

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

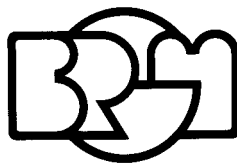
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

PRÉSENTATION DES MATÉRIELS ET ÉQUIPEMENTS DE MICROCENTRALES HYDROÉLECTRIQUES

par

J. ROUX



SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

SOUS-DIRECTION A L'ÉNERGIE

Mission hydroénergie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

80 SGN 737 HEN

Octobre 1980

R E S U M E

Ce rapport vient en complément des journées d'information sur les *microcentrales hydroélectriques* qui se sont tenues du 17 au 21 mars 1980 à Grenoble.

Il présente une description sommaire des appareillages (et de leur fonctionnement) nécessaires à la transformation et au transport de l'énergie hydraulique sous une forme utilisable.

Partant de la source et remontant jusqu'à l'utilisation, nous verrons successivement :

- les turbines hydrauliques,
- les systèmes de régulation,
- les génératrices électriques,
- la transformation et le transport du courant.

Ceci n'est bien sûr qu'un aperçu général des diverses techniques utilisées et n'a aucune prétention si ce n'est celle de rappeler des notions fondamentales utiles aux projeteurs.

S O M M A I R E

	pages
<u>I - INTRODUCTION</u>	1
<u>II - LES TURBINES HYDRAULIQUES</u>	2
II.1. Définitions	2
II.2. Disposition générale - Diagramme de vitesses	2
II.3. Action du fluide sur les parois des canaux - Relation d'EULER	4
II.4. Calcul du couple exercé sur l'arbre de la machine	5
II.5. Hauteurs brute, nette et effective - rendements	6
II.6. Degré de réaction	8
II.7. Notion de vitesse spécifique	8
II.8. Application à la classification des turbomachines	9
II.9. Description sommaire des différentes turbines	11
II.10. Développements spécifiques aux microcentrales	14
<u>III - LA REGULATION DES GROUPES</u>	17
III.1. Principe général de la régulation	17
III.2. Régulateurs mécaniques	18
III.3. Régulateurs électriques	18
<u>IV - APPAREILLAGE DE PRODUCTION, DE TRANSFORMATION ET DE TRANSPORT DE L'ENERGIE HYDRAULIQUE</u>	19
IV.1. Production d'énergie pour un réseau autonome	19
IV.1.1. Les génératrices synchrones	19
IV.1.2. Les génératrices à courant continu	21
IV.2. Production d'énergie pour un réseau couplé	24
IV.3. Transformation et transport de l'énergie	26
IV.3.1. Transport du courant	26
IV.3.2. Transformation du courant	27
<u>V - CONCLUSION : BILAN GENERAL D'UNE INSTALLATION HYDROELECTRIQUE</u>	29

LISTE DES SYMBOLES

Symboles grecs

- $\vec{\omega}$: vitesse de rotation de la roue (rd/s) d'une turbine
 ϖ : poids volumique du fluide ; $\varpi = \rho g$
 ρ : masse volumique du fluide
 η : rendement
 σ : degré de réaction
 ω : vitesse de synchronisme des machines électriques
 ω' : vitesse hyposynchrone
 ω'' : vitesse hypersynchrone
 $\cos \varphi$: coefficient de puissance : $P = UI \cos \varphi$; où φ est le déphasage entre la tension et l'intensité du courant

Symboles latins

- \vec{C} : vitesse absolue du fluide
 \vec{U} : vitesse d'entraînement du fluide = $\vec{\omega} \wedge \vec{r}$ (r = rayon polaire)
 \vec{W} : vitesse relative du fluide par rapport à la roue : $\vec{W} = \vec{C} - \vec{U}$
 N : vitesse de rotation de la roue en tr/s ($N = \frac{\omega}{2\pi}$)
 q : débit massique (kg/s) $q = \rho q_V$
 q_V : débit volumique (m³/s)
 \mathcal{C} : couple mécanique
 h : hauteur de chute ou charge hydraulique
 z : cote des niveaux d'eau
 J : perte de charge totale (dans la partie hydraulique)
 P : puissance
 Δh_1^2 : pertes de charge réparties entre 1 et 2
 g : accélération de la pesanteur (dans la partie hydraulique)
 n_s : vitesse spécifique (tr/s)
 J_s : inertie des parties tournantes
 I : courant d'induction
 J : courant induit (dans la partie électrique)
 U : tension aux bornes de deux conducteurs
 g : glissement (dans la partie électrique)
 m : rapport de transformation

I - INTRODUCTION

L'idée de transformer en énergie mécanique utilisable, l'énergie contenue dans l'eau des cours d'eau sous forme cinétique ($\frac{C^2}{2g}$) et sous forme potentielle ($\frac{P}{\rho} + z$) est très ancienne. Les premières machines transformatrices furent les roues hydrauliques, lentes, utilisables seulement pour les basses chutes de 5 à 6 m au maximum.

Pendant de nombreux siècles, les appareils utilisés restèrent rudimentaires, tant au point de vue construction (bois) qu'au point de vue hydraulique ; la plus grande partie de la chute étant perdue en raison de l'alimentation par conduit ouvert.

C'est au 18^{ème} siècle, extrêmement fécond par la science hydraulique, que Daniel BERNOULLI (1700-1782) et Léonhard EULER (1707-1783) posèrent les fondements de l'hydrodynamique et c'est au 19^{ème} siècle que Claude BURDIN (1790-1873) décrivit la première "turbine" et employa pour la première fois ce mot.

Dès lors, les progrès se firent à grand pas, et les noms de nombreux ingénieurs restèrent attachés à leurs inventions ; tels : BICHENO FRANCIS (1815-1892), Lester Allen PELTON (1829-1908), KAPLAN (1815-1892) ou Donat BANKI.

II - LES TURBINES HYDRAULIQUES

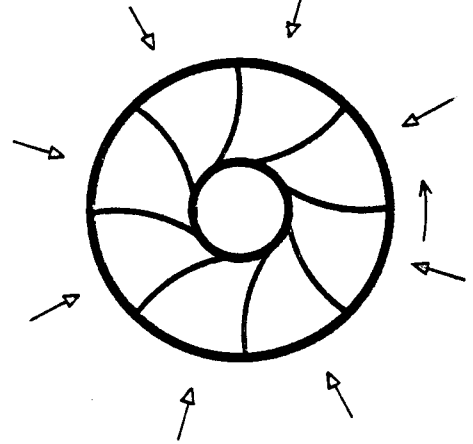
II.1. Définitions

Une turbine hydraulique est une machine constituée principalement d'une roue à aubes qui reçoit de l'énergie d'un fluide et qui transforme celle-ci en énergie mécanique utilisable.

- Classification d'après le mouvement du fluide par rapport à la roue :

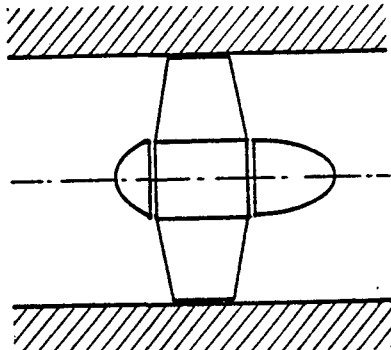
. Turbine radiale (centripète)

Turbine centripète



. Turbine axiale

Turbine axiale



. Turbine mixte : hélico-centripète.

II.2. Disposition générale - Diagramme de vitesses

L'élément essentiel de la machine est la roue et celle-ci est composée :

- d'augets à l'air libre, comme dans la turbine Pelton
- d'aubes :
 - . soit à l'air libre comme dans la turbine Banki-Mitchell,
 - . soit formant des conduites qui sont en charges : dans les machines à réaction (Francis, Kaplan).

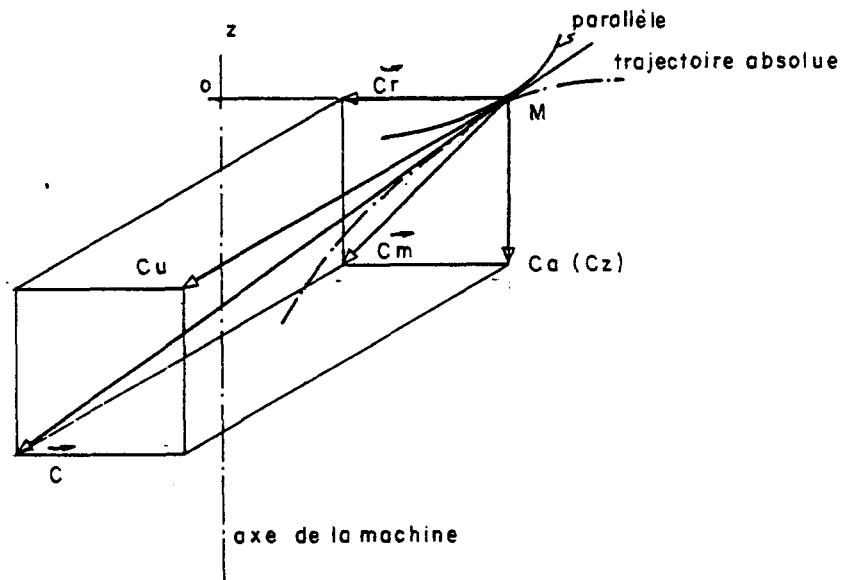
Les augets ou les aubes à l'air libre modifient la vitesse du fluide alors que les aubes en charges modifient la vitesse et la pression du fluide.

En plus de la roue, la machine peut être équipée d'un distributeur qui a pour objet de transformer partiellement ou totalement l'énergie de pression en énergie cinétique et d'un diffuseur qui a pour objet de récupérer une partie de l'énergie cinétique résiduelle à la sortie de la roue.

- Diagramme de vitesses

soit le vecteur de vitesse absolue \vec{C} en un point M de l'écoulement et tangent à la trajectoire en M ; il peut être décomposé comme suit (cf. figure) :

- . vitesse giratoire C_u t_g à un parallèle
- . vitesse axiale C_a (ou C_z) parallèle à l'axe de la roue
- . vitesse radiale C_r orientée selon un rayon



\vec{C}_u conditionne les échanges d'énergie,

$\vec{C}_m = \vec{C}_a + \vec{C}_r$ composante méridienne, conditionne le débit.

\vec{C}_u et \vec{C}_m sont dans le plan tangent à la surface d'écoulement.

Dans la zone d'action de la roue, on utilise fréquemment un système d'axes lié à celle-ci, donc tournant par rapport à notre repère absolu (bâti de la machine) avec une vitesse $\vec{\omega}$ égale à la vitesse de rotation de la roue.

La vitesse du point M liée à la roue est donc :

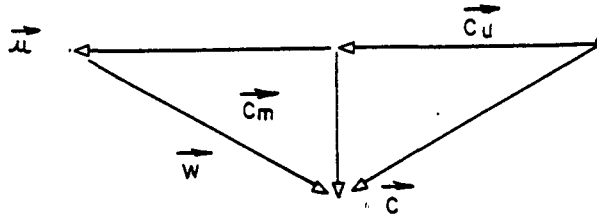
$$\vec{u} = \vec{\omega} \wedge \vec{OM}$$

avec : \vec{OM} rayon polaire $\rightarrow u = \omega r$ qui est appelée vitesse d'entraînement. On peut donc définir maintenant une vitesse relative d'écoulement du fluide par rapport à la roue : \vec{W} telle que :

$$\vec{C} = \vec{u} + \vec{W}$$

(1)

D'où le triangle des vitesses :



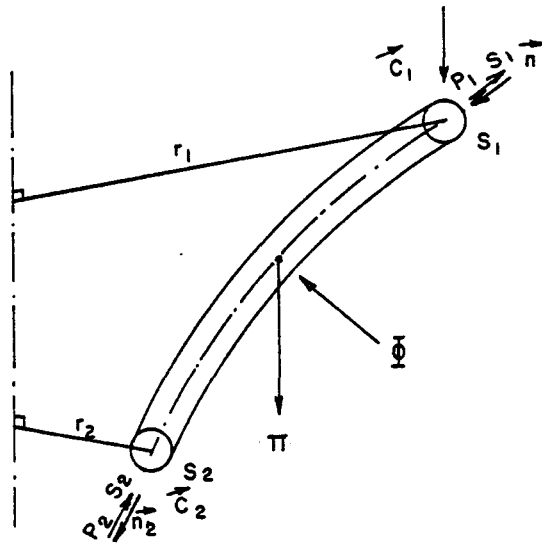
II.3. Action du fluide sur les parois des canaux - Relation d'EULER

Appliquons le théorème d'EULER, à débit massique constant (Δq) en mouvement permanent, à un tube de courant compris entre S_1 et S_2 .

soit :

$\vec{\Phi}$ la résultante des actions de la roue sur le fluide

$\vec{\pi}$ le poids du fluide



Théorème d'EULER :

$$\Delta q(\vec{C}_2 - \vec{C}_1) = P_1 S_1 \vec{n}_1 - P_2 S_2 \vec{n}_2 + \vec{\pi} + \vec{\Phi}$$

Si nous faisons la somme pour la roue complète, de l'ensemble des actions du fluide sur les parois, nous obtenons :

$$\underbrace{- \sum \vec{\Phi}}_{\text{poussée}} = \underbrace{\sum \Delta q(\vec{C}_1 - \vec{C}_2)}_{\text{composante dynamique}} + \underbrace{\sum (P_1 S_1 \vec{n}_1 - P_2 S_2 \vec{n}_2 + \vec{\pi})}_{\text{composante statique}}$$

Pour chaque canal, les résultantes sont :

- axiale $\Delta Z = \Delta q (C_{a_1} - C_{a_2})$
- radiale $\Delta R = \Delta q (C_{r_1} - C_{r_2})$
- tangentielle $\Delta T = \Delta q (C_{u_1} - C_{u_2})$

Et si l'injection est totale (uniformément répartie sur toute la roue comme pour une Francis ou une Kaplan), les résultantes radiale et tangentielle sont nulles par raison de symétrie.

II.4. Calcul du couple exercé sur l'arbre de la machine

Le moment (\mathcal{M}) résultant de l'action du fluide sur les parois d'un canal par rapport à l'axe z est $\Delta \mathcal{M}_z$.

Appliquons le théorème du moment cinétique/axe z.

$$\Delta q (r_2 C_{u_2} - r_1 C_{u_1}) = - \Delta \mathcal{M}_z + \mathcal{M}_t/z \text{ (force de pression + poids)}$$

En sommant sur l'ensemble des canaux :

$$\sum \mathcal{M}_t/z = \mathcal{E}_E = \sum \Delta q (r_1 C_{u_1} - r_2 C_{u_2})$$

puisque pour raison de symétrie $\sum \mathcal{M}_t/z \text{ (force de pression + poids)} = 0$.

Le couple indiqué est donc :

$$\boxed{\mathcal{E}_E = q (r_1 C_{u_1} - r_2 C_{u_2})} \quad (2)$$

avec q = débit massique total.

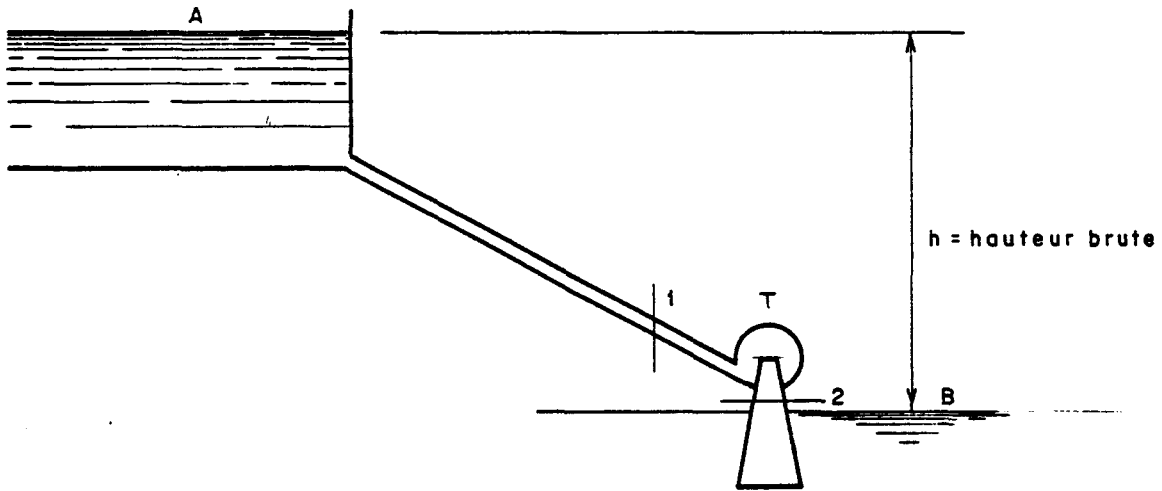
La vitesse de rotation de la roue étant ω , la puissance indiquée est :

$$P_E = \mathcal{E}_E \omega \text{ d'où}$$

$$\boxed{P_E = q (u_1 C_{u_1} - u_2 C_{u_2})} \quad (3)$$

puisque $\omega r_1 = u_1$ et $\omega r_2 = u_2$.

II.5. Hauteurs brute, nette et effective - rendements



Soit le circuit ci-dessus comportant une turbine hydraulique T.
L'énergie potentielle entre A et B est alors fournie :

- 1 - en énergie mécanique dans la turbine,
- 2 - en chaleur par les pertes de charge dans la conduite.

D'après le théorème de BERNOULLI entre A et B, on obtient :

$$z_A - z_B = h_n + J$$

où J = est la somme des pertes de charge dans la conduite de A à 1 et de 2 à B
et h_n = est l'énergie fournie à la turbine par unité de poids du fluide.

Dans ce cas, h_n est la perte de charge utile servant au fonctionnement de la turbine.

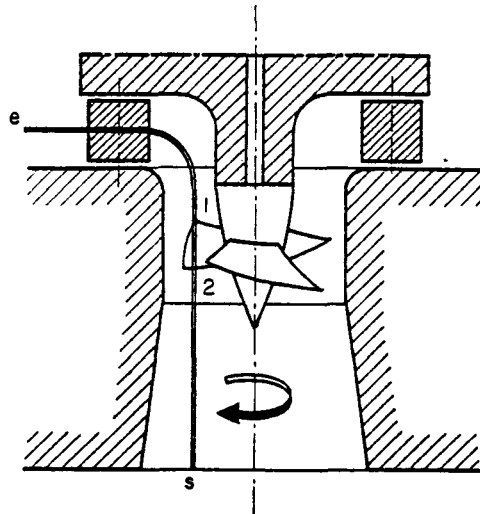
Et la puissance nette fournie par la turbine est :

$$P_n = h_n \bar{w} q_v$$

où \bar{w} = est le poids volumique du fluide

et q_v = le débit volumétrique.

Regardons ce qu'il se passe entre 1 et 2 (ex : turbine Kaplan) :



On a vu que $h_n = h_1 - h_2$, qui représente l'énergie mise à la disposition de la machine. Δh^2 sont les pertes de charges par frottement de fluide/fluide, fluide/parois ou par choc à l'entrée des aubages.

h_E est l'énergie réellement transmise à la roue, c'est la hauteur indiquée ou effective.

$$\longrightarrow h_E = \frac{P_E}{q_v \omega}$$

d'après (3)

$$h_E = \frac{1}{g} (u_1 C u_1 - u_2 C u_2) \quad (4)$$

et

$$\longrightarrow h_n = h_E + \Delta h_1^2 \quad (5)$$

Le rendement manométrique correspond au rendement indiqué :

$$\eta_h = \frac{h_E}{h_n} = \frac{u_1 C u_1 - u_2 C u_2}{g h_n} \quad (6)$$

Le rendement volumétrique : une partie q_f du débit ne passe pas par les parties actives de la roue ; on définit donc un rendement volumétrique :

$$\eta_v = \frac{q - q_f}{q} = \frac{q_n}{q_n + q_f}$$

où q_n est le débit utile (ou net) qui agit réellement sur la roue.

Le rendement mécanique :

$$\eta_m = \frac{P_a}{P_E}$$

avec pour convention $P_a = \rho \cdot g \cdot h_a$, puissance disponible sur l'arbre et h_a hauteur fictive réellement disponible.

Le rendement globale représente l'ensemble des pertes dans la machine et est défini comme le rapport de la puissance réellement disponible sur l'arbre de la machine à la puissance mise à la disposition de celle-ci :

$$\eta_g = \eta_m \eta_v \eta_h = \frac{P_a}{P_n} = \frac{P_a}{(\rho_n + \rho) g h_n} \quad (7)$$

II.6. Degré de réaction

Le degré de réaction est le rapport entre l'énergie de pression que possède le fluide à l'entrée de la roue et l'énergie totale correspondant à la chute utilisable. Il peut s'exprimer en fonction des pressions p_1 et p_2 par la relation :

$$\sigma = \frac{P_1 - P_2}{\rho h_n}$$

Si $P_1 = P_2$: $\sigma = 0$, la turbine est à action (Pelton, Banki).

Si $P_1 \neq P_2$: $\sigma \neq 0$, la turbine est à réaction (Francis, Kaplan, hélice).

II.7. Notion de vitesse spécifique

Cette notion résulte de l'étude de la similitude des turbines hydrauliques.

Considérant deux machines S et S' géométriquement semblables et dont les écoulements sont en similitude géométrique, la similitude dite de Combe-Rateau conduit aux deux relations :

- de l'échelle des longueurs :

$$\alpha = \left(\frac{P'_u}{P_u} \right)^{1/2} \left(\frac{H'_n}{H_n} \right)^{-3/4}$$

- et de l'invariant de similitude :

$$C_k = N \left(\frac{P_u}{\rho} \right)^{1/2} \cdot \left(g h_n \right)^{-5/4}$$

où N est la vitesse de rotation de la roue en tr/s. $\left[N = \frac{\omega}{2\pi} \right]$

La définition de la vitesse spécifique n_s peut alors être énoncée comme suit :

La vitesse spécifique d'une turbine S, est la vitesse de rotation d'une turbine géométriquement semblable et fonctionnant en similitude cinématique qui produit une puissance de 1 ch sous une hauteur de chute nette de 1 m avec le même rendement manométrique optimal que celui de la turbine S.

$$n_s = N \frac{P_u^{1/2}}{h_n^{5/4}} \quad (8)$$

n_s est exprimée en tours/seconde comme N, P_u en chevaux et h_n en m.

II.8. Application à la classification des turbomachines

Grâce à l'expérience et à la pratique des constructeurs, une turbine hydraulique peut être caractérisée par son point de rendement maximal, ou point d'adaptation, pour lequel la machine est calculée.

Pour les Peltons à plusieurs jets ou les Francis doubles, on considère le coefficient calculé pour un jet ou un étage.

Ce coefficient permet, dans des conditions d'utilisation bien définies, de choisir la machine la mieux adaptée à l'utilisation désirée.

On voit sur la figure 1 que pour chaque type de turbine, le rendement est maximum dans un domaine de n_s très restreint.

De même, la figure 2 donne les rendements de différents types de turbines en fonction de la charge (débit) et pour un n_s choisi.

Nous voyons donc que ce paramètre est celui qui permet de choisir l'engin le mieux adapté à une situation donnée.

Nous avons récapitulé sur le diagramme suivant les plages de variations utiles des vitesses spécifiques pour chaque type de machines.

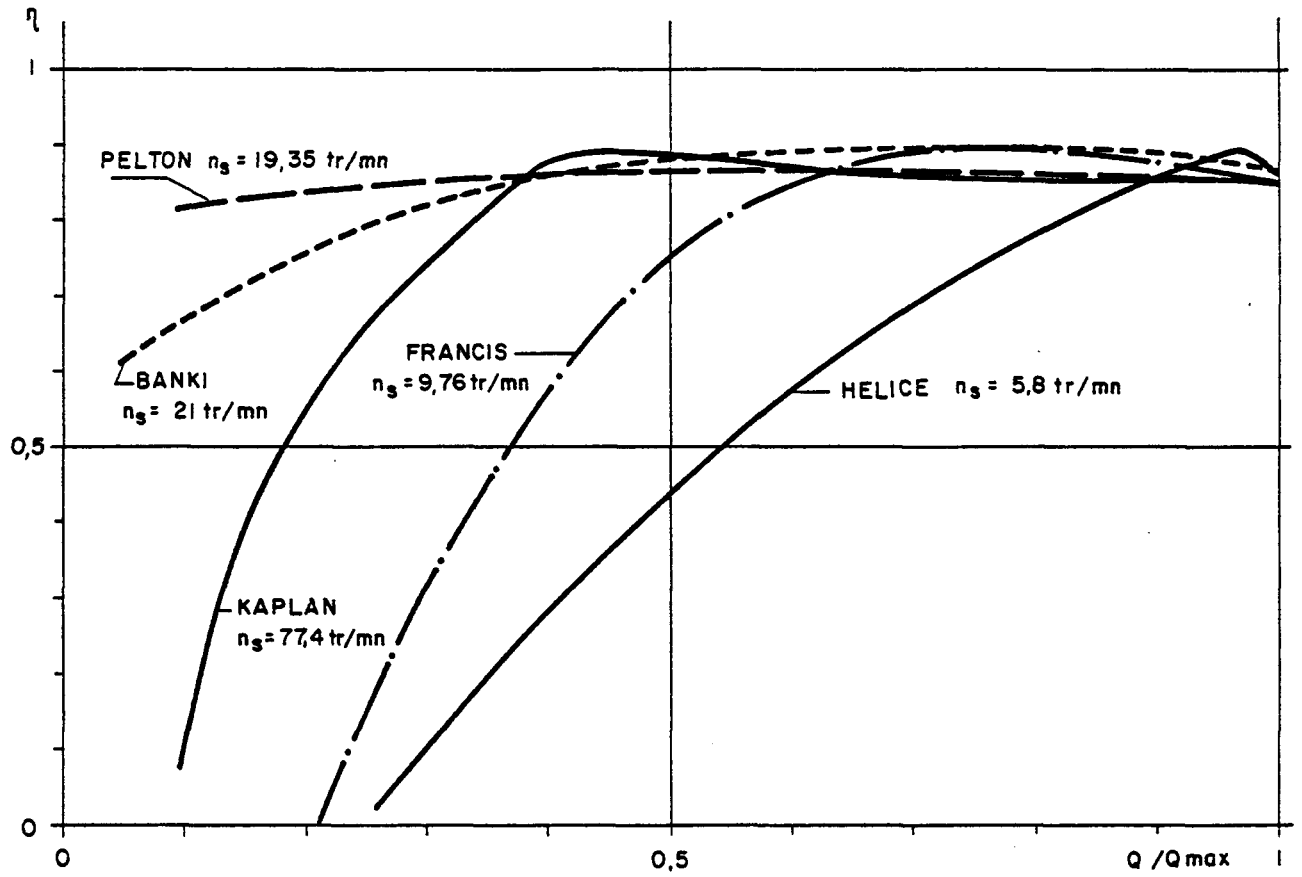


FIGURE 1

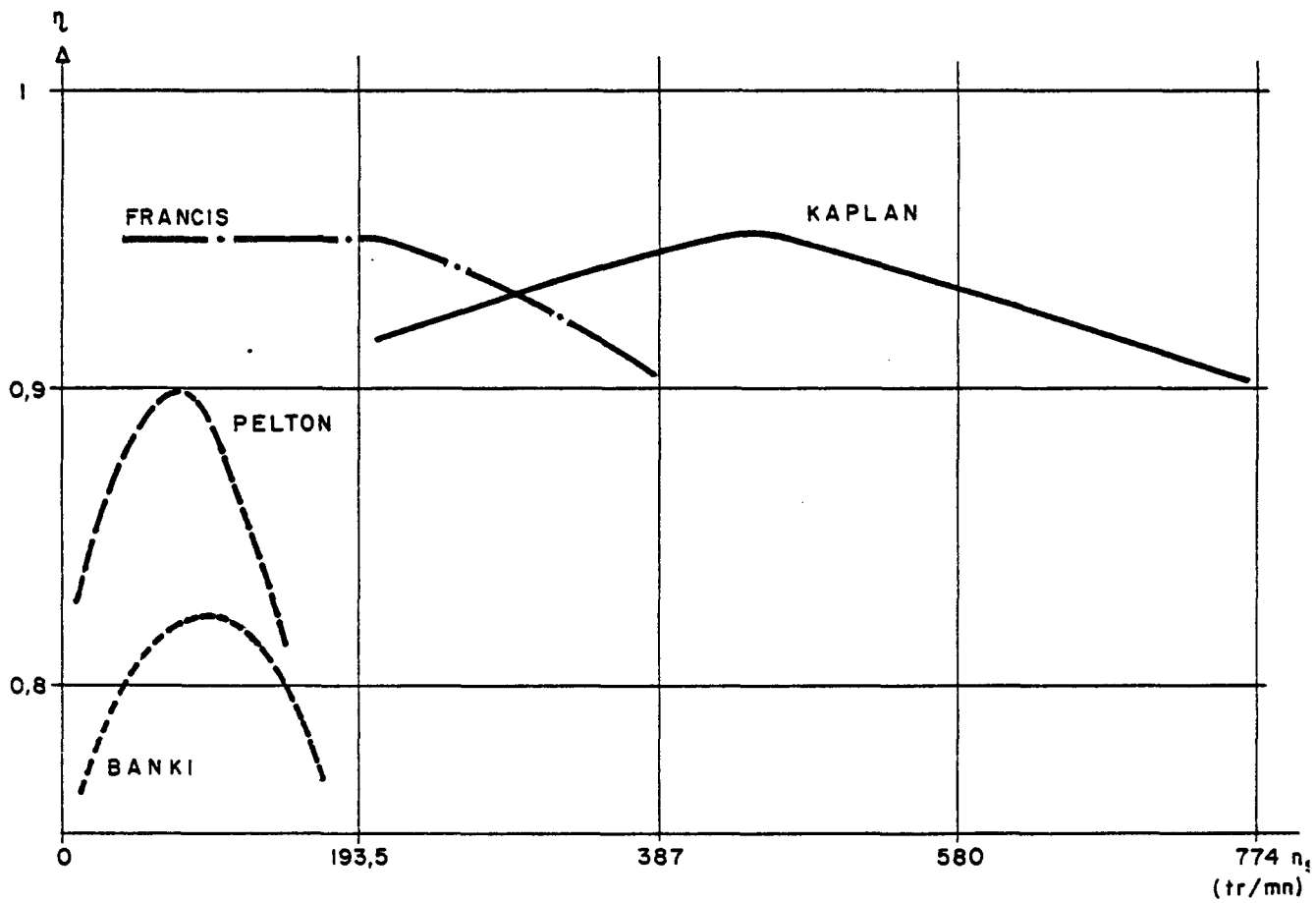
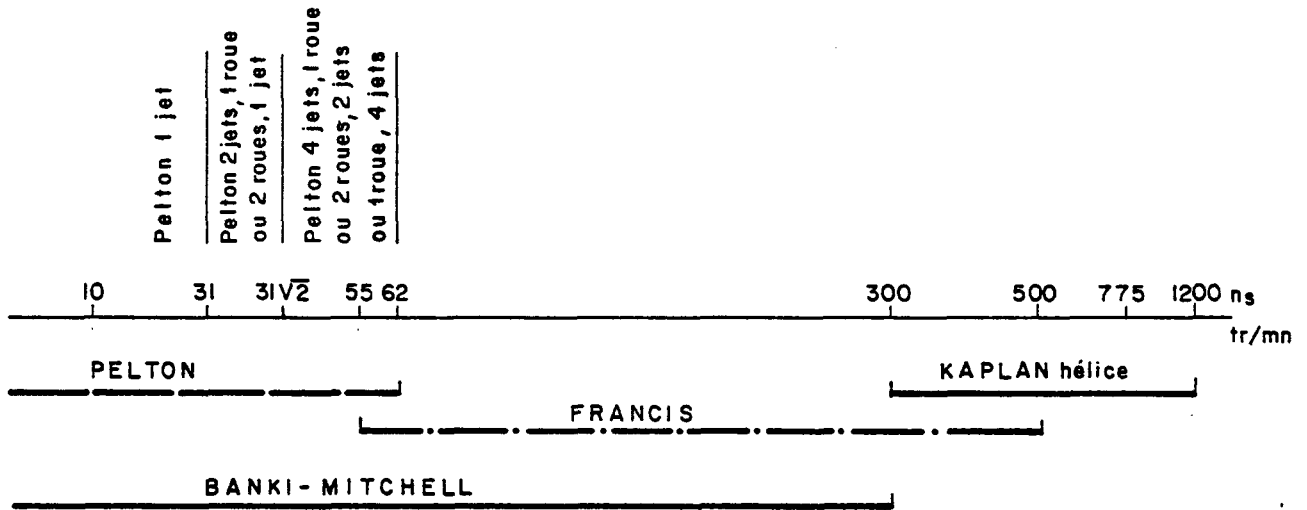


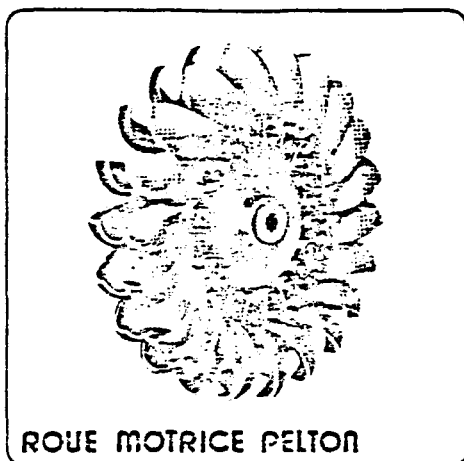
FIGURE 2



D'une manière plus pratique, nous avons représenté sur la figure 3, les différentes "plages" d'utilisation des divers types de machines dans le plan, débit-hauteur de chute.

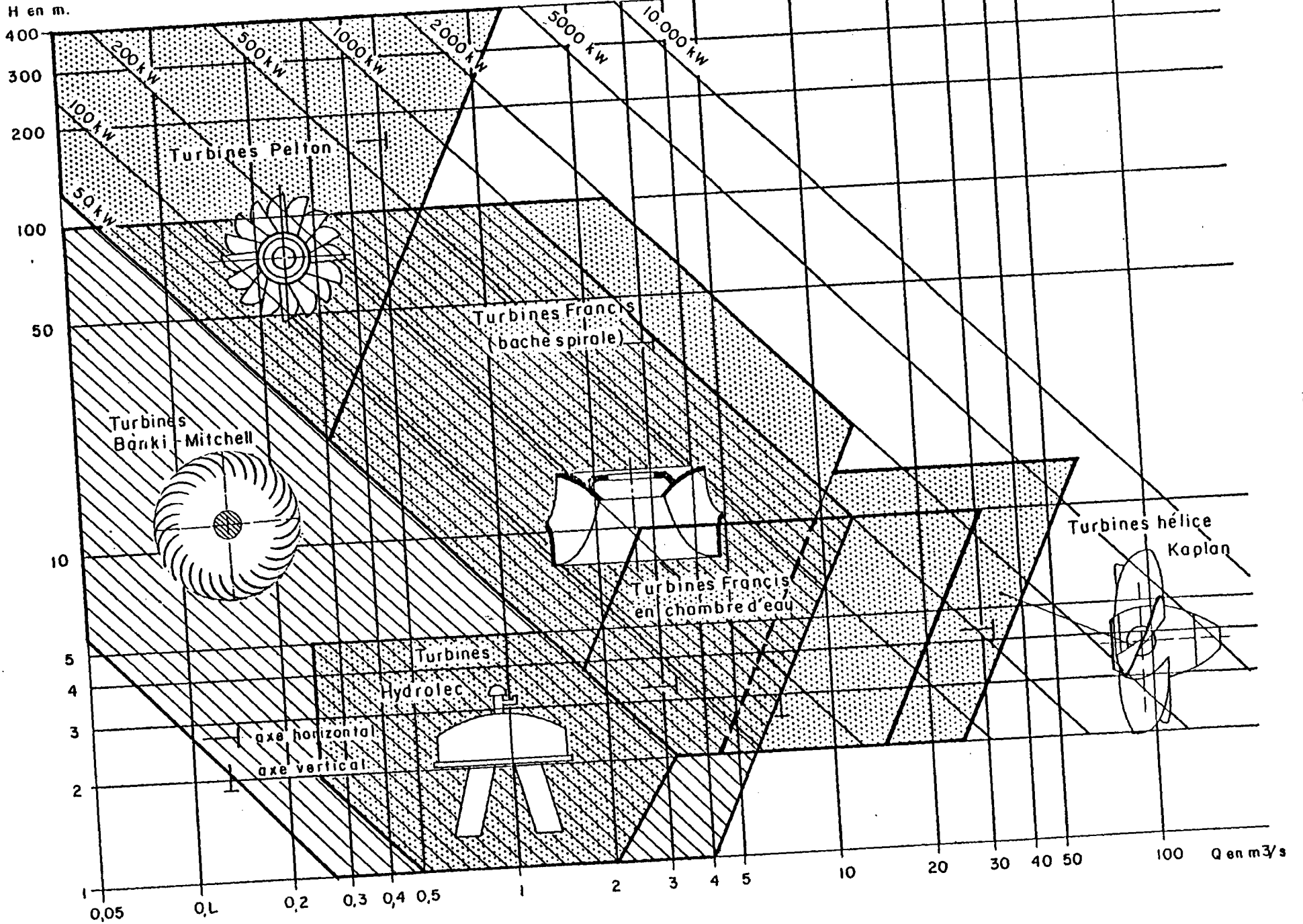
II.9. Description sommaire des différentes turbines

Pour des hauteurs de chute allant de 80 m (parfois moins), jusqu'à des hauteurs de 400 m, on utilise généralement des turbines *Pelton*. Ce sont des turbines à action ou à jet libre, constituées d'une roue, d'axe fréquemment horizontal, portant sur sa périphérie un aubage d'augets. L'énergie de pression de la chute est totalement transformée en énergie cinétique au moyen d'un injecteur qui dirige le jet de fluide sur les augets. Le débit de ce jet est réglable à l'aide d'une aiguille mobile.

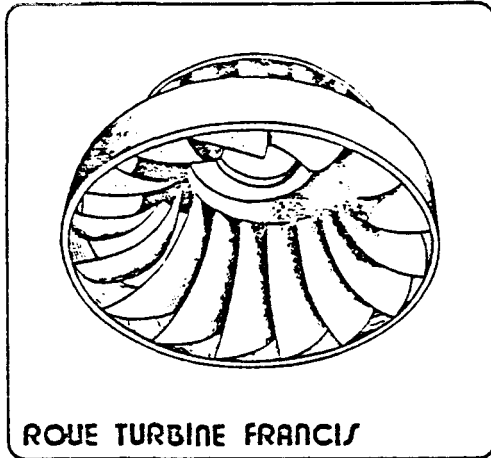


Le domaine d'utilisation de ces turbines est donc celui des hautes chutes et des faibles débits (l'augmentation de ce dernier entraîne la multiplication des jets ou des roues). Ces machines ont des vitesses assez élevées (500 à 1 500 tr/mn), et le rendement de l'ordre de 80 à 85 % est stable pour une assez grande plage de variation de débit (fig. 2).

FIGURE 3

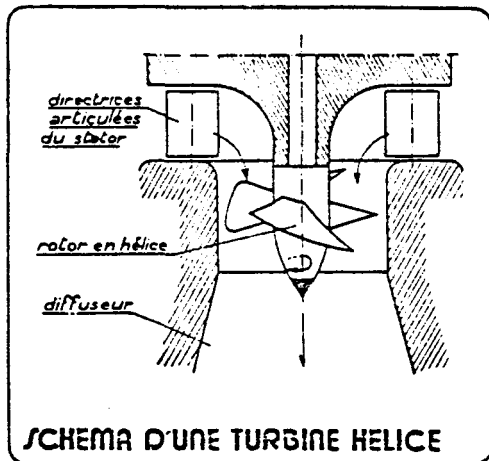


Pour les chutes variant entre 100 m et 20 m, on utilise les turbines *Francis*. Ces turbines sont équipées d'une bêche spirale qui répartit uniformément le débit sur toute la périphérie de la roue en guidant les filets fluides grâce à des directrices, afin qu'ils attaquent les aubages sans chocs (minimisation des pertes). La roue est de type mixte hélico-centripète, c'est-à-dire que le fluide rentre latéralement (perpendiculaire à l'axe) pour ressortir suivant l'axe de la roue. Le fluide est ensuite repris par un aspirateur dont le rôle est de le ralentir et donc de récupérer l'énergie cinétique encore disponible. Ces machines, de conception assez sophistiquée, ont des rendements de l'ordre de 80 à 90 % pour le débit nominal, mais celui-ci chute rapidement dès que l'on s'éloigne de ce débit.



ROUE TURBINE FRANCIS

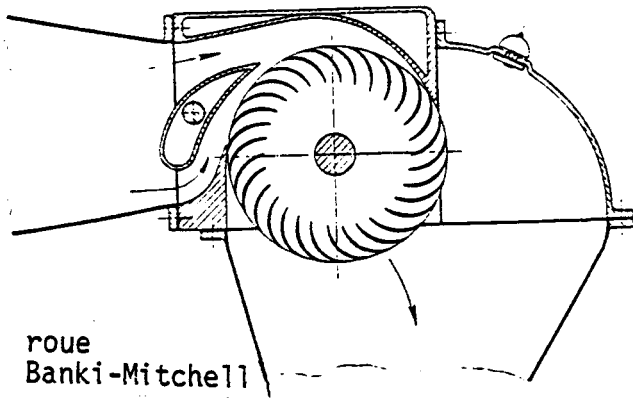
Ces roues, à axe vertical ou horizontal, ont des vitesses de rotation variant de 250 à 1 000 tr/mn.



SCHEMA D'UNE TURBINE HELICE

Pour les basses chutes (10 m et moins), on utilise les turbines *Kaplan* ou *hélice*. Celles-ci de type axial, sont équipées de directrices, ayant le même rôle que pour les Francis, mais la roue est une hélice ; le diffuseur a également le même rôle que pour les turbines Francis. Lorsque la roue est équipée de pale variable, elle est alors appelée *Kaplan*. Ces machines ont de bons rendements pour les régimes proches du débit nominal.

Que ce soit les turbines hélice, Kaplan ou Francis, les directrices sont généralement réglables à l'aide de biellettes commandées par un mécanisme appelé "cercle de vannage". Ce système permet d'agir sur l'orientation des filets fluides en fonction du débit pour augmenter les performances de la machine et régler le débit.



Enfin, pour de grandes plages de débit (0,05 à 10 m³/s) et de hauteur (1 à 200 m), la turbine *Banki-Mitchell* peut être utilisée. C'est une turbine à action où l'énergie du fluide est totalement utilisée sous forme cinétique, en injectant le fluide sur un secteur d'une roue cylindrique. Celle-ci est équipée d'aubes situées selon une génératrice, sur lesquelles vient agir le fluide ; une fois dans un sens une fois dans l'autre.

Ces machines, comme les Pelton, ont un rendement satisfaisant (80 %) pour une large plage de débit (cf. fig. 2). C'est une des propriétés importantes des machines à action.

Ces machines ne sont plus fabriquées par aucun constructeur français pourtant dans le domaine des microcentrales, cette machine semble présenter un certain nombre d'avantages : économique, robuste, et pouvant absorber de forte variation de débit. OSSBERGER, turbinier allemand, est devenu le spécialiste de ces turbines.

11.10. Développements spécifiques aux microcentrales

L'équipement de sites hydroénergétiques de forte puissance, amène les fabricants à étudier chaque machine individuellement.

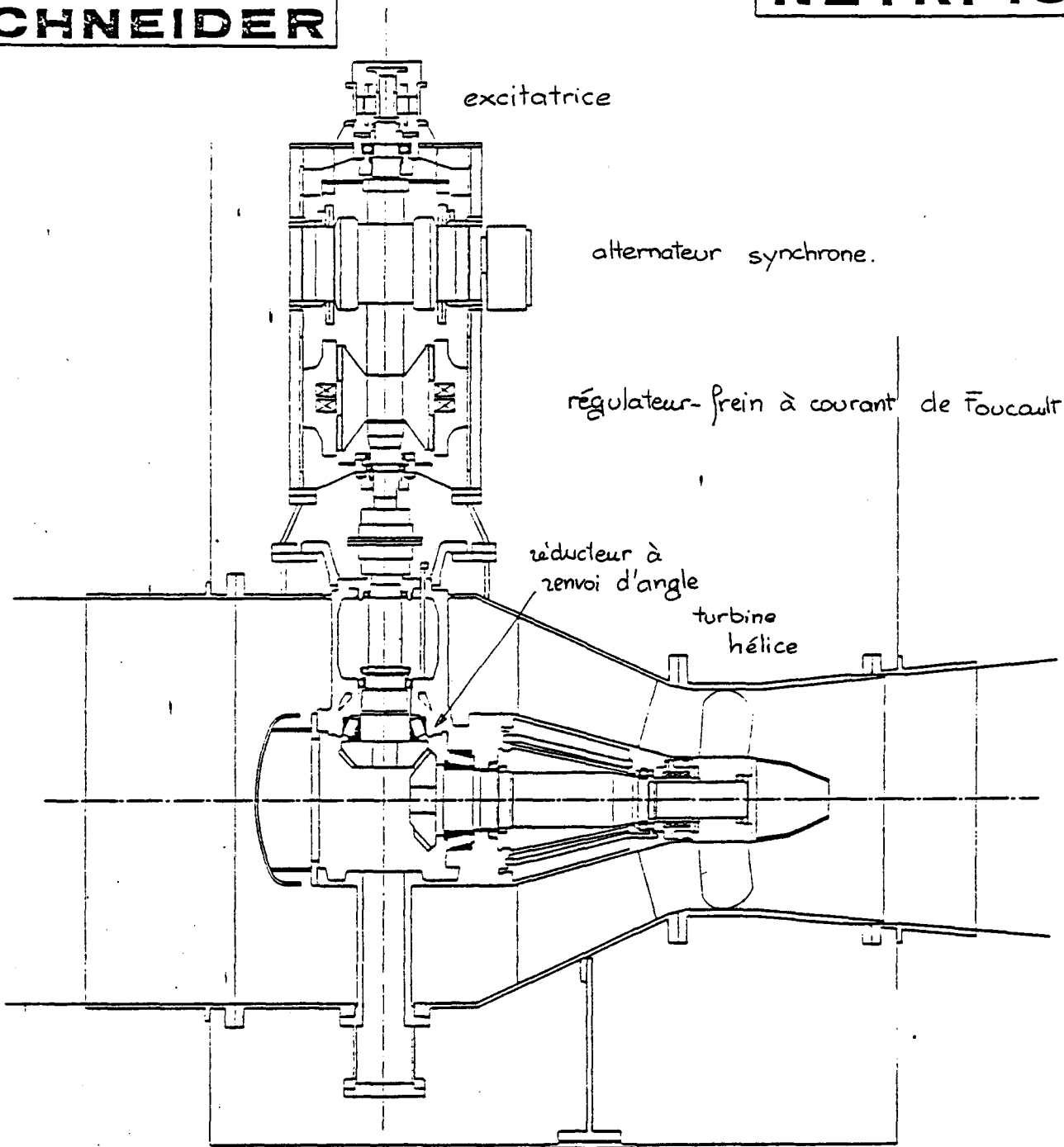
Cette méthode de fabrication et d'étude étant impensable, pour des raisons de coût, dans le domaine de microcentrales, certains d'entre-eux ont développé des unités standardisées, bien adaptées au marché visé.

C'est surtout pour les basses et très basses chutes que des efforts ont été faits ; afin de valoriser les équipements au fil de l'eau.

La Société NEYRPIC a développé un groupe à hélice en conduite : basé sur le principe bulbe, une roue hélice attaque un réducteur à renvoi d'angle monté dans le corps du bulbe. Une génératrice montée perpendiculairement à l'ensemble est ainsi directement entraînée (cf. figure 4).

**JEUMONT
SCHNEIDER**

NEYPIC



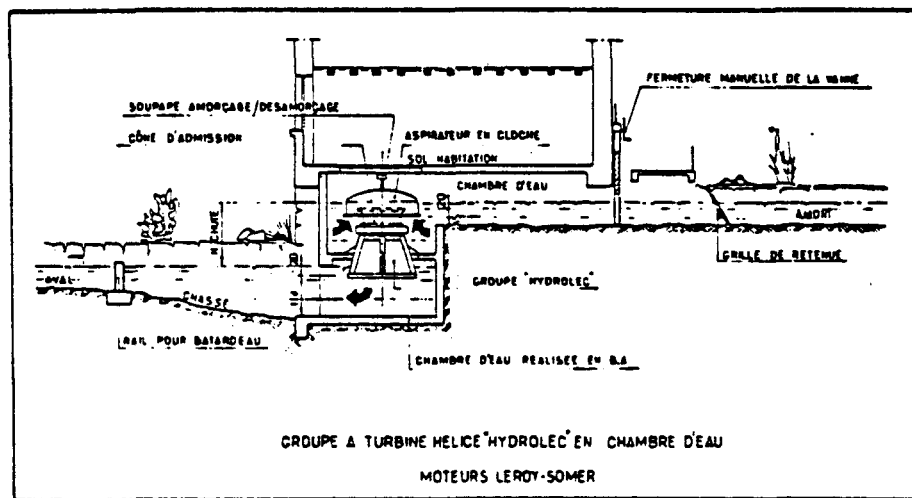
GROUPE SYNCHRONE

TURBINE . ALTERNATEUR . FREIN A COURANT DE FOUCAULT

FIGURE 4

Cette même société ainsi que d'autres constructeurs développent des groupes hélice en siphon, pour les très basses chutes (2 à 5 m) et des puissances allant de 20 à 150 kw.

De son côté, la Société LEROY-SOMER a mis au point un ensemble, basé sur le principe du groupe hélice en chambre d'eau appelé "hydrolec". Simple et rustique, il est adapté aux très basses chutes (1 à 5 m) et au très faible puissance (3 à 35 kw).

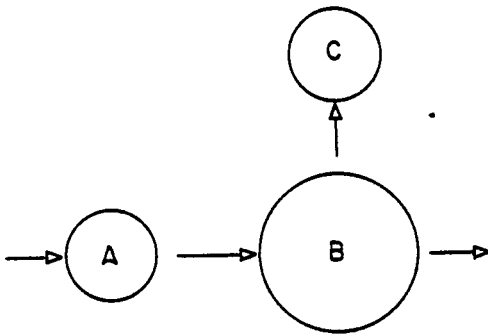


III - LA REGULATION DES GROUPES

L'énergie mécanique disponible sur l'arbre de la machine, n'étant que rarement directement utilisable, doit en principe être transformée en énergie électrique, donc le transport et l'utilisation sont beaucoup plus aisés.

Quel que soit le procédé utilisé (voir plus loin), il nécessite fréquemment une vitesse de rotation de l'engin relativement constante autour d'une valeur nominale fixée. Ceci nécessite donc obligatoirement de disposer d'un système dit de régulation qui permette de réagir aux variations de demande de puissance au niveau de la génératrice (donc du réseau) à chaque instant.

III.1. Principe général de la régulation



Soit le groupe turbo-alternateur B sollicité aux variations des réseaux, A l'organe d'admission (aiguille d'injecteur Pelton, ou directrices de Francis, Kaplan ou Banki) et C l'organe de contrôle.

Appelons : \mathcal{J} le moment d'inertie des masses tournantes du groupe turbo-alternateur,
 Ω la vitesse actuelle du groupe,
 Ω_0 sa vitesse de consigne,
 \mathcal{C}_m le couple moteur de la turbine,
 \mathcal{C}_r le couple résistant de l'alternateur,
 \mathcal{C}_p le couple de pleine charge.

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$\mathcal{J} \frac{d\Omega}{dt} = \mathcal{C}_m - \mathcal{C}_r \quad \text{ou} \quad \mathcal{J} \frac{\Omega_0}{\mathcal{C}_p} \frac{d \frac{\Omega}{\Omega_0}}{dt} = \frac{\mathcal{C}_m}{\mathcal{C}_p} - \frac{\mathcal{C}_r}{\mathcal{C}_p}$$

en posant $\frac{\mathcal{J} \Omega_0}{\mathcal{C}_p} = \tau$ qui est le temps de lancement du groupe ; $\omega = \frac{\Omega}{\Omega_0} \cdot \frac{\mathcal{C}_m}{\mathcal{C}_p} = C_m$;
 et $\frac{\mathcal{C}_r}{\mathcal{C}_p} = C_r$.

il vient alors : $\mathcal{T} \frac{d\omega}{dt} = C_m - C_r$ ou en posant $\Delta C = C_m - C_r$
et $\Delta\omega = \frac{\Omega \Omega_0}{\Omega_0} = \omega - 1$

On obtient l'équation fondamentale de la régulation :

$$\boxed{\mathcal{T} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta C} \quad (9)$$

On voit donc immédiatement que si l'on dispose de masse tournante importante (\mathcal{T} donc \mathcal{T} grands), on pourra jouer directement sur les variations de débit pour régler la puissance du groupe, sachant que l'inertie du groupe est capable "d'encaisser" momentanément les variations du réseau. C'est la régulation mécanique. Ce principe devient faux avec les groupes légers tels que ceux qui équipent fréquemment les microcentrales, il va donc falloir agir directement au niveau de la consommation d'énergie électrique. C'est la régulation électrique ou électronique.

III.2. Régulateurs mécaniques

On distingue deux types principaux de régulateurs mécaniques suivant la grandeur de référence mesurée :

- le régulateur tachymétrique à asservissement temporaire,
- le régulateur accélérotachymétrique.

Chacun de ces appareils comporte un organe de mesure qui décèle les variations de grandeur à régler, soit la vitesse de rotation et un organe de réglage qui agit sur la grandeur à régler, c'est-à-dire le débit, par l'intermédiaire du distributeur de la turbine.

III.3. Régulateurs électriques

Le développement de l'électronique a permis de réaliser des régulateurs entièrement électriques.

En principe, un tel appareil comprend :

- un organe de mesure constitué par un fréquencemètre,
- un appareillage d'amplification du courant produit par le fréquencemètre,
- un dispositif traduisant les variations de courant électrique en énergie mécanique, soit par l'intermédiaire d'un électrofrein à courant de Foucault (procédé JEUMONT-SCHNEIDER-NEYRPIC), soit par l'intermédiaire d'un servo-moteur hydraulique agissant sur le cercle de vannage.

IV - APPAREILLAGE DE PRODUCTION, DE TRANSFORMATION ET DE TRANSPORT DE L'ENERGIE HYDRAULIQUE

L'énergie mécanique mise à disposition des utilisateurs, sur l'arbre de la turbine n'est fréquemment pas directement utilisable. Il est donc nécessaire de la transformer sous une forme aisée à transporter et à utiliser. Cette forme est la forme électrique.

Pour des raisons de sécurité et de facilité de transport et de transformation, l'énergie électrique est généralement utilisée de nos jours sous sa forme alternative, ce qui implique une tension constante et surtout une fréquence distribuée constante ; c'est donc par la variation de l'intensité du courant demandé qu'apparaîtront les variations de puissance.

Liées à cet impératif de fréquence constante, deux situations peuvent se présenter :

- a) Il existe déjà un réseau électrique de forte puissance (EDF en France) et assurant une fréquence constante, sur lequel on peut se brancher. C'est le *réseau connecté*.
- b) Il n'existe aucun réseau, ou un réseau de puissance trop faible ; il est nécessaire d'assurer sa propre régulation de fréquence. C'est le *réseau autonome*.

Nous allons donc voir dans l'ordre, les problèmes posés, d'abord par le réseau autonome, ensuite par le réseau connecté.

IV.1. Production d'énergie pour un réseau autonome

IV.1.1. Les génératrices synchrones

- Principe :

Soit une spire parcourue par un courant continu d'intensité I et tournant à une vitesse ω par rapport à un bâti fixe appelé stator (fig. 5). Si sur celui-ci on dispose un enroulement électrique, chacun de ces fils va couper le champ magnétique créé par le rotor dont la pulsation sera $\frac{\omega}{2\pi} = N$ (en tour/s) ; un courant alternatif J de même pulsation sera donc engendré dans chacune des bobines du stator.

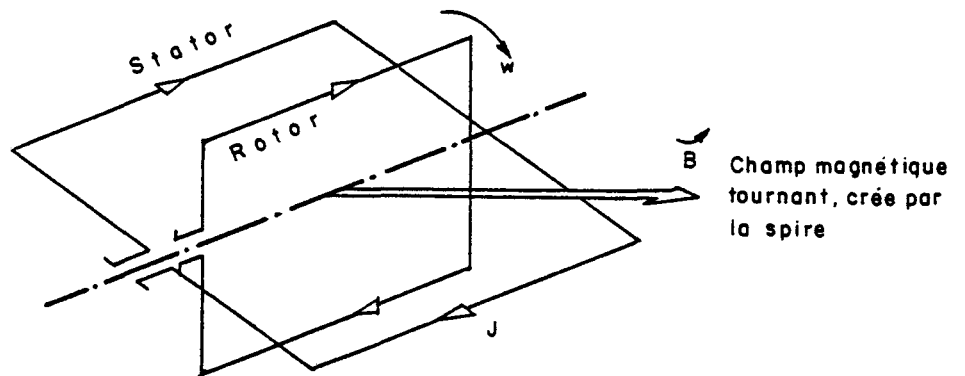


Figure 5

En disposant correctement les turbines sur le stator, et en les branchant de manière correcte entre elles, on obtient ainsi un courant résultant (souvent sous forme triphasée régulièrement décalée), qui est industriellement utilisable.

On note immédiatement deux choses :

- a) La vitesse du rotor doit être très régulière puisque c'est elle qui régule la fréquence.
- b) Il est nécessaire de fournir un courant continu au rotor pour que l'ensemble fonctionne.

Le deuxième point est facilement résolu de nos jours en montant sur le même arbre de la machine une génératrice (appelée excitatrice), dont le courant est redressé et directement envoyé au bobinage du rotor.

Le premier problème est beaucoup plus délicat. Il faut en effet maintenir constantes la tension et la fréquence (donc la vitesse de rotation du groupe) du courant fourni, quelle que soit la puissance demandée par le réseau.

- Description sommaire du fonctionnement d'une machine synchrone en régime autonome

Le groupe couplé à un réseau, si l'on néglige les pertes électriques ne débite aucun courant ($I = 0$).

Si maintenant on demande la puissance $P = UI \cos \varphi$ aux bornes de l'alternateur, le rotor de celui-ci va se décaler par rapport au champ tournant d'un angle θ tel que le couple mécanique exercé sur l'arbre de la machine (\mathcal{E}_m) compense le couple résistance dû à l'appel de puissance $\left[\mathcal{E}_r = \frac{P}{\omega} \right]$.

Il faut donc que la turbine exerce un couple moteur $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_r$. Ceci étant pour toute variation de P il faudra faire correspondre une variation de \mathcal{E}_m équivalente. D'après l'équation (2) on peut soit agir sur le débit (q) par action sur les directrices ou l'aiguille d'injecteur (Pelton), soit sur la vitesse tangentielle à l'entrée de la roue à l'aide des directrices ou à la sortie de la roue à l'aide de pales mobiles (Kaplan).

La réponse devant être très rapide, et l'inertie des appareillages pour microcentrales étant faible, il a été conçu un système à courant de Foucault d'absorption d'énergie qui permet une régulation plus simple et non tributaire de mécanismes compliqués et délicats (voir figure 4).

- Rendement des machines synchrones :

Les machines synchrones ont de très bons rendements, mais nécessitent, comme nous l'avons vu, des systèmes de régulation de tension et de fréquence compliqués et délicats qui augmentent énormément leur coût. Elles demeurent néanmoins la solution idéale pour les réseaux autonomes.

IV.1.2. Les génératrices à courant continu

Bien que le courant continu soit peu utilisé à cause des gros risques qu'il présente pour la sécurité et les problèmes de transport qu'il pose, son utilisation demeure intéressante dans certaines industries (électrometallurgie, électrochimie), matériel de traction (téléphérique, ascenseur, chemin de fer, etc...).

Nous allons donc examiner rapidement les appareils permettant de produire une telle forme d'énergie.

- Description du fonctionnement :

Soit un stator constitué d'un aimant permanent, un rotor constitué d'une spire qui est connectée sur un collecteur en deux demi-coquilles (cf. figure 6). Si la spire tourne dans le champ fixe, elle va fournir une tension continue (sens invariable) aux bornes du collecteur, mais pas constante.

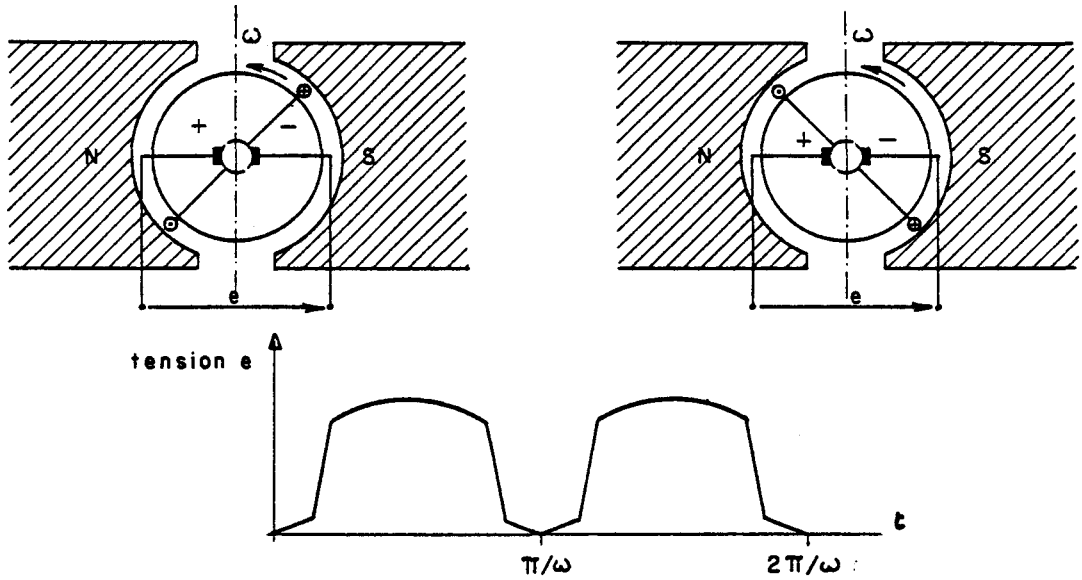
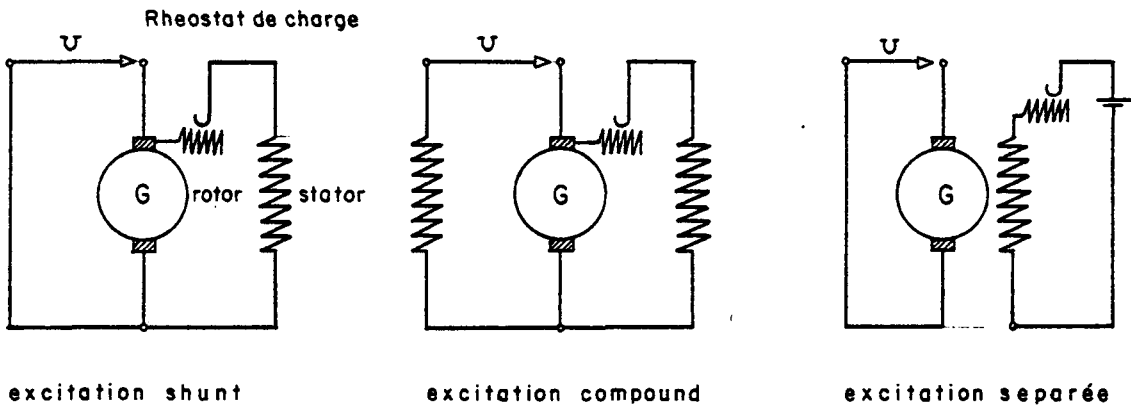


Figure 6

Si l'on met n spires sur le rotor connectées à une bague tournante constituée de n plaquettes et en contact avec les balais d'un collecteur ; on obtient un courant continu et quasiment constant.

Pour créer le champ magnétique, on dispose en fait d'un enroulement sur le stator dans lequel circule une partie du courant que l'on produit.

Pour les machines génératrices, on utilise fréquemment les montages suivants :

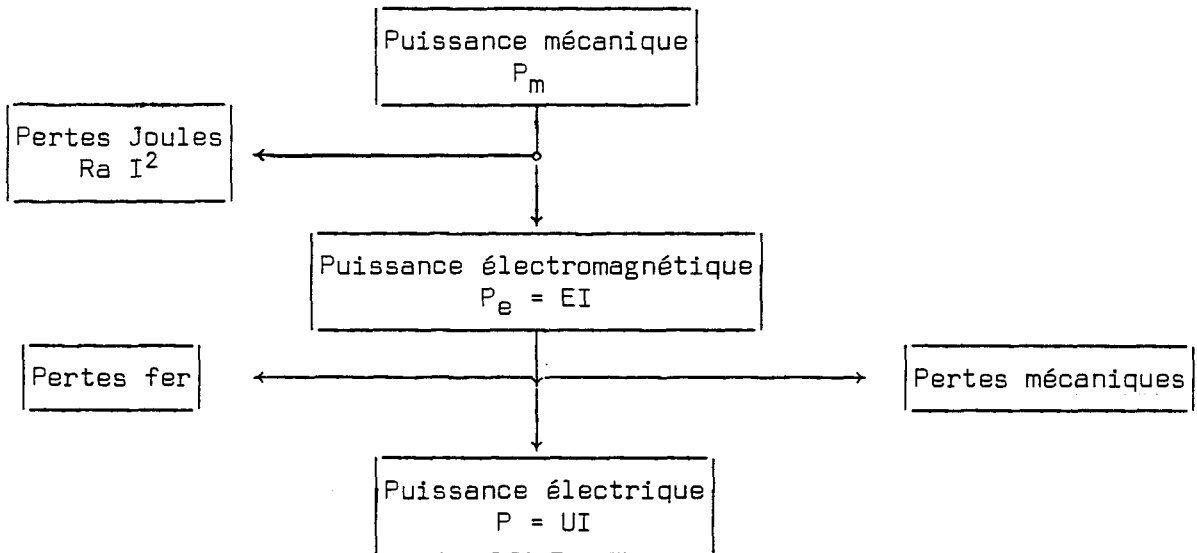


On pourrait également imaginer une excitation série, mais celle-ci n'est jamais utilisée pour les génératrices.

Ces montages sont équipés d'un "rhéostat de champ" permettant le réglage du champ magnétique donc permettant d'agir sur la puissance électrique.

- Bilan général de puissances des génératrices à courant continu :

Le tableau suivant est un bilan général des puissances des génératrices à courant continu, permettant d'en définir le rendement global.



- . à la puissance électrique P
correspond le couple électrique $\mathcal{C} = \frac{P}{2\pi N}$
- . à la puissance électromagnétique P_e
correspond le couple $\mathcal{C}_e = \frac{P_e}{2\pi N}$
- . à la puissance mécanique P_m
correspond le couple $\mathcal{C}_m = \frac{P_m}{2\pi N}$

La différence entre la puissance mécanique et la puissance électrique est égale aux pertes (magnétiques, électriques, mécaniques) et on a le rendement global :

$$\eta_e = \frac{P_m - P}{P_m} = \frac{\mathcal{C}_m - \mathcal{C}}{\mathcal{C}_m}$$

IV.2. Production d'énergie pour un réseau couplé

Lorsqu'il existe un réseau de forte puissance par rapport à l'installation envisagée (au moins dix fois plus puissant) sur lequel il est possible de se connecter (cas de l'EDF en France), il est alors avantageux de le faire, car c'est lui qui règlera automatiquement la tension et la fréquence de l'installation. Pour cela on utilise des génératrices de type asynchrone :

- Principe :

Soit un champ magnétique tournant à la vitesse ω , produit par un courant alternatif parcourant un enroulement sur le stator. Si le rotor est constitué d'une spire court-circuitée sur elle-même, elle va être parcourue par un courant qui est tel, qu'il tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance (loi de Lenz).

La spire se met donc à tourner dans le même sens que l'induction jusqu'à atteindre une vitesse de régime ω' toujours inférieure à ω , qui est appelée "vitesse de synchronisme". En effet, si $\omega = \omega'$, le flux embrassé par la spire serait constant et le courant induit serait nul. Le couple d'entraînement serait alors nul et la spire ralentirait jusqu'au moment où le courant induit serait suffisant pour que le couple d'entraînement équilibre le couple de frottements.

La spire semblant glisser par rapport au champ tournant, on appelle "glissement" le rapport :

$$g = \frac{\omega - \omega'}{\omega}$$

Nous avons là le principe d'un moteur qui tourne à une vitesse

$$\omega' = \omega (1 - g)$$

toujours inférieure à la vitesse de synchronisme : c'est le principe d'un moteur asynchrone.

- Fonctionnement en génératrice :

Dépassons la vitesse de synchronisme en appliquant sur l'arbre de la machine un couple tel que la nouvelle vitesse soit $\omega'' > \omega$. Le couple s'exerce alors dans le sens contraire du mouvement : il est devenu résistant.

La machine absorbe de l'énergie mécanique : cette énergie se transforme nécessairement en énergie électrique qui est fournie au réseau relié au stator. Nous disons que la machine fonctionne en génératrice asynchrone.

Le glissement est négatif $g = \frac{\omega - \omega''}{\omega}$.

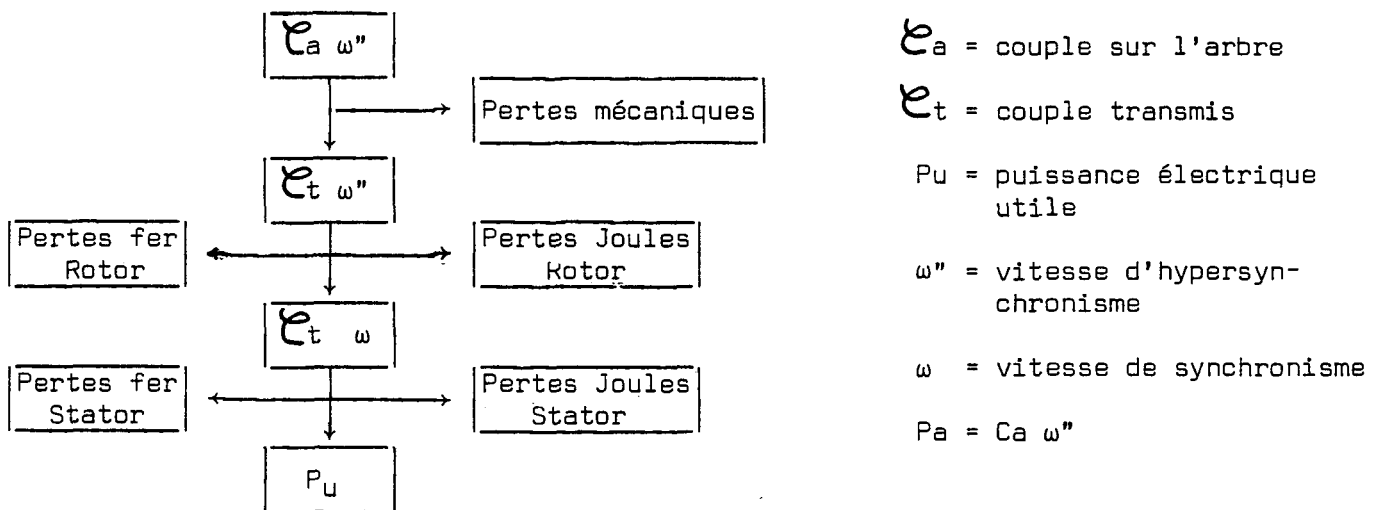
Pour des raisons analytiques de fonctionnement, ces machines continuent à absorber de la puissance réactive lorsque l'on passe du régime moteur au régime générateur. Ceci est un inconvénient majeur car le "cos φ" de l'installation (coefficient de puissance) augmente d'autant. Ce problème se résout aisément en installant entre les bornes de la machine une batterie de condensateurs lui fournissant l'énergie réactive nécessaire.

La génératrice asynchrone bien plus économique que la génératrice synchrone alimente un réseau plus puissant qui lui impose sa tension et sa fréquence de fonctionnement quelle que soit sa vitesse d'hypersynchronisme ω'', et l'admission d'eau dans la turbine qui entraîne cette génératrice est, une fois pour toute, réglée à pleine charge. C'est l'alternateur qui supporte les variations de la puissance demandée par le réseau.

Ainsi la génératrice asynchrone convient bien à l'utilisation des petites chutes d'eau pour l'aménagement desquelles les considérations essentielles sont : prix de revient du kW installé, facilité de mise en marche et de surveillance de l'installation, possibilité de réaliser un fonctionnement entièrement automatique.

- Bilan énergétique d'une machine asynchrone :

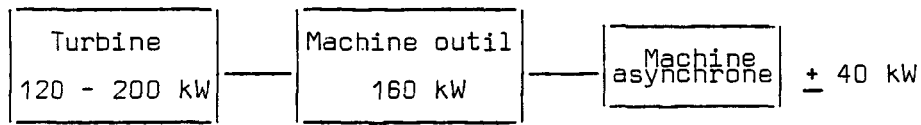
Le tableau suivant est un bilan général des puissances d'une machine asynchrone fonctionnant en générateur.



En utilisant ce tableau et suivant quelques approximations, on montre que le rendement d'une telle machine est égale à :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \approx \frac{1}{1-g} \quad (10)$$

- Utilisation comme régulatrice de puissance (exemple) :



. Soit une turbine hydraulique T dont la puissance, suivant le débit de la chute varie de 120 à 200 kW, et qui entraîne une machine-outil et une machine asynchrone de 40 kW. Grâce à cette dernière, qui marchera tantôt en moteur, tantôt en génératrice, la machine outil pourra recevoir constamment 160 kW.

On voit sur cet exemple simple, l'avantage incontestable d'un tel appareillage, à condition bien sûr que l'on dispose d'un réseau de puissance sur lequel on puisse se connecter.

IV.3. Transformation et transport de l'énergie

IV.3.1. Transport du courant

Il est en général très rare que l'énergie produite soit directement utilisée sur place. Il est donc indispensable de la transporter vers son point d'utilisation en limitant au maximum les pertes durant ce transport.

Le problème se pose ainsi :

- On suppose connues les caractéristiques des appareils à alimenter et celles de la liaison.
- Il faut déterminer la section des conducteurs permettant, pour un réseau dont le facteur de puissance est $\cos \varphi$, d'assurer le transport du courant I par un câble de longueur L sans dépasser la valeur de la chute de tension ΔU permise.

On connaît la tension U entre les bornes de départ de la ligne et la puissance P_{\max} à transporter. On montre que la chute de tension dans la ligne est

$$\Delta U = k Z_{\max} \frac{P}{U \cos \varphi} L \quad (11)$$

où k = est un coefficient constant et Z_{\max} l'impédance par unité de longueur de la ligne soit :

$$Z_{\max} \approx \frac{\rho}{S}$$

avec ρ = la conductivité et S = la section du câble.

Ceci étant, on voit que pour P , $\cos \varphi$, L donné ; on peut diviser la chute de tension ΔU par deux, soit :

- en doublant la tension de départ,
- en doublant la section du câble, ce qui revient à multiplier le diamètre par $\sqrt{2}$.

Cette seconde solution est plus coûteuse puisqu'elle nécessite d'utiliser des conducteurs plus lourds donc plus chers, et c'est la première solution qui est généralement retenue par augmentation de la tension au départ de la ligne et rabaissement en bout de ligne pour l'utilisation. Dans tous les cas, si l'on appelle P_{li} les pertes en ligne, le rendement de la ligne est :

$$\eta_{li} = \frac{P_u - P_{li}}{P_{li}} \quad (12)$$

IV.3.2. Transformation du courant

- Constitution :

Un transformateur comprend essentiellement deux circuits électriques couplés magnétiquement de telle sorte que l'induction mutuelle entre les deux circuits, soit la plus grande possible. Pour cela on adopte un circuit magnétique, généralement constitué de plaques, fermé sur lui-même et sur lequel on dispose les deux enroulements.

- Principe de fonctionnement :

On applique une tension sinusoïdale sur l'un des enroulements, celui-ci traversé par un courant sinusoïdal induit à travers l'autre enroulement donne une force électromotrice (f.e.m.) sinusoïdale, si cet enroulement est formé sur un circuit quelconque, il va fournir de l'énergie à ce circuit.

Le transformateur est donc un appareil qui reçoit de l'énergie par l'un de ces enroulements (dit primaire ; valeurs 1) et la restitue (aux pertes près) par l'intermédiaire de l'autre enroulement (dit secondaire ; valeurs 2).

Pour un transformateur parfait (sans pertes) on montre que le rapport de transformation est :

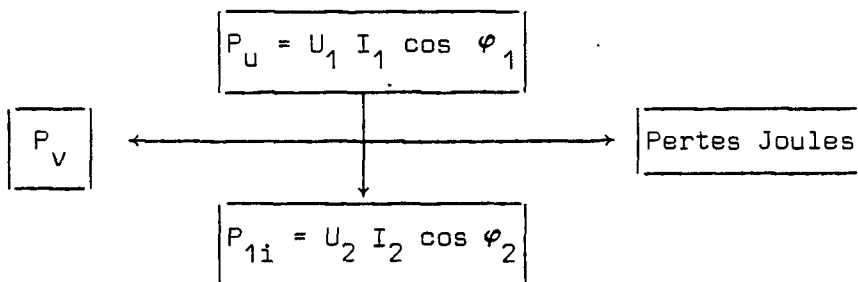
$$m = \frac{n_2}{n_1}$$

où n_2 = est le nombre de spires du secondaire, et n_1 celui du primaire. Dans ce cas :

- si $m > 1$ $\left\{ \begin{array}{l} U_2 > U_1 \quad \text{transfo. élévateur de tension} \\ I_2 < I_1 \quad \quad \quad \text{" abaisseur d'intensité} \end{array} \right.$
- si $m < 1$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{résultats inversés} \end{array} \right.$

En échangeant primaire et secondaire, un même transformateur peut être utilisé dans un cas comme dans l'autre.

Le transformateur étant un appareil statique, son rendement est toujours excellent (de l'ordre de 90 à 99 %). Les seules pertes à considérer sont données sur le tableau qui suit :



P_v sont les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans les tôles du circuit magnétique, qui sont constantes si V_1 est constante.

Les pertes joules dans les circuits primaires et secondaires sont elles, par contre, variables suivant la puissance appelée au secondaire donc proportionnelles à I_2 .

On montre que :

Le rendement est maximal lorsque les pertes magnétiques constantes sont égales aux pertes variables. Ceci implique donc un dimensionnement approprié à une puissance d'utilisation donnée afin d'assurer un rendement maximum.

Exemple :

A titre d'exemple si l'on dispose au borne de la machine de basse tension (380 V), on montre d'après l'équation (11) que si la puissance fournie est transportée telle quelle, les pertes en ligne seront 50 fois plus importantes que si on les transporte en moyenne tension (20 kV), d'où l'intérêt de la transformati

V - CONCLUSION : BILAN GENERAL D'UNE INSTALLATION HYDROELECTRIQUE

Disposant d'une chute nette h_n sur un cours d'eau, on dispose donc d'une puissance utilisable P_u qui est :

$$P_u = \eta \cdot 9,81 \cdot Q_t \cdot h_n$$

où 9,81 est l'accélération de la pesanteur

Q_t le débit total utilisable

h_n la hauteur nette.

η est le rendement global de l'installation qui peut être décomposé comme suit :

$$\eta = \eta_g \cdot \eta_{el.} \cdot \eta_{tr.} \cdot \eta_{Li.}$$

où η_g est le rendement global de la turbine (équation 7) prenant en compte toutes les pertes entre l'entrée au distributeur et la sortie au diffuseur. (Celui-ci ne prend pas en compte les pertes dans les conduites forcées ou les canaux d'amenée).

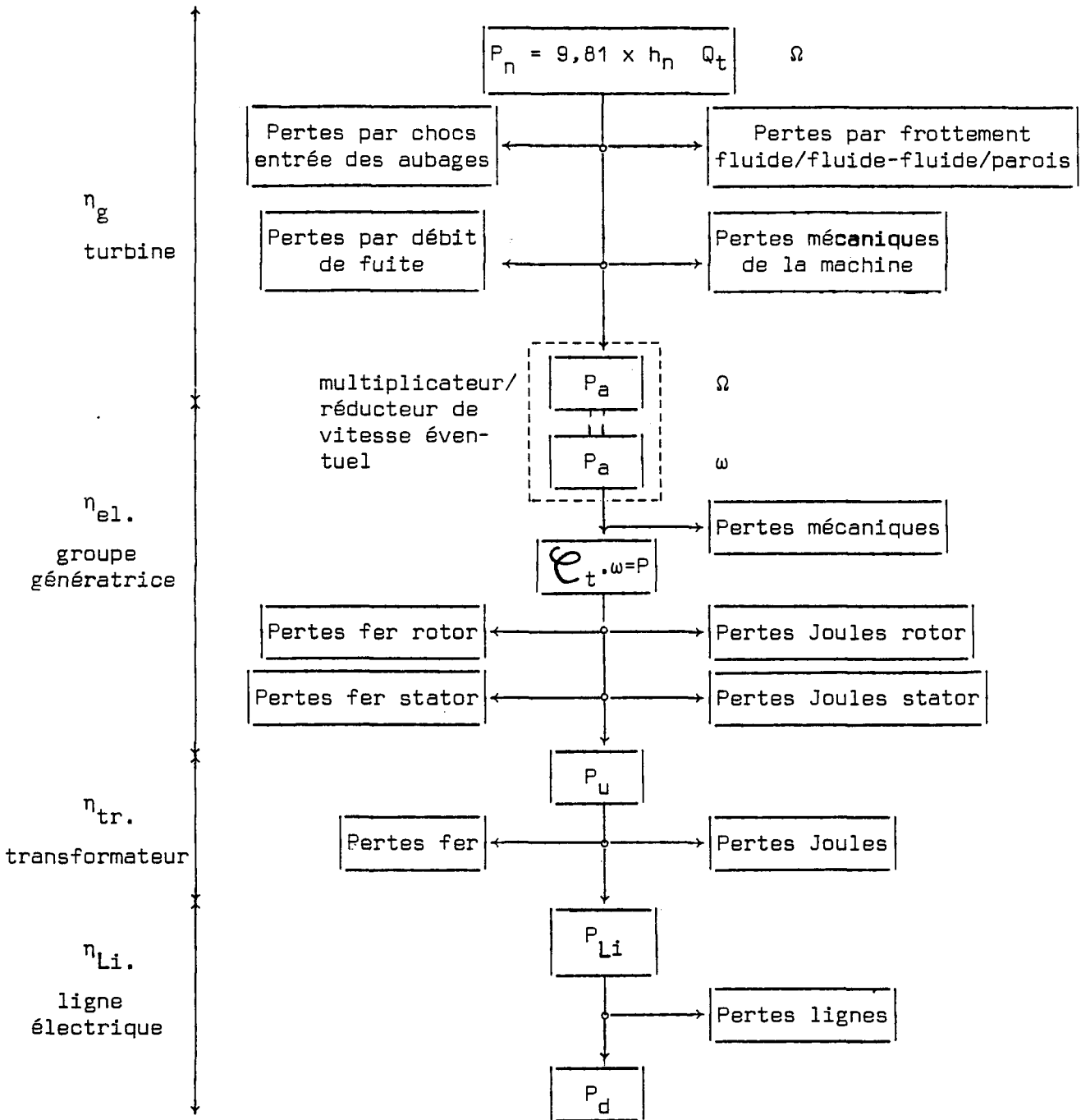
$\eta_{el.}$ est le rendement électromécanique de la machine génératrice de puissance électrique (équation 10). Il peut éventuellement englober les pertes au niveau d'un réducteur de vitesse quand celui-ci existe.

$\eta_{tr.}$ est le rendement de transformation en début et bout de ligne.

$\eta_{Li.}$ est le rendement de transport qui prend en compte les pertes en lignes (équation 12).

Nous avons donné sur le tableau qui suit le bilan énergétique d'une telle installation :

avec Ω vitesse de rotation de la turbine et ω vitesse de rotation de la machine génératrice.



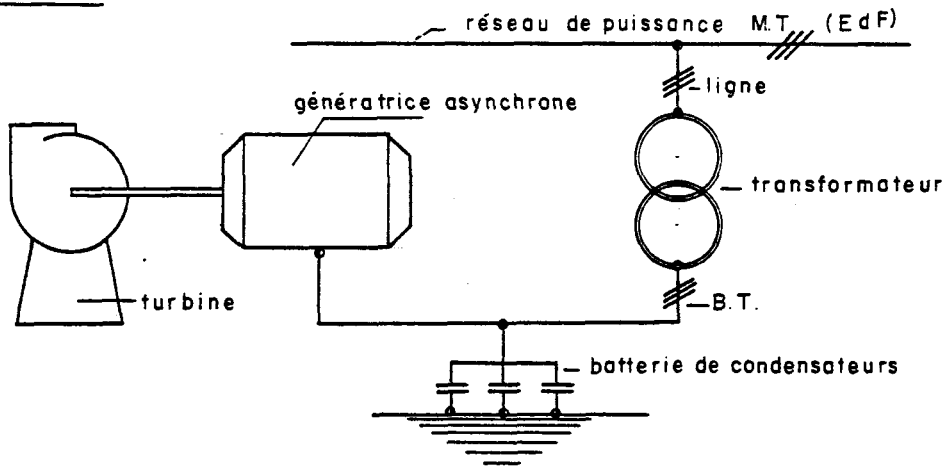
- P_n = puissance "nette" hydraulique
- P_a = puissance sur l'arbre de la machine
- P_u = puissance électrique utile
- P_{Li} = puissance dans la ligne
- P_d = puissance disponible en bout de ligne

On déduit de ce tableau que si P_d est la puissance disponible au bout de ligne et P_n la puissance hydraulique nette :

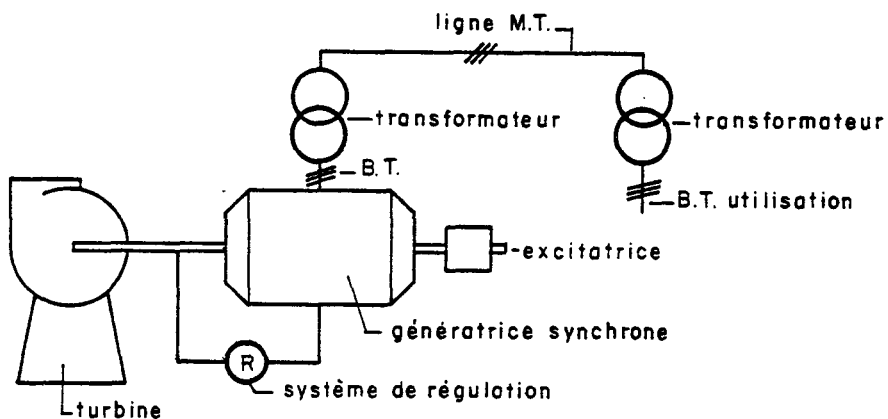
$$\eta = \frac{P_d}{P_n}$$

Enfin, nous rappelons sur les deux schémas suivants, les principes généraux de production d'énergie en circuit autonome et en circuit connecté.

Réseau connecté



Réseau autonome



N.B. : pour une installation où le transport est effectué sur une courte distance, l'on peut se passer de la transformation BT, MT. C'est le cas par exemple d'installation individuelle (moulin aménagé).

