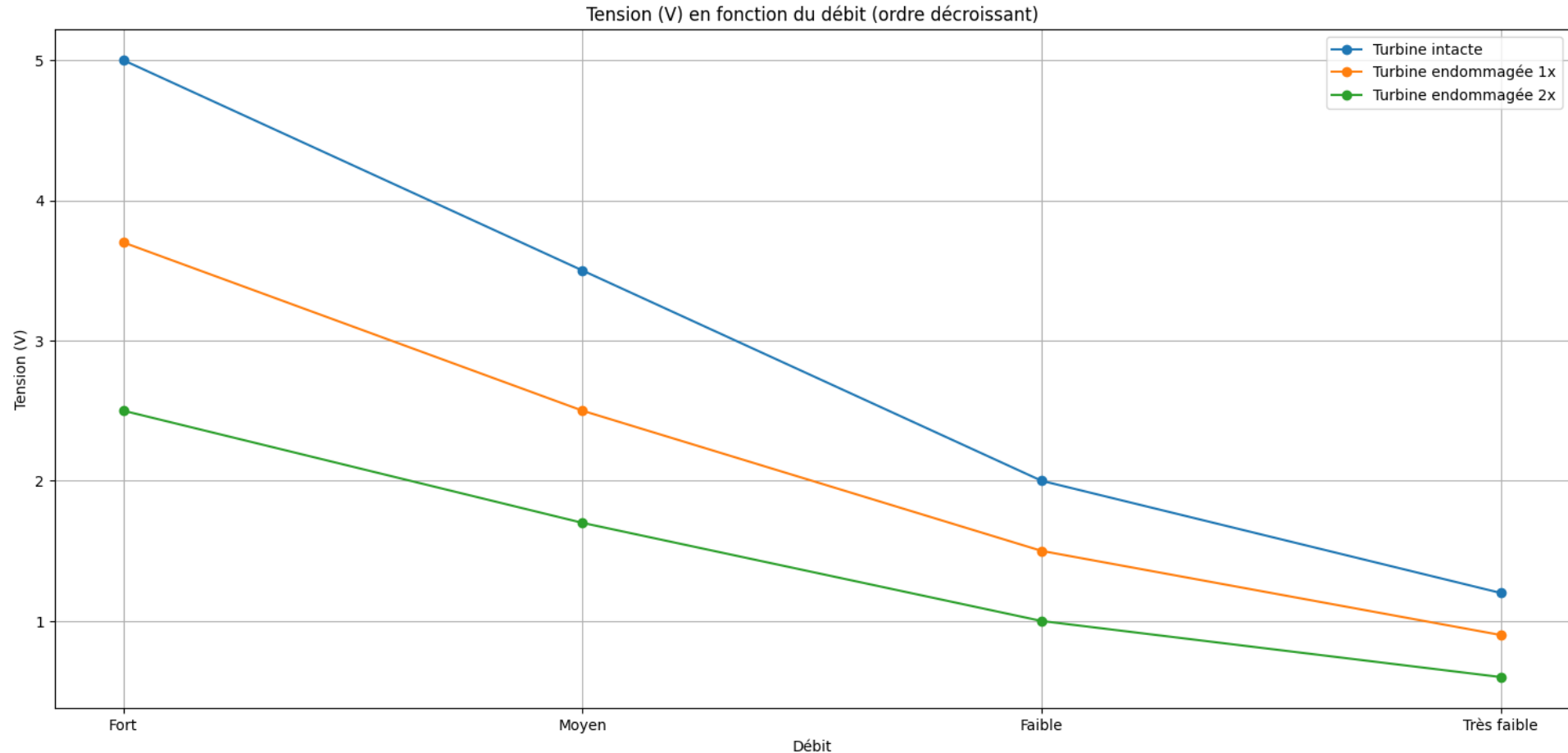
Matériels utilisés:



On étudie trois types d’aubes différentes et, pour chacune, on mesure la tension électrique produite sous trois débits d’eau variés. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous, accompagné des illustrations des profils d’aubes correspondants.

	Aube intacte	Débit	Turbine intacte (V)	Endommagée 1x (V)	Endommagée 2x (V)
	Aube légèrement endommagée	Très faible	1,2	0,9	0,6
		Faible	2,0	1,5	1,0
	Aube très endommagée	Moyen	3,5	2,5	1,7
		Fort	5,0	3,7	2,5

TRAÇAGE GRAPHIQUE :



On observe **une diminution** de la tension produite à débit constant quand la turbine est endommagée, ce qui illustre l'impact direct de l'érosion sur le rendement.

Principalement, c'est la cavitation:

Selon l'équation de Bernoulli, si $v \nearrow \Rightarrow P \searrow$
Ainsi, dans certaines zones des turbines,
si la pression devient trop faible ($P_L \leq P_v$),
le liquide peut se mettre à bouillir
localement.
Implosion des bulles \rightarrow fortes pressions
locales

× **Milliers de fois/seconde** \Rightarrow Dommages sur les turbines

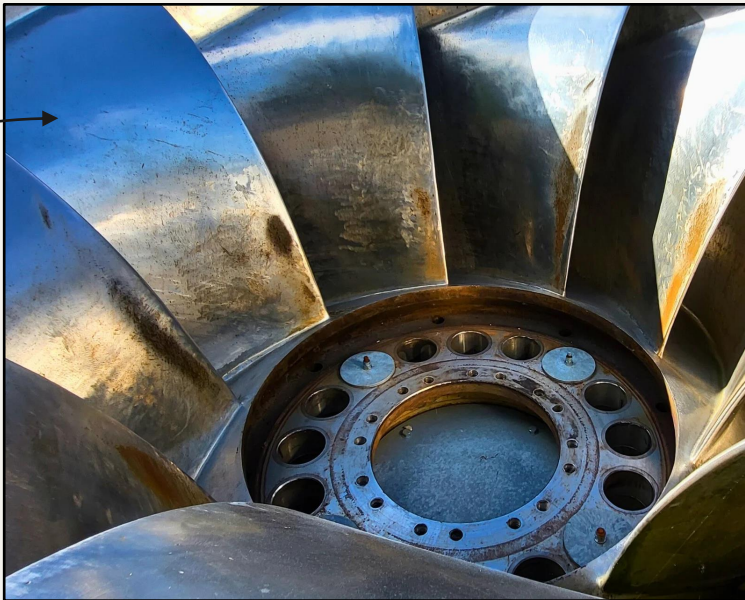


Comment peut-on en limiter les effets ?

1- Choix de matériaux résistants et Revêtements protecteurs:

L'un des moyens les plus efficaces est l'utilisation d'alliages inoxydables résistants à la cavitation et à l'abrasion. Ces matériaux permettent de **doubler voire tripler la durée de vie** des composants exposés à des conditions extrêmes.

40 ans de service, peu affectée.



INOX
X3CrNiMo13-4

15 ans de service, fortement touchée.



Acier INOX type
X20Cr13

2- Filtres à l'entrée:

L'eau utilisée peut transporter des particules solides (sable, graviers) qui provoquent une érosion mécanique.

⇒ L'ajout de **filtres ou grilles métalliques** à l'entrée permet de :

- Stopper ces particules,
- Réduire considérablement l'usure abrasive des composants internes.

3- Optimisation de l'écoulement:

Avec la modélisation numérique (CFD), les ingénieurs peuvent :

- Simuler les écoulements,
- Identifier les zones à risque (pressions faibles, tourbillons),
- Modifier la forme des conduites ou des aubes pour **limiter la cavitation**.

4- Polissage des surfaces

Le **polissage régulier** des parties internes de la turbine permet de :

- Réduire les micro-aspirités qui favorisent la cavitation,
- Améliorer l'écoulement de l'eau,
- Réduire la turbulence et donc le risque d'érosion localisée.

Une surface lisse = moins de dégâts.

04

CONCLUSION

**Merci pour
votre attention!**

Avez-vous des questions?

ANNEXE:

```
tracage.py > ...
1  import matplotlib.pyplot as plt
2
3  debits = ["Fort", "Moyen", "Faible", "Très faible"]
4
5  turbine_intacte = [5.0, 3.5, 2.0, 1.2]
6  turbine_endom_1x = [3.7, 2.5, 1.5, 0.9]
7  turbine_endom_2x = [2.5, 1.7, 1.0, 0.6]
8
9  plt.figure(figsize=(10, 6))
10 plt.plot(debits, turbine_intacte, marker='o', label="Turbine intacte")
11 plt.plot(debits, turbine_endom_1x, marker='o', label="Turbine endommagée 1x")
12 plt.plot(debits, turbine_endom_2x, marker='o', label="Turbine endommagée 2x")
13
14 plt.title("Tension (V) en fonction du débit (ordre décroissant)")
15 plt.xlabel("Débit")
16 plt.ylabel("Tension (V)")
17 plt.grid(True)
18 plt.legend()
19 plt.tight_layout()
20
21 plt.show()
22
```

Figure 2: Résultats de l'expérience

On a $N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}}$ et $P = \eta \rho g H \times Q$

donc $N_s = \frac{N\sqrt{\eta \rho g H \times Q}}{H^{5/4}} = \sqrt{\eta \rho g} \times \frac{N}{H^{3/4}} \sqrt{Q}$

$\sqrt{\eta \rho g} = \sqrt{0,8 \times 1000 \times 9,8/738} \approx 3,25$

Finalement $N_s = \frac{3,25 N}{H^{3/4}} \sqrt{Q}$

Démo de (*)

test3.py > ...

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2
3 turbines = [("Pelton", 2, 20), ("Banki", 10, 60),
4             ("Francis", 10, 100), ("Kaplan", 100, 300)]
5
6 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 5))
7
8 for i, (name, ns_min, ns_max) in enumerate(turbines):
9     ax.hlines(y=i, xmin=ns_min, xmax=ns_max, linewidth=8, color='tab:blue')
10    ax.text(ns_max + 5, i, name, va='center', fontsize=12)
11
12 ax.set_yticks([])
13 ax.set_xlabel("Vitesse spécifique $N_s$")
14 ax.set_title("Plages typiques de $N_s$ selon le type de turbine")
15 ax.grid(True, linestyle='--')
16 plt.show()
```

Figure 1: plage typique de La vitesse spécifique