

SOCIETE HYDRAULIQUE D'ETUDES



ET DE MISSIONS D'ASSISTANCE

Dimensionnement des Turbines

Lycée Chevrollier



Mars 2010



DIMENSIONNEMENT DES TURBINES

I. DIMENSIONNEMENT THEORIQUE DES TURBINES

Choix du type et du nombre de groupes

Calcul du N_s

II. DIMENSIONNEMENT SIMPLIFIE

Méthode de dimensionnement simplifié adaptée aux turbines de petite hydraulique

Gammes de chutes et de débits des différents types de turbines

Comparaison entre les types de turbines

DIMENSIONNEMENT THEORIQUE

- Le choix d'un type de turbine adapté à un aménagement résulte de la valeur de la vitesse spécifique N_s de chaque turbine.
- Les deux considérations suivantes sont essentielles pour le calcul du N_s :
 - fractionnement de la puissance totale en plusieurs groupes
 - encombrement et prix minimal de l'ensemble turbine-alternateur.
- Le fractionnement de la puissance en plusieurs groupes modifie la vitesse spécifique de chacun d'eux ; ce fractionnement est imposé à la fois par les conditions d'exploitation et par des conditions d'équipement;
- Du point de vue **économique** : **plus faible nombre** de groupes possible (**turbines de grande puissance**).
- Du point de vue de **l'exploitation** : il peut être **souhaitable de fractionner la puissance installée en plusieurs groupes** pour accroître la sécurité de l'alimentation (certains groupes en fonctionnement, un ou plusieurs en maintenance par exemple), et pour améliorer la plage de fonctionnement et le rendement global de l'usine.
- **Le choix du nombre de groupes et de la puissance de chacun d'eux résultera d'un compromis entre ces deux considérations.**

DIMENSIONNEMENT THEORIQUE

- Le choix du nombre de groupes est en fait le choix de la puissance unitaire et du débit unitaire, deux paramètres principaux de la machine hydraulique; ce choix sera donc lié à la **vitesse spécifique**, mais il fait intervenir de nombreux autres aspects technico-économiques :
 - influence de la vitesse de rotation et des dimensions sur les masses et coûts de l'électromécanique et du génie civil
 - géologie du site
 - interaction avec le nombre de conduites forcées
 - disposition de l'usine (des vannes, de la plage de montage, des locaux annexes)
 - Condition d'exploitation
 - Entretien, maintenance, etc...

DIMENSIONNEMENT THEORIQUE

- Pour construire la turbine, il faudra donc connaître les 3 grandeurs caractéristiques suivantes :
 - Débit Q
 - Hauteur de chute H
 - Vitesse de rotation N
- Q et H étant les données de départ d'un projet, il faut trouver N . 3 facteurs interviennent dans le choix de N :
 - limiter les dimensions des éléments de la roue et des appareils électriques
 - limiter N pour éviter la cavitation

DIMENSIONNEMENT THEORIQUE

- Calcul de la vitesse de rotation maximum : $N_{\max} = \frac{H^{2/3}}{P^{1/2}}$
 - N_{\max} : vitesse maxi (tr/min)
 - H : hauteur de chute brute (m)
 - P : puissance (CV) [1CV = 736 W]
- Une fois N_{\max} connu, on choisit une vitesse de rotation compatible avec l'alternateur (vitesse de synchronisme) en limitant le nombre de paires de pôles : $N = \frac{60 \cdot f}{p}$
 - N : vitesse de rotation (tr/min)
 - f : fréquence du réseau (Hz)
 - p : nombre de paires de pôles
- La vitesse spécifique est alors donnée par la formule : $N_s = N \cdot P^{1/2} \cdot H^{-5/4}$
 - N_s : vitesse spécifique (tr/min)
 - N : vitesse de rotation (tr/min)
 - P : puissance (CV)
 - H : hauteur de chute brute (m)

DIMENSIONNEMENT THEORIQUE

- Le choix du type de turbine devra être compatible avec cette vitesse spécifique (cf. courbe ci-contre)

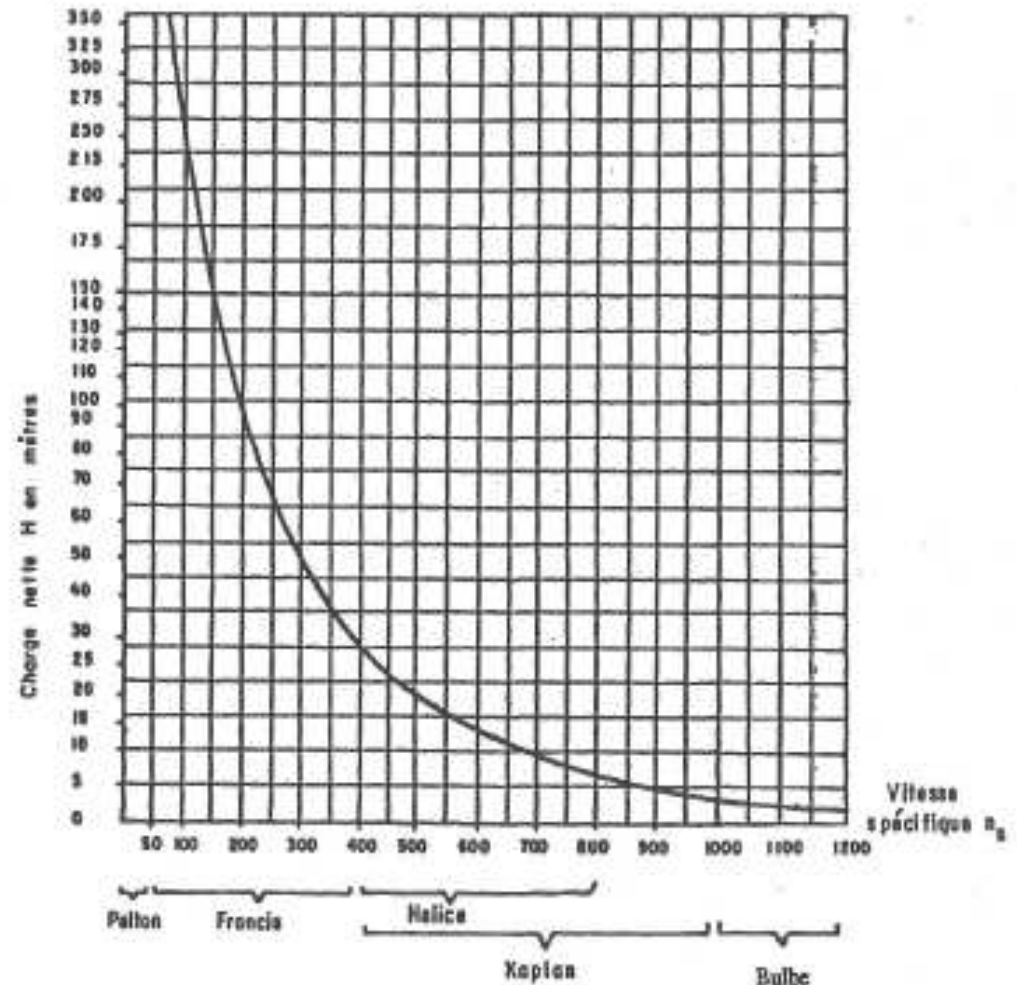
- Valeurs usuelles :

Pelton : 3 à 36 tr/min

Francis : 60 à 400 tr/min

Hélice/Kaplan : 300 à 1000 tr/min

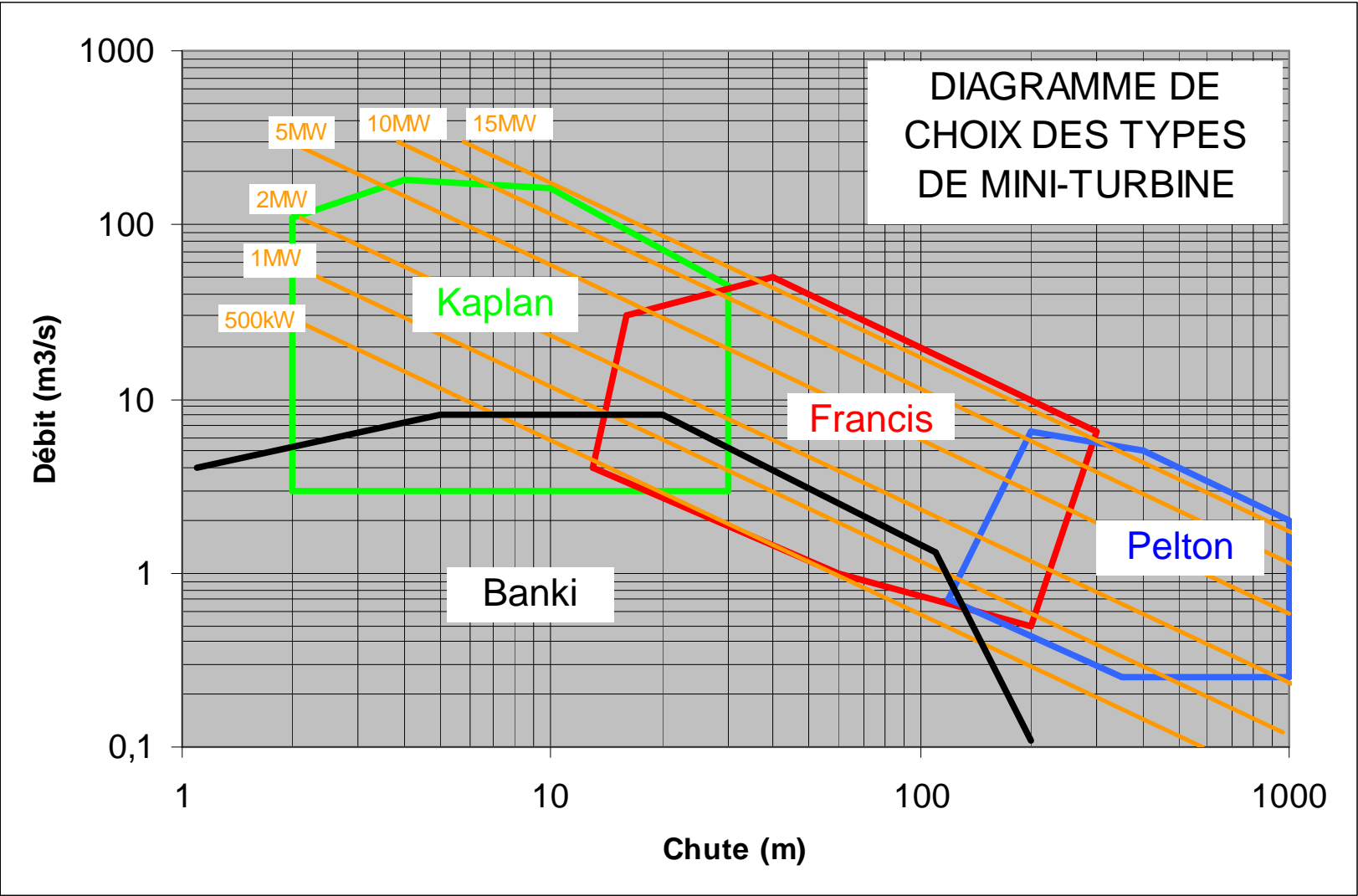
Bulbe : > 1000 tr/min



DIMENSIONNEMENT SIMPLIFIE

- Les machines hydrauliques considérées ici seront **les turbines pour les mini et les micro centrales hydroélectriques** (puissance inférieure à 15 MW)
- La machine hydraulique constitue un élément essentiel de la réalisation d'une mini centrale hydroélectrique: c'est l'élément qui le premier transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique, c'est l'élément clé qui doit intégrer les contraintes topographiques, hydrologiques, géologiques, géotechniques, environnementales, et électriques, et c'est l'élément qui conditionne les dimensions et les coûts des ouvrages de génie civil et des matériels électromécaniques.
- **Le dimensionnement est réalisé par une approche statistique**

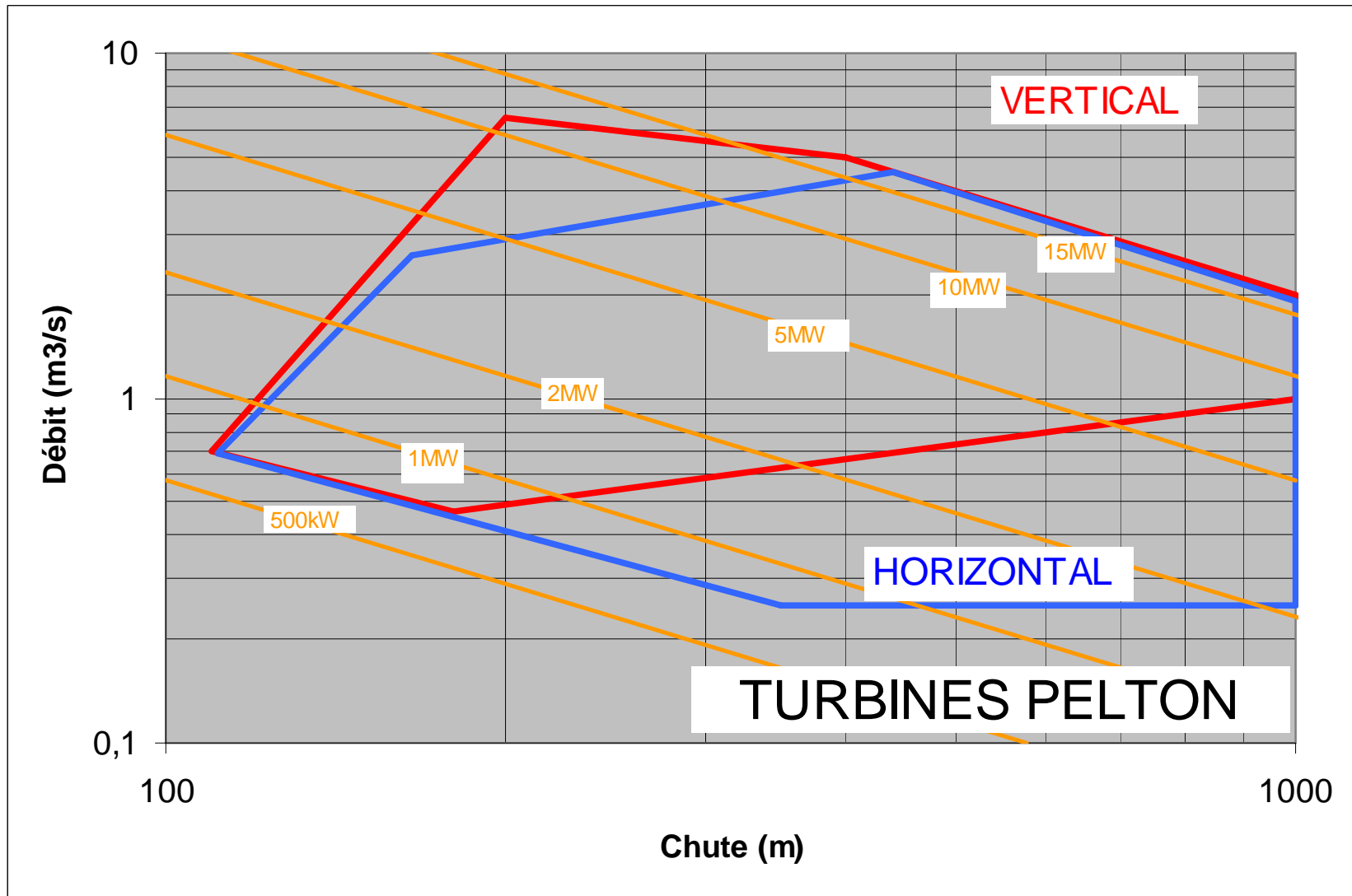
APPROCHE STATISTIQUE



TURBINES PELTON

- Turbine à action,
- Adaptée aux plus hautes chutes (1000 - 100 m),
- Puissance jusqu'à 15 MW,
- Possède la meilleure adaptation aux variations de débit car la vitesse du jet ne dépend que de la chute (jusqu'à 10% de la puissance d'un jet),
- Mauvaise adaptation aux variations de chute qui modifient la vitesse du jet, ce qui dégrade le rendement de cette turbine à action,
- La roue peut être montée directement en porte-à-faux sur l'alternateur sans arbre et palier intermédiaire,
- Il est possible d'installer jusqu'à trois jets sur les machines horizontales.

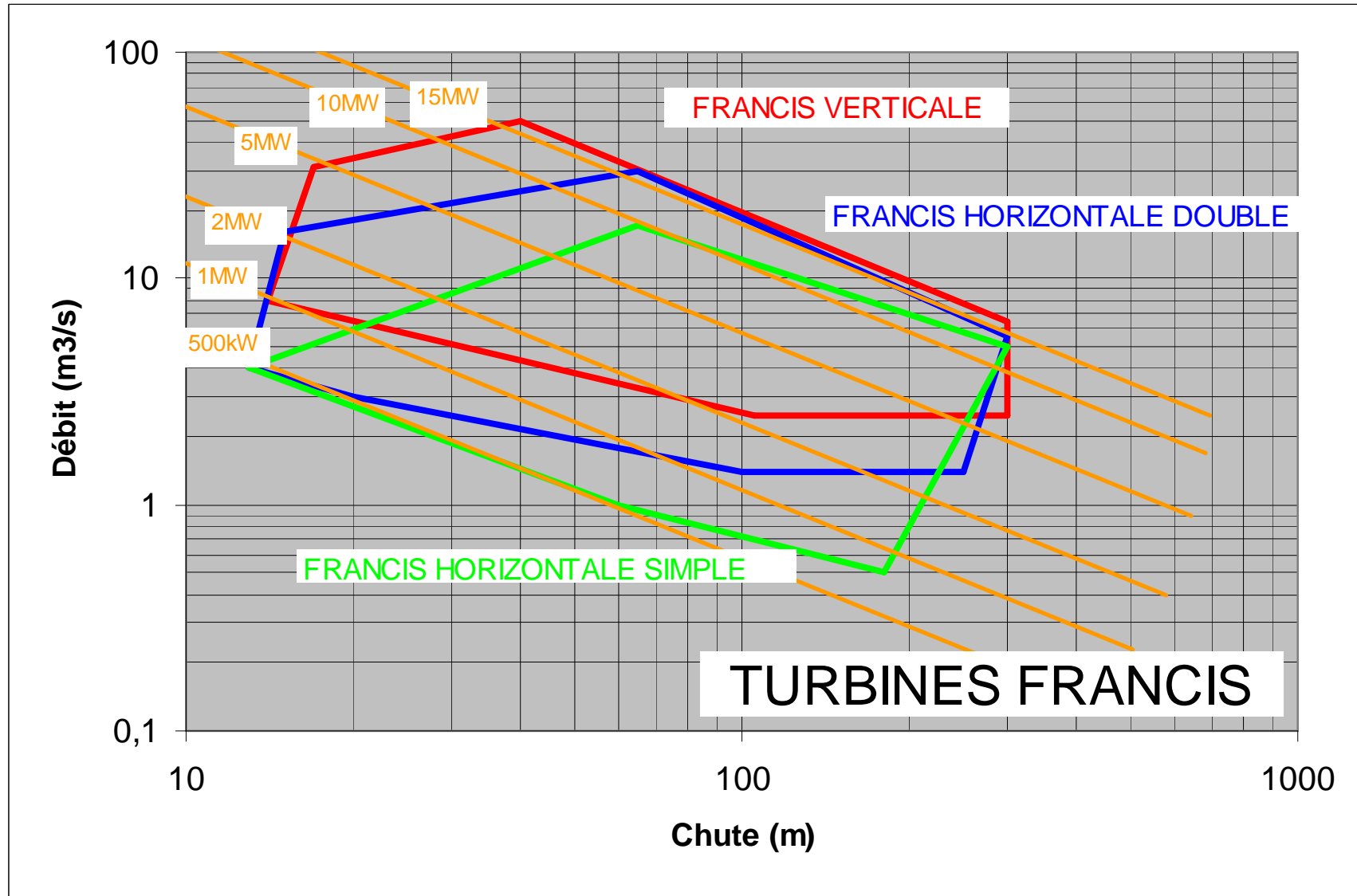
TURBINES PELTON



TURBINES FRANCIS

- Adaptée aux chutes élevées et moyennes (300 - 15 m) et à vitesse de rotation souvent élevée
- Adaptation respectivement bonne et moyenne aux variations de débit,
- adaptation respectivement médiocre et moyenne aux variations de chute.
- Puissance jusqu'à 15 MW,
- Pour les machines horizontales, la roue peut être montée directement en porte-à-faux sur l'alternateur sans arbre et palier intermédiaire,
- Dans le cas de machine à débit fixe, il est possible d'installer des Francis sans distributeur mobile, le couplage se faisant avec la vanne de pied.

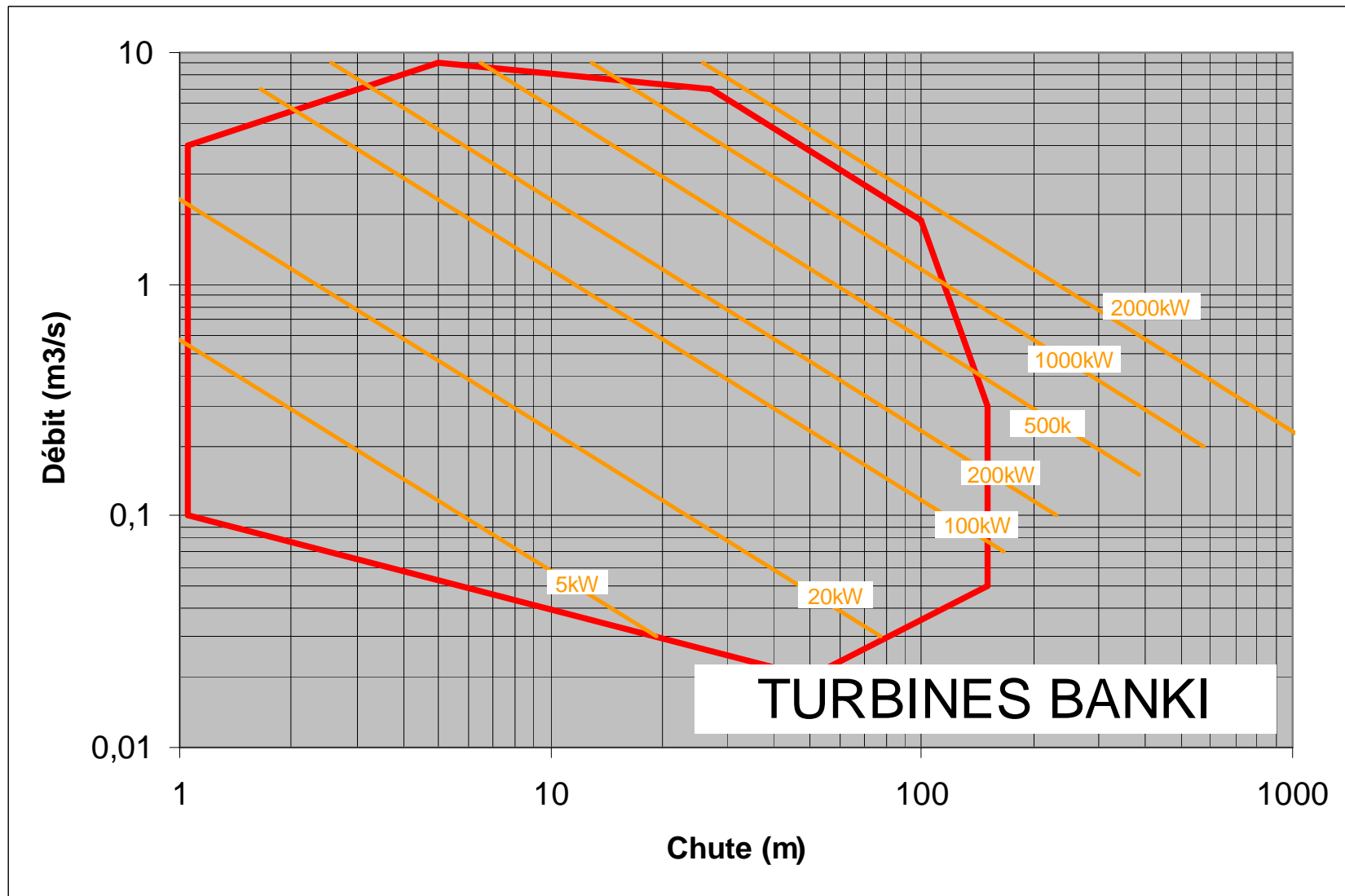
TURBINES FRANCIS



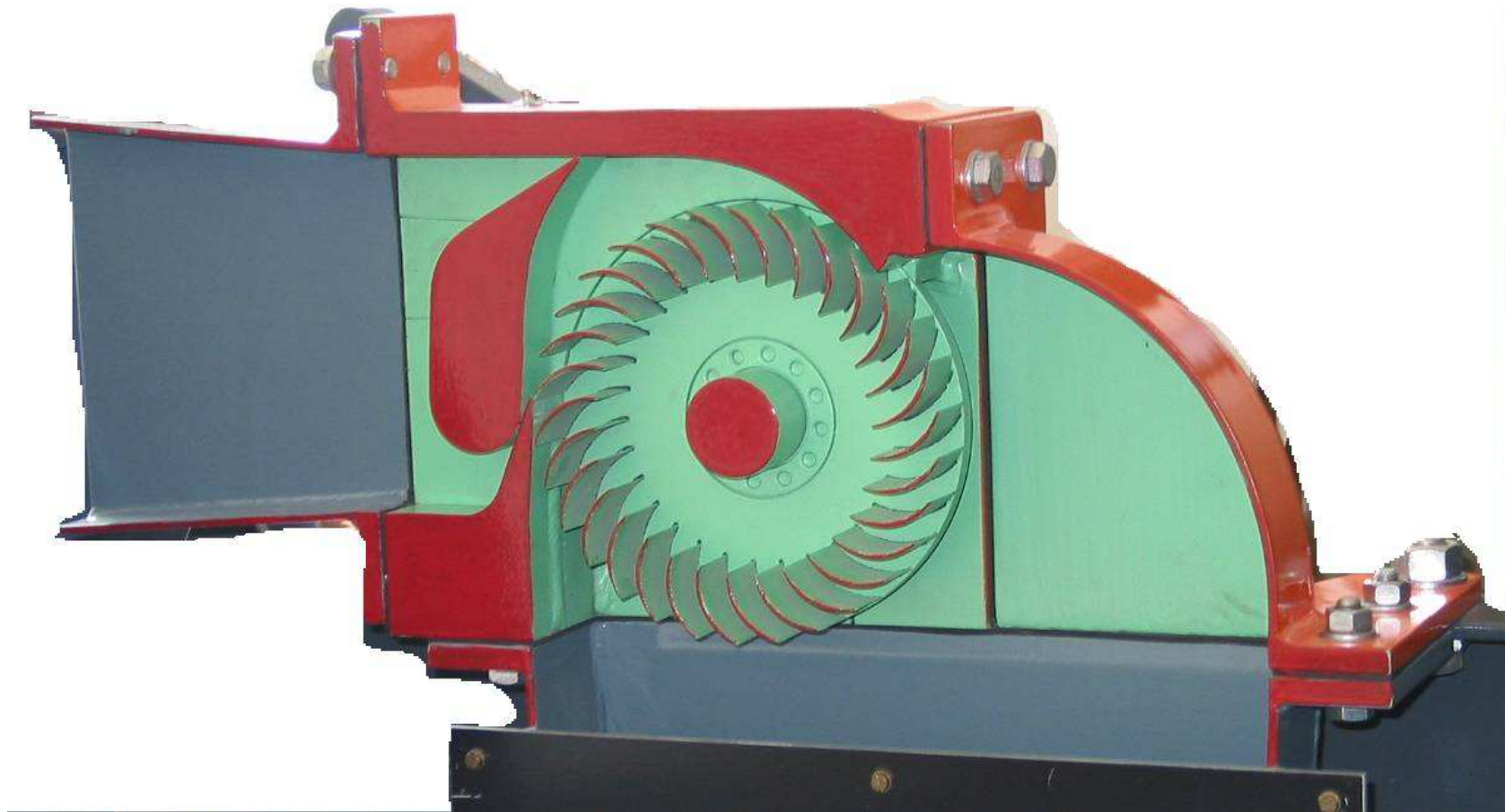
TURBINES BANKI OU CROSSFLOW

- Cette turbine est un compromis entre la turbine Pelton (turbine à action) et la turbine Francis pour sa possibilité de fonctionner en charge à l'aval,
- Adaptée aux chutes moyennes (150 - 1 m),
- Puissance jusqu'à 2000 kW seulement compte-tenu de la portée importantes des aubages entre flasques support,
- Très bonne adaptation aux variations de débit par le réglage de la vanne directrice et par la possibilité de diviser le conduit hydraulique en plusieurs compartiments,
- Bonne adaptation aux variations de chute de part la simplicité du profil hydraulique,
- Conception mécanique très simple (d'où une maintenance simplifiée),
- Très économique à l'achat,
- Rendement mécanique maximum limité (82%), mais bon rendement moyen sur sa plage de fonctionnement,
- Souvent associé à un multiplicateur de vitesse,
- Il existe une sollicitation en fatigue des aubages,
- Le double passage de l'eau à travers la roue permet de limiter la sensibilité aux corps étrangers.

TURBINES BANKI OU CROSSFLOW

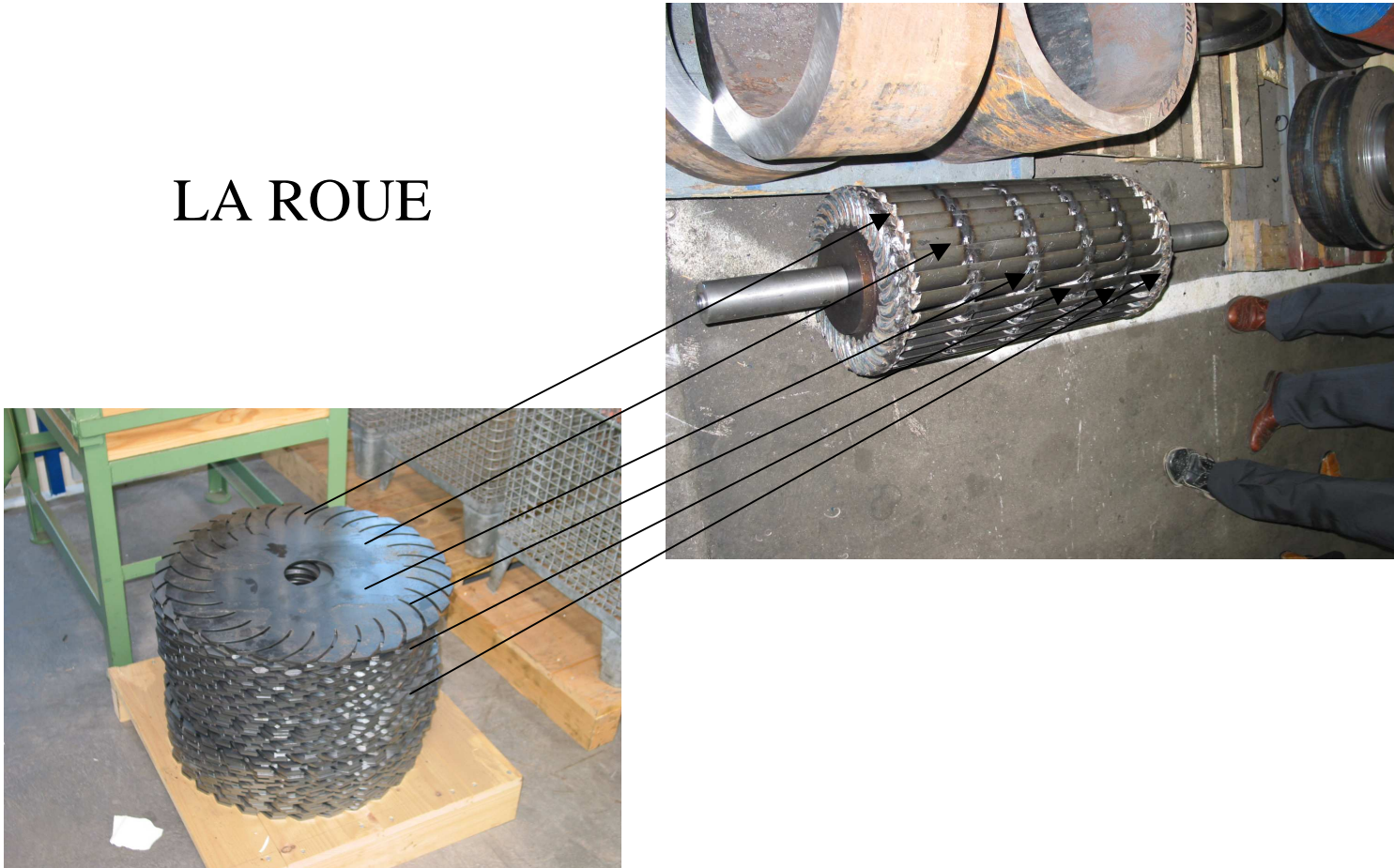


TURBINES BANKI OU CROSSFLOW



TURBINES BANKI OU CROSSFLOW

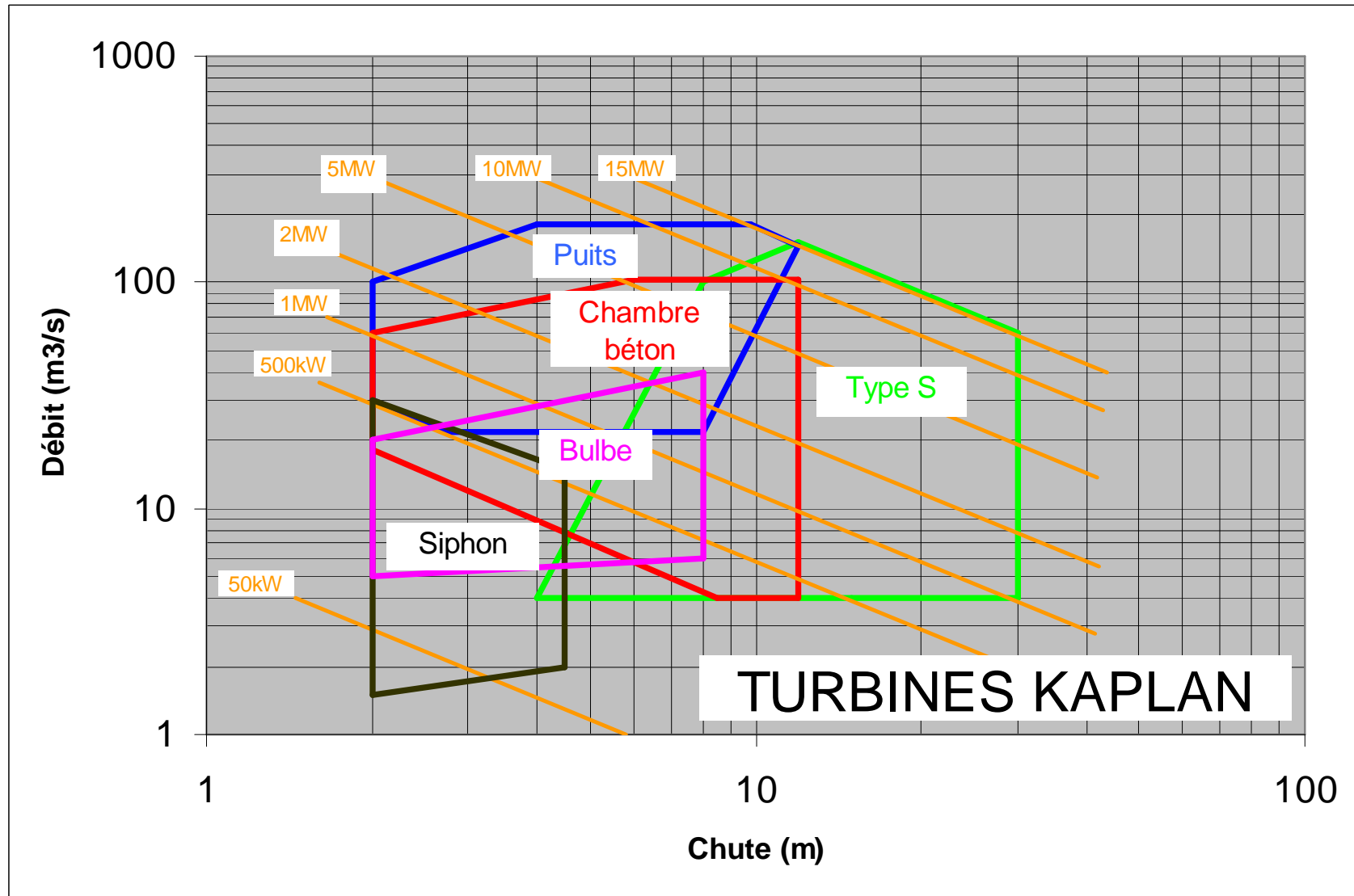
LA ROUE



TURBINES KAPLAN

- Adaptée aux basses chutes (30 - 2 m),
- Puissance jusqu'à 15 MW,
- Bonne adaptation aux variations de débit par le réglage des pales,
- Bonne adaptation aux variations de chute par le réglage des directrices,

TURBINES KAPLAN



TURBINES KAPLAN – LES DIFFERENTS TYPES

- Kaplan en chambre béton : jusqu'à 15 m de chute et grand débit $100\text{m}^3/\text{s}$ - La bête est entièrement en béton. Axe vertical - Performance moyenne à cause de la bête grossière.
- Kaplan en bulbe : Débit jusqu'à $40\text{ m}^3/\text{s}$
 - **Kaplan bulbe en conduite** : De 2 à 8 m de chute : pour des circuits amont de moyenne longueur. Axe horizontal ou incliné – Groupe submersible – Grande difficulté d'accès aux équipements -
 - **Kaplan bulbe en chambre ouverte** : De 2 à 8 m de chute : interface EM-GC très simplifiée. Axe horizontal ou incliné. Pas d'organe visible – Très silencieux – Excavation amont importante.

TURBINES KAPLAN – LES DIFFERENTS TYPES

- Kaplan type S : Débit supérieur à 3 m³/s
 - **Kaplan en coude Saxo** : De 4 à 20 m de chute : axe vertical – alternateur hors d'eau- peu de surface au sol - roue jusqu'à 3,00 m de diamètre – calage au dessus du niveau aval.
 - **Kaplan en coude aval** : De 5 à 10 m de chute : axe horizontal - la roue est au-dessus du niveau aval (faible fouille). Surface au sol importante.
 - **Kaplan en coude amont** : De 6 à 30 m de chute : axe horizontal – Le coude est très peu prononcé – bonne performance. Calage de la roue sous le niveau aval.
- Kaplan en puits : Débit supérieur à 30 m³/s
 - De 1,5 à 8 m de chute : axe horizontal ou incliné – très bonne accessibilité aux équipements – Excavation limitée – Facile à implanter sous un seuil déversant - Organe de coupure amont de faible largeur.

TURBINES KAPLAN – LES DIFFERENTS TYPES

- Kaplan en siphon métallique : Débit jusqu'à 15 m³/s
 - De 2 à 4 m de chute : axe incliné – l'ensemble de la machine est au-dessus d'un seuil – Faible GC – Distributeur fixe obligatoire (entrée d'air) - machine bruyante et inesthétique. Bien adapté au débit régulier. Problème d'amorçage au démarrage (vide d'air).

MULTIPLICATEUR DE VITESSE

- Usage fréquent en mini-hydro :
 - Permet d'augmenter la vitesse de rotation de l'alternateur et donc de réduire son coût.
- Pour les machines de basse chute type Kaplan (coefficient d'emballement proche de 3), la vitesse de l'alternateur est limitée à 750 tr/min car les alternateurs « catalogues » ont une vitesse maxi de 2300 tr/min.
- L'utilisation d'un multiplicateur de vitesse peut être envisagée quand la vitesse de rotation de la turbine est inférieure à 400 tr/min. Au-dessus, le gain sur l'alternateur ne compense pas le prix du multiplicateur.
- Le multiplicateur à courroies peut être utilisé jusqu'à 400 kW maximum.
- Il n'existe pas à proprement parlé de limite en puissance pour les multiplicateurs à engrenages. Cependant les couples coté basse vitesse limitent la puissance (plus le rapport de vitesse est élevé, moins la puissance est élevée).

COMPARAISON PELTON - FRANCIS

- **Comparaison complexe car concernant des turbines très différentes, l'une à action, l'autre à réaction**
- **Avantages de la turbine Pelton**

Calage au-dessus du niveau aval → Avantage sensible sur le coût du génie-civil des excavations et pas d'inondation possible par l'aval.

Le rendement hydraulique est meilleur aux charges partielles (courbe de rendement plus plate).

La plage de fonctionnement est très étendue en puissance, de 10 à 100 % de la puissance.

Le démontage de la turbine, notamment roue et injecteurs, est sensiblement plus rapide que celui de la Francis.

La surpression appliquée à la conduite forcée est plus faible.

COMPARAISON PELTON - FRANCIS

- **Avantages de la turbine Francis**

Récupération de la totalité de la chute de par l'enfoncement de la roue de turbine

Rendement meilleur au point optimal et pour les puissances allant de 75 % à 100 % de P_{max} .

Vitesse de rotation de la turbine Francis plus élevée que celle de la Pelton

→ Dimensions turbine plus faibles (donc le coût aussi).

→ Dimensions de l'alternateur plus faibles (donc le coût aussi).

Ouvrage de fuite moins coûteux car de section plus réduite pour l'écoulement en charge aval de la Francis.

Le réglage de la turbine Francis par le seul distributeur évite toute déconjugaison entre injecteurs et déflecteurs de la Pelton et permet un meilleur comportement en réseau isolé, et une meilleure tenue de la fréquence.

Les problèmes de fatigue d'une roue Pelton et les fréquents contrôles nécessaires sur les augets ne concernent pas la roue Francis.

COMPARAISON FRANCIS - KAPLAN

- **Avantages de la turbine Francis**

Diamètre de roue est sensiblement plus faible (environ 15 %), les dimensions de la bêche spirale aussi (environ 20 %).

Conception mécanique plus simple, seul le distributeur est réglable, tandis que les pales orientables de la Kaplan conduisent à un surcoût d'investissement et d'exploitation.

Vitesse de rotation plus élevée → Dimensions de l'alternateur plus faibles

Le coefficient de cavitation est plus faible, l'enfoncement de la turbine est donc moindre.

Les capacités de réglage de la fréquence d'un réseau isolé sont supérieures, surtout si ce réseau est fortement perturbé.

→ En conséquence des points précédents, la turbine Francis présente un coût moindre, ainsi que l'alternateur associé, et le génie civil de l'usine.

COMPARAISON FRANCIS - KAPLAN

- **Avantages de la turbine Kaplan**

Le rendement hydraulique est meilleur aux charges partielles (courbe de rendement plus plate).

Plages de variations de débit et surtout de chute plus grandes (la turbine Francis ne pouvant fonctionner sans fluctuations ni vibrations dommageables à chute très partielle).

COMPARAISON DES TYPES DE KAPLAN

- Le choix est d'abord fait sur la base de la zone de fonctionnement en chute et débit.
- Une fois ce premier crible effectué, le type d'usine (pied de barrage, en bout de conduite, intégré dans un seuil, ...) va permettre d'affiner le choix en évaluant les impacts du type de machine sur le génie civil.

COMPARAISON FRANCIS HORIZONTALE / VERTICALE

- **Avantages de l'installation horizontale**

Adaptée aux vitesses de rotation élevées 750 à 1 500 tr/min, car la gravité maintient bien l'arbre dans les paliers et évite les vibrations et le "flottement" de la ligne d'arbre.

Exploitation et maintenance plus favorables

Coût d'installation moins élevé (paliers classique, moins de GC)

- **Avantages de l'installation verticale**

Mieux adaptée aux vitesses de rotation moyennes et faibles car les paliers guident l'arbre de manière satisfaisante.

Enfoncement de la turbine légèrement réduit (1 demi diamètre de roue environ), ce qui est légèrement favorable du point de vue GC, mais contrebalancé par une plus grande profondeur d'usine.

Turbine mieux bloquée (bâche scellée dans le béton entièrement) et donc plus stable et moins bruyante

COMPARAISON FRANCIS - BANKI

- **Avantage de la Banki**

Conception mécanique très simple

Coût beaucoup moins élevé

Exploitation et maintenance assez aisée

Grande variation de débit possible (10 à 100%)

Rendement à charge partielle plus élevés

- **Avantage de la Francis**

Rendement aux fortes charges bien plus élevé (90 à 92% contre 82%)

Turbine et alternateur relativement rapide et de petite taille

Nombreux constructeurs disponibles contrairement aux Banki (2 ou 3)

Récupération de toute la chute contrairement à la Banki qui est placée au-dessus des plus hautes eaux