

5.0 Introduction

Un complexe hydroélectrique est composé de plusieurs ouvrages. Dans le cadre de notre étude de faisabilité de l'implantation d'un aménagement hydroélectrique sur la rivière Momance, il convient d'effectuer différents calculs de dimensionnement des différents ouvrages que compose l'aménagement. Il y a les ouvrages de retenue (barrages et digues), les ouvrages de production (système d'adduction, centrale et système de restitution), les ouvrages de sécurité (déversoir et quelques pertuis de fonds), les installations d'acheminement et de transport d'énergie (poste de départ et lignes de transport), et enfin les infrastructures nécessaires à l'accès et à l'exploitation des ouvrages. Il convient de faire remarquer qu'il y a d'autres ouvrages nécessaires à l'aménagement qu'on qualifie de temporaire parce qu'ils sont utilisés seulement lors de la période de construction. On a : les digues temporaires, la dérivation provisoire, les infrastructures requises pour le campement, les routes d'accès et ponts requis lors de la construction.

5.1 Barrage

Un barrage est un ouvrage d'Art placé en travers d'un cours d'eau, destiné à retenir et stocker de l'eau ou à la dériver pour différents usages tels que : contrôle des crues, irrigation, industrie, hydroélectricité, pisciculture, réserve d'eau potable, etc. Les techniques de la fin du XIX^e et du début du XX^e siècle ne permettaient pas l'édification de retenues de grande capacité. Les premiers barrages ont surtout une fonction de dérivation d'une partie de l'eau (écrémage) vers une conduite forcée ou un canal d'irrigation. L'amélioration des techniques et des bétons dans le premier quart du XX^e siècle permet d'envisager la réalisation de retenues plus conséquentes, capables de réguler la production hydro-électrique.

La géologie (nature des roches sur lesquelles sera édifié le barrage, agrégats extraits sur place) et la topographie (largeur de la vallée), commande le type de barrage utilisé.

On distingue :

Les barrages poids

Un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple (leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangle)

Les barrages voûtes

La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à double courbure). La technique de barrage-voûte nécessite une vallée plutôt étroite (même si des barrages-voûtes ont été parfois construits dans des vallées assez larges, poussant cette technologie à ses limites) et un bon rocher de fondation

Les barrages à contrefort ou multivoûtes

Lorsque les appuis sont trop distants, ou lorsque le matériau local est tellement compact qu'une extraction s'avère presque impossible, la technique du barrage à contreforts permet de réaliser un barrage à grande économie de matériaux.

Le mur plat ou multivoûtes en béton s'appuie sur des contreforts en béton armé encastrés dans la fondation, qui reportent la poussée de l'eau sur les fondations inférieures et sur les rives

Les barrages remblais

On appelle barrages en remblais tous les barrages constitués d'un matériau meuble, qu'il soit très fin ou très grossier (enrochements). Cette famille regroupe plusieurs catégories, très différentes. Les différences proviennent des types de matériaux utilisés, et de la méthode employée pour assurer l'étanchéité.

Les analyses effectuées au chapitre 3 et 4 nous ont conduit à faire le choix d'un barrage remblais. Nous allons ériger une digue en enrochement à masque amont en béton de longueur 195.5 m et de 5 m de hauteur à la cote 60m par rapport au niveau de la mer. Le niveau normal d'exploitation (NNE) du barrage se trouve à la cote 62m par rapport au niveau de la mer.

5.1.1 Étanchéité de l'ouvrage

Un barrage étant un ouvrage destiné à retenir de l'eau, l'étanchéité est d'une grande importance. Ainsi, il nous faut traiter cette question avec beaucoup de prudence. On distingue l'étanchéité du corps du remblai et l'étanchéité de la fondation.

5.1.1.1 Étanchéité du corps du remblai

L'étanchéité du corps du barrage est d'abord apportée par la valeur faible de perméabilité k du matériau constitutif du remblai. Nous avons fait le choix d'un barrage remblais en enrochement avec masque amont en béton. Donc l'étanchéité sera assurée par le masque amont en béton. Ainsi l'amont du barrage en béton sera donc protégé.

5.1.1.2 Étanchéité de la fondation

La zone d'assise du barrage devra être décapée d'au moins 0.50 mètre pour éliminer la terre végétale. Les caractéristiques mécaniques des matériaux meubles de la fondation (alluvions, colluvions, éluvions) sont souvent suffisantes pour supporter un remblai d'une hauteur supérieure à une vingtaine de mètres. Une étude approfondie doit être entreprise pour une hauteur de remblai supérieure à une vingtaine de mètres. Lorsque la fondation pose un problème de stabilité, la solution consiste, soit à purger, soit à élargir sensiblement la base du remblai. Il est un peu courant de mettre un dispositif de drainage destiné à accélérer la consolidation de la fondation meuble. La nature des matériaux à l'interface remblai-fondation peut nécessiter la mise en place d'un filtre.

Le tassement d'une fondation meuble due au poids du remblai est évalué à l'aide des essais de compressibilité. Après construction, il ne devrait pas excéder en général 5 % de l'épaisseur totale des couches compressibles. Des dispositifs d'étanchéité et de drainage sont à mettre en

place afin d'obtenir un débit de fuite acceptable et d'éviter tout risque de renard (érosion interne régressives) et de sous-pression à l'aval.

5.1.2 Caractéristiques du barrage

Hauteur de revanche

La revanche est la différence d'altitude entre la crête de l'ouvrage et le plan d'eau pour la situation de projet considérée. Elle est destinée à éviter que l'impact des vagues sur la crête puisse l'endommager. Les vagues sont régulièrement provoquées par le vent, et accidentellement par des chutes de blocs, des avalanches ou des laves torrentielles. Le projecteur retiendra pour la cote de la crête, la valeur la plus élevée.

Une revanche est indispensable pour les raisons suivantes :

- Surélévation du plan d'eau lors du passage de la crue maximale
- La hauteur maximale des vagues provoquées par le vent extrême considéré
- Le déferlement des vagues a la surface du parement amont
- Surélévation du plan d'eau provoqué par le vent extrême
- Supplément de sécurité (par exemple pour les vagues causées par des glissements de terre, avalanches, ruptures de glaciers, tremblements de terre)

La hauteur de revanche peut être déterminée par la formule suivante :

$$R = 0.75H_v + \frac{V^2}{2g} \quad (5.1)$$

Avec,

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

V : représente la vitesse de propagation des vagues. Cette donnée est capitale pour éviter toute submersion du barrage qui pourrait entraîner la destruction de celui-ci.

La vitesse de propagation des vagues est obtenue en utilisant la **formule de Gaillard**

$$V = 1.5 + 2H_v \quad (5.2)$$

H_v : Hauteur des vagues en m

Calcul de La hauteur des vagues en appliquant la **formule empirique de Molitor** :

$$H_v = 0.76 + 0.0032(VF)^{1/2} - 0.26F^{1/4} \quad (\text{pour } F < 30 \text{ km}) \quad (5.3)$$

Avec,

V : vitesse du vent en km/h

F : Fetch en km

Le *fetch* ou la longueur de la retenue est la distance sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle.

En considérant un fetch de 1.8 km environ et une vitesse du vent dans la région de 10 km/h environ. On trouve les résultats suivants L'équation (5.3) devient :

$$H_v = 0.76 + 0.0032(10 \times 1.8)^{1/2} - 0.26 \times 1.8^{1/4} \Rightarrow H_v = 0.47 \text{ m}$$

L'équation (5.2) devient :

$$V = 1.5 + 2 \times 0.47 \Rightarrow V = 2.44 \text{ m/s}$$

L'équation (5.1) devient :

$$R = (0.75H_v) + \frac{2.44^2}{2 \times 9.81} \Rightarrow R = 0.65 \text{ m}$$

► Protection de la crête

La crête est une zone très importante dans un barrage. Pour assurer sa protection il convient de le profiler soigneusement afin d'empêcher toute stagnation des eaux (infiltrations dans le corps du remblai) et d'éviter leur concentration. On adoptera dans ce sens un devers amont uniforme de 3 à 4 % qui permet d'évacuer des eaux de pluie vers le parement amont.

► Largeur de la crête

Elle est aussi appelée au sommet du barrage, et est généralement obtenue par les formules suivantes où H est la hauteur du barrage en mètres :

$$L_{cr} = \left(H^{\frac{1}{2}}\right) \times 1.65 \quad (5.4)$$

$$L_{cr} = \frac{1}{3} \times (H) \quad (5.5)$$

$$L_{cr} = \left(H^{\frac{1}{3}}\right) \times 3.6 - 3 \quad (5.6)$$

On utilisera la formule 5.5 : $L_{cr} = \frac{1}{3} \times (H)$ Vu que la hauteur du barrage H est petit

$$\Rightarrow L = \frac{1}{3} \times 5 \quad \Rightarrow L_{cr} = 1.67 \text{ m}$$

► Epaisseur du masque

L'épaisseur du masque en béton est généralement déterminée par la formule suivante où H est la hauteur de remblais :

$$d = 0.3 + 0.003H \quad (m) \quad (5.7)$$

$$\Rightarrow d = 0.3 + 0.003 \times 5$$

$$\Rightarrow d = 0.31 \text{ m}$$

5.1.3 Drainage du barrage

Quelque soit le dispositif d'étanchéité utilisé, un barrage en remblais et sa fondation sont le siège d'infiltration d'eau, soit structurelles (barrage homogène étanche dans sa masse), soit accidentelles (défauts d'étanchéités). La fonction du drainage est d'intercepter les débits d'infiltration afin d'éviter que leur résurgence incontrôlée à l'aval ne nuise à la stabilité de l'ouvrage. En outre, la canalisation par le drainage des débits de fuite va permettre d'en faciliter la surveillance et le contrôle. Le drain est un organe à forte perméabilité destiné à assurer l'interception des eaux d'infiltration et à les évacuer. Il faut généralement lui associer un filtre qui doit bloquer la migration potentielle des particules fines du massif à drainer vers le milieu drainant.

L'élaboration d'un dispositif de drainage est une étape importante dans la conception d'un barrage en remblai.

Dans notre cas on adoptera pour un drainage du corps aval (Voire figure D.1 annexe).

5.1.4 Les ouvrages annexes des barrages

Les ouvrages annexes des barrages sont principalement :

- les évacuateurs de crues

- les ouvrages de vidange
- les passes à poissons
- Dérivation provisoire pendant le chantier

5.1.4.1 Evacuateur de crues

Un évacuateur de crue est un organe d'évacuation à fonctionnement automatique. C'est un organe très important dans un barrage. De même qu'un barrage doit retenir les écoulements, doit aussi conserver la faculté d'évacuer les crues exceptionnelles. A noter que cette évacuation doit avoir lieu sans que la lame d'eau ne le submerge car il aurait toute chance d'être gravement endommagé ou détruit. Dans notre cas, on choisit un évacuateur de crue constitué d'un seuil libre latéral (figure D.2) mince en rive gauche, suivi d'un coursier incliné finissant dans un bassin de tranquillisation à l'aval du barrage. Aussi constitué d'un dispositif en béton armé. L'évacuateur peut être placé au centre de la digue ou sur l'une des rives. Vue la topographie du site d'implantation du barrage et la longueur du barrage, on a opté pour le choix de placer l'évacuateur au centre du barrage.

Pour le dimensionnement de l'évacuateur de crue, on va utiliser un débit de dérivation de fréquence centennial.

Le système disponible pour rejeter les crues en aval du barrage doit être capable d'évacuer la crue maximale de $235.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce dernier sera composé de deux pertuis de fond pouvant relâcher $50 \text{ m}^3/\text{s}$ chacun et d'un déversoir. Il faut noter que l'un des pertuis sera un pertuis de restitution des faibles débits et l'autre un pertuis provisoire.

► **Dimensionnement du déversoir**

On considèrera les hypothèses suivantes pour tous les calculs hydrauliques :

- Ecoulement stationnaire
- Ecoulement unidirectionnel avec :
 - Répartition uniforme des vitesses dans une section
 - Distribution hydrostatique des pressions
- Rugosité constante dans l'espace pour les parois des conduites (acier ou béton)

➤ **Calcul de la hauteur du déversoir**

Niveau des plus hautes eaux :

$$PHE = H_{bar} - R \quad (5.8)$$

Avec,

H_{bar} : Hauteur barrage (5 m)

R : Hauteur de revanche

$$PHE = 5 - 0,65 \quad \Rightarrow \quad PHE = 4.35 \text{ m}$$

➤ **Charge maximal autorisé sur l'évacuateur de crue**

$$H = PHE - NRN \quad (5.9)$$

Avec,

PHE : Niveau des plus hautes eaux (côte 64.35)

NRN : Niveau de retenue normale (2 m)

Donc,

$$H = 4.35 - 2 \quad \Rightarrow \quad H = 2.35 \text{ m}$$

➤ **Calcul de la largeur du déversoir standard**

Bernoulli nous donne en négligeant les pertes de charge :

$$V = \sqrt{2gh} \quad (5.10)$$

Soit m le coefficient de contraction de la nappe à son passage.

Le débit élémentaire de la tranche considérée vaut :

$$dQ = mL\sqrt{2gh}dh \quad \Rightarrow \quad Q = mL\sqrt{2g} \int_0^H \sqrt{h}dh$$

Comme μ est constant :

$$Q = \frac{2}{3}mLH^{3/2}\sqrt{2g}$$

Ou

$$Q = \frac{2}{3}mLH\sqrt{2gH}$$

Avec

$$\mu = \frac{2}{3}m$$

μ : Coefficient fonction de la forme et de l'épaisseur du seuil

Pour un seuil libre rectiligne le débit est donné par la formule :

$$Q = \mu L H^{3/2} \sqrt{2g}$$

$$L = \frac{Q}{\mu H^{3/2} \sqrt{2g}} \quad (5.11)$$

Avec,

$\mu = 0.42$ Pour les seuils épais et les bords arrondis

H : Charge au-dessus du seuil

L : Largeur du seuil.

La largeur du seuil rectiligne est donc obtenue par la formule suivante, Q et H étant connus
La valeur de Q après laminage est telle que :

$$Q_l = 221.293 - 100 - 2$$

$$\Rightarrow Q_l = 119.29 \text{ m}^3/\text{s}$$

On a :

$$Q_p = Q_l$$

$$\Rightarrow Q_p = 119.29 \text{ m}^3/\text{s}$$

L'équation (5.11) devient :

$$L = \frac{119.29}{0,42 \times \sqrt{2} \times 9,8 \times 2.35^{3/2}}$$

$$\Rightarrow L = 17.85 \text{ m}$$

Le déversoir sera équipé d'une vanne à segment qui permet de régler une lame déversant sur le dessus et un contrôle précis de l'eau en amont et en aval.

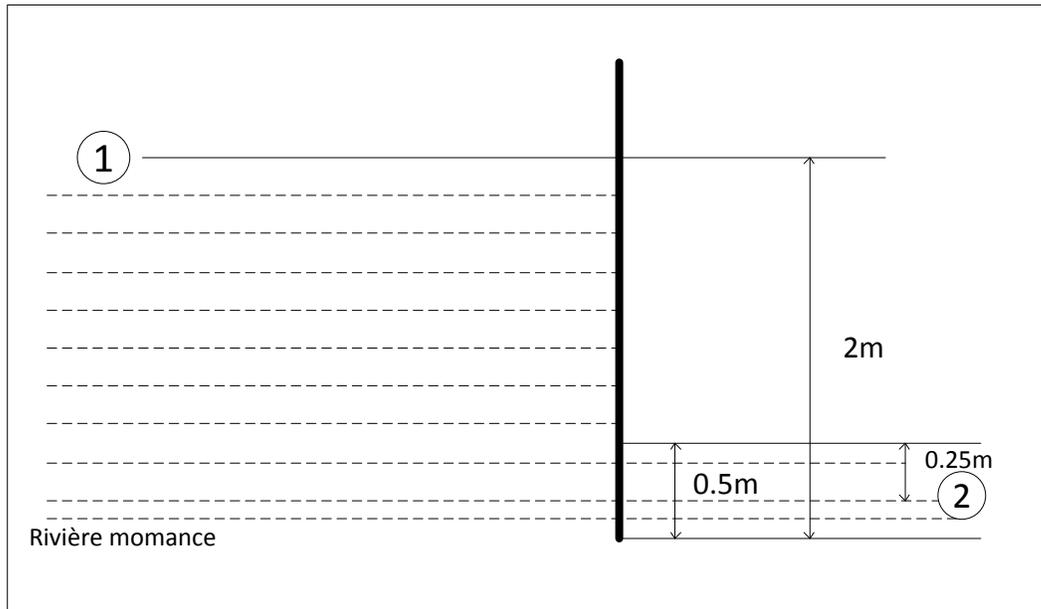
➤ Dimensionnement des pertuis

Nous avons deux(2) pertuis situés au fond de la vallée. Les deux pertuis étant identiques et pouvant évacuer un débit maximal de **50 m³/s**, nous allons effectuer les calculs de dimensionnement pour un seul pertuis. L'un est utilisé pour la vidange et la dérivation provisoire, donc sera fermé en exploitation normale tandis que l'autre est utilisé pour la restitution du débit réservé, donc en exploitation normale permettra la circulation de **0.6 m³/s**.

L'écoulement dans les pertuis de fond étant en charge, donc pour les dimensionner on doit connaître la vitesse de l'eau dans les pertuis.

Pour y parvenir, nous allons appliquer Bernoulli entre 1 et 2 et en négligeant les pertes de charge.

Figure 5.1 : Disposition des pertuis de fond



$$Z_1 + \frac{P_1}{W} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{W} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (5.12)$$

Avec $Z_1 = h_1$, $Z_2 = h_2$, $V_1 \approx 0$ et $P_1 = P_2 = P$

L'équation (5.12) devient :

$$h_1 + \frac{P}{W} = h_2 + \frac{P}{W} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\Rightarrow V_2^2 = 2g(h_1 - h_2)$$

$$\Rightarrow V_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (5.13)$$

Ceci est la vitesse théorique, en tenant compte du coefficient de débit (C_d), on trouve :

$$V_2 = C_d \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (5.14)$$

Avec $C_d = 0.8$ pour les conduites à bord épais.

$$\Rightarrow V_2 = 0.8 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times (2 - 0.25)} \Rightarrow V_2 = 4.68 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{Q}{V_2}$$

$$A = \frac{50}{4.68} \Rightarrow A = 10.68 \text{ m}^2$$

Or

$$A = l \times h$$

Avec,

l : Largeur

h : Hauteur

$$\Rightarrow l = \frac{A}{h} \Rightarrow l = \frac{10.68}{0.5} \Rightarrow l = 21.30 \text{ m}$$

5.1.4.2 Passes à poisson

Les passes à poisson sont nécessaires, car elles permettent la protection de la flore et de la faune. Pour la restitution du débit réservé on utilisera l'un des pertuis dimensionné ci-dessus, équipé d'une vanne à glissement qui permet, en fonctionnement normal, la circulation continue d'un débit de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en aval du barrage.

5.1.4.3 Ouvrage de vidange

Un ouvrage de vidange est un ouvrage permettant d'abaisser le niveau d'eau de la retenue pour rendre possible la visite et l'entretien du barrage. Il permet également d'effectuer dans certains cas des chasses pour évacuer les vases accumulées, ou d'évacuer une partie du débit pendant les crues. Dans notre cas, un des pertuis de fond sera utilisé comme ouvrage de vidange et sera équipé d'une vanne segment.

5.1.5 Installations de chantier

Les installations de chantier seront disposées dans le but de loger les différents ingénieurs et responsables de chantier pour la période de construction de l'aménagement et servira plus tard à héberger les ingénieurs et techniciens qui doivent entretenir la centrale une fois en service. Ces installations comprennent :

- des chambres à coucher
- une cuisine et salle à manger
- des toilettes
- des salles de bain
- des bureaux pour les chefs de chantier et le conducteur de travaux
- une salle de réunion
- plusieurs conteneurs mécaniques et d'outils

Des plates-formes seront aménagées et réglées afin de recevoir ces installations. Du gravillon sera déposé au sol jouant son rôle de drainant et garantissant une installation correcte et propre.

5.2 Les ouvrages hydrauliques liés à la centrale

Le départ de l'adduction est équipé de grilles destinées à éviter l'introduction de corps flottants et de matériaux solides dans le circuit d'amenée. La mise en place d'une vanne permettra de protéger et d'isoler le canal. Les conduites d'amenée, implantées en tenant compte de la stabilité des terrains, seront à écoulement libre.

On a :

- La prise d'eau
- Le bassin de décantation
- Le canal d'amenée
- La chambre de mise en charge
- La conduite forcée
- La cheminée d'équilibre

5.2.1 Prise d'eau

La prise est un ouvrage hydraulique placé à l'entrée du canal d'amenée ayant pour rôle de :

- Capturer une partie du débit du cours d'eau suivant les besoins de la centrale. Ensuite l'eau est acheminée vers le canal
- Filtrer les débris du cours d'eau

La prise d'eau dans notre centrale sera une prise d'eau latérale, rectangulaire. Notre centrale hydroélectrique est une petite centrale, nous aurons une petite prise d'eau. Donc la vitesse de l'eau au niveau de la prise ne doit pas dépasser 0.75 m/s. cette prise sera placée à la cote 62m par rapport au niveau de la mer de façon à fouiller pour le canal d'amenée en profitant de la pente qu'il y a dans cette zone.

Les grandes parties de la prise sont :

- La section d'entrée y compris le seuil et le grand support
- La vanne de la prise et la section de transition
- Le bassin de décantation et d'un canal de chasse des grains de sable

Q est le débit maximal au niveau de la prise d'eau ($2 \text{ m}^3/\text{s}$)

V est la vitesse de l'eau dans la prise est de : 0.75 m/s

$$Q = v \times S \quad \Rightarrow \quad S = \frac{Q}{v} \quad \Rightarrow \quad S = \frac{2}{0.75}$$

$$\Rightarrow \quad S = 2.66 \text{ m}^2$$

La forme de la prise d'eau est rectangulaire

$$S = l_{\text{prise}} \times h_{\text{prise}} \quad (5.15)$$

Considérant que la base de la prise d'eau représente deux (2) fois la dimension de la hauteur, donc

$$l_{\text{prise}} = 2h_{\text{prise}}$$

Ce qui implique : $S = 2h_{\text{prise}}^2$

$$\Rightarrow \quad h_{\text{prise}} = \sqrt{\frac{S}{2}}$$

$$\Rightarrow \quad h_{\text{prise}} = \sqrt{\frac{2.66}{2}} \quad \Rightarrow \quad h_{\text{prise}} = 1.15 \text{ m}$$

D'où la largeur totale de la prise :

$$l_{\text{prise}} = 2h_{\text{prise}} \quad \Rightarrow \quad l_{\text{prise}} = 2 \times 1.15 \quad \Rightarrow \quad l_{\text{prise}} = 2.30 \text{ m}$$

Notre prise d'eau sera rectangulaire de dimension 1.15 x 2.3

Concernant le type de vanne, l'utilisation d'un type ou l'autre peut rendre difficile le fonctionnement de la centrale en cas de crues puisqu'il est nécessaire, que la fermeture puisse être opérée rapidement et à distance, à partir de la centrale en cas de montée excessive du niveau dans le canal. Il va nous falloir utiliser un type de vanne ayant des organes de commande. Dans ce cas le plus approprié ce sera la commande à l'aide des servomoteurs. Donc les vannes à utiliser sont du type "fond". En raison du mode de fonctionnement le meilleur choix consiste à utiliser des vannes wagons. L'organe de commande sera automatique c'est-à-dire que la fermeture sera déclenchée automatiquement en cas de détection de niveau excessif dans le canal ou pourra être commandé à distance à partir de la centrale.

▪ Grilles et dégrilleurs

Les grilles sont des outils fabriquées à partir d'une série de barreaux de métal parallèles. Dans la prise d'eau, elles permettent de minimiser la quantité de matériaux solides et de sédiments

entrant dans l'aménagement. Ainsi, les grilles protègent les turbines. Les grilles peuvent être à plusieurs autres endroits au niveau de l'aménagement empêchant ainsi les débris de passer. Dans notre centrale, On va utiliser deux grilles qui prennent appui sur les bords inférieurs et supérieur de la prise d'eau. Les grilles sont en acier inoxydable, les barreaux sont profilés, inclinées de 25° par rapport à la vertical.

Pour le nettoyage de nos grilles, nous utiliserons des dégrilleurs comprenant des râtaux, les râtaux étant constituée d'une série de dents fixées sur un bloc de polyamide et se déplaçant le long des espaces entre les barreaux.

5.2.2 Canal d'amenée

Le canal d'amenée d'une centrale hydroélectrique est un canal aménagé qui permet d'amener l'eau vers la centrale grâce à une pente légère. Il commence immédiatement après la prise d'eau.

Le canal d'amenée de notre central va suivre l'alignement de la cote 62, cependant le fond du canal sera à la cote 60m par rapport au niveau de la mer.

▪ Calcul de la largeur du canal

$$Q = V_{canal} \times S_{canal}$$

$$S_{canal} = h(B_0 + mh) \text{ Section trapézoïdale} \quad (5.16)$$

Si on veut placer le plafond du canal à la côte 60, et que le niveau d'eau dans le canal soit le même que celui du petit réservoir créé par le barrage, cela implique que le tirant d'eau du canal soit égal a :

$$h = 62 - 60 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{h = 2 \text{ m}}$$

En considérant que la côte 62 est la côte de fonctionnement normale.

Pente de talus du canal : 1/5

Si on veut maintenir la vitesse de l'eau dans le canal a 1 m/s, alors :

$$S_{canal} = \frac{Q}{V_{canal}} = \frac{2}{2} = 1 \text{ m}^2$$

$$\text{D'où } S_{canal} = 2 \left(B_0 + \frac{1}{5} \times 2 \right) \Rightarrow 1 = 2B_0 + \frac{4}{5} \Rightarrow \mathbf{B_0 = 0.10 \text{ m}}$$

Calcul de la hauteur

$$H = h + R \text{ or } R = \frac{3}{7} \text{ (revanche)} \Rightarrow H = 2 + \frac{3}{7} \Rightarrow \mathbf{H = 2.42 \text{ m}}$$

La largeur du canal est trop petite, donc pour faciliter la maintenance du canal nous faisons le choix d'un canal de 1m, mais suivons les calculs précédents pour supporter le débit.

► **Calcul de la pente longitudinale du canal**

$$m' = \left(\frac{nV_{canal}}{R^{0.667}} \right)^2 \quad (5.17)$$

Avec,

$$R = \frac{h(B_0 + mh)}{B_0 + 2h\sqrt{1 + m^2}} \quad (5.18)$$

$$\Rightarrow R = \frac{2 \times \left(1 + \frac{1}{5} \times 2\right)}{1 + 2 \times 2 \sqrt{1 + \frac{1}{25}}} \Rightarrow R = 0.55$$

D'où, l'équation (5.17) devient :

$$m' = \left(\frac{0.015 \times 2}{0.55^{0.667}} \right)^2 = 0.002 \Rightarrow m = 2 \text{ m} / 1000 \text{ m}$$

5.2.3 Bassin de décantation

L'eau déviée dans le canal par la prise peut transporter des quantités importantes de matière en suspension (boues) et des sédiments (sable, gravier) qui doivent être éliminés, sans quoi, ils combleront le canal et endommageront rapidement les vannes et la turbine. Pour cela un bassin de décantation doit être construit en aval de la prise

Le bassin de décantation se base sur le principe de diminution de vitesse et des turbulences d'écoulement, c'est-à-dire sur une décantation de sédiment en suspension dans le bassin. La diminution est obtenue par un élargissement du canal, contrôlé par un déversoir en aval.

Pour dimensionner un bassin de décantation, le choix le plus simple consiste à prendre la largeur du dessableur comprise entre 5 à 15 fois la largeur du canal. A noter que le dessableur est un bassin plus large que le canal, qui permet de ralentir l'écoulement et ainsi laisser les particules

solides s'y déposer. En général, une grille fine est disposée en fin de dessableur pour filtrer les dernières particules.

La largeur du dessableur est donnée par la formule suivante :

$$l_{\text{dessableur}} = 8 \times 0.33 \quad \Rightarrow \quad l_{\text{dessableur}} = 2.64 \text{ m}$$

Calcul de la longueur du dessableur :

$$L_{\text{dessableur}} = \frac{Q}{l_{\text{dessableur}} \times V_{\text{vertical}}} \quad (5.19)$$

Suivant les spécifications du fabricant de la turbine qu'on va utiliser, la dimension des particules permises est de 0.5 mm pour une vitesse verticale de 0.1 m/s

D'où :

$$L_{\text{dessableur}} = \frac{2}{2.64 \times 0.1} \quad \Rightarrow \quad L_{\text{dessableur}} = 7.57 \text{ m}$$

5.2.4 Chambre de mise en charge

C'est un petit bassin qui permet de garantir que la conduite forcée est en tout temps en eau. Elle fonctionne comme tampon entre la prise d'eau et la conduite. Elle est d'une grande importance. Il permet de créer une zone où l'on peut stocker de l'eau ce qui permet d'augmenter la hauteur d'eau (la charge) et une zone de "décompression" lors d'une fermeture brusque d'une vanne à la centrale (lors de problèmes) ce qui entraînerait une variation brusque du niveau d'eau.

5.2.5 Conduite forcée

Une conduite forcée est une conduite hydraulique, c'est-à-dire un assemblage de tuyaux, transportant de l'eau sous pression jusqu'à une centrale hydroélectrique située en aval et en contrebas du réservoir qui l'alimente. En son sommet, elle est munie d'une ou plusieurs cheminées d'équilibre pour prévenir les coups de bélier dus aux brusques variations du flux d'eau lors de l'ouverture et de la fermeture des vannes des turbines de la centrale.

L'acheminement de l'eau en direction de la centrale à partir de la prise peut paraître simple. Toutefois, le choix de l'agencement le plus économique pour une conduite forcée n'est pas une tâche facile. Les conduites forcées peuvent être apparentes ou enterrées, en fonction de facteurs comme la nature du sol lui-même, le matériau pour la conduite forcée, les températures ambiantes et les contraintes environnementales.

On parle aussi de supports dans l'acheminement de l'eau à la centrale. Les supports sont utilisés pour soutenir les conduites forcées. On y distingue deux types : les **anchor** placés avant l'entrée du bâtiment et lorsque les conduites changent de direction ; les **slide blocks** sur lesquels reposent les poids de l'eau et des conduites forcées.

Maintenant il est nécessaire de déterminer le nombre d'unités de la centrale. Normalement, il est plus rentable d'avoir un nombre minimal d'unités dans une installation donnée. Cependant, le choix de plusieurs unités peut être nécessaire pour rendre plus efficace l'utilisation de l'eau dans le cas où la variation de débit est grande. Des facteurs tels que l'espace limité par des caractéristiques géologiques ou de la structure existante peut dicter le nombre d'unités plus ou moins. Les difficultés à transporter de grandes conduites forcées et les accessoires imposent la nécessité de diminuer leur taille. Les plus grandes unités nécessitent la construction sur le terrain tout en utilisant une technique de fabrication avec un soin particulier. Les conduites peuvent être divisées en deux pièces, entièrement usinées dans l'usine et boulonnés ensemble sur le site. Ceci est également coûteux, et la plupart des utilisateurs évite cette méthode parce que l'intégrité de la conduite ne peut pas être assurée.

Après une analyse des différents facteurs à prendre en compte pour le choix du type de conduite forcée : la pression, les joints, le diamètre, les pertes de charge, le poids, l'accessibilité au site, le terrain, le type de sol, la durée de vie, la maintenance, le transport, le cout, etc., nous avons décidé d'utiliser de façon optimale deux conduites en acier.

Si on utilise une conduite forcée avec un débit de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, transportant l'eau à la vitesse de 5 m/s , alors le diamètre nécessaire de la conduite sera :

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

$$\Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \times 2}{5\pi}} \Rightarrow d = 0.71 \text{ m}$$

Cependant, par mesure de sécurité nous allons opter pour deux conduites forcées transportant chacun la moitié du débit (soit $1 \text{ m}^3/\text{s}$). Ce choix permet de garantir le fonctionnement de la centrale si l'une des unités aurait un problème

-Avec deux conduites forcées identiques transportant chacune la moitié du débit maximal avec la même vitesse de 5 m/s , le diamètre des conduites sera :

$$d_n = \frac{d}{\sqrt{n}}$$

n étant le nombre de conduites forcées

$$d_n = \frac{0.71}{\sqrt{2}} \Rightarrow d_n = 0.50 \text{ m}$$

Parlons de l'épaisseur de la paroi des conduites forcées. L'épaisseur de paroi exigée dépend du matériau de la conduite, de sa résistance maximale à la traction, et de sa limite élastique, de son diamètre et de la pression d'exploitation. Dans les écoulements permanents (débit supposé

constant dans le temps), la pression à un point quelconque le long de la conduite forcée est équivalente à la charge d'eau au-dessus de ce point (diminuée des pertes de charge jusqu'à ce point). L'épaisseur de paroi est dans ce cas calculée par l'équation :

$$e = \frac{P_1 \times D}{2\sigma_f k_f} + e_s \quad (5.20)$$

Où,

P_1 : Pression hydrostatique en N/mm²

D : Diamètre interne de la conduite en m

σ_f : Contrainte admissible en N/mm²

k_f : 0.9 pour soudures inspectées au rayon X

e_s : Épaisseur supplémentaire pour prendre en compte la corrosion (1 cm)

Si la variation de la vitesse dans la conduite survient dans un temps supérieur à dix (10) fois le temps critique T, une très légère surpression, voire aucune, ne sera générée et le phénomène pourra être ignoré. En dessous de cette valeur, si $T > 2L/c$, la surpression P_s sera en partie contrée par l'onde de pression négative revenant dans l'organe réglant. Dans ce cas, la formule d'Allevi permet d'estimer la surpression maximum :

$$\Delta P = P_0 \left(\frac{N}{2} \pm \sqrt{\frac{N^2}{4} + N} \right) \quad (5.21)$$

Où P_0 est la pression hydrostatique due à la chute :

$$N = \left(\frac{LV_0}{gP_0 t} \right)^2 \quad (5.22)$$

Où,

V_0 : vitesse de l'eau en m/s

L : Longueur de conduite forcée totale [m]

P_0 : Chute brute [m]

t : Temps de fermeture (1.5 s)

La pression totale vue par la conduite forcée est :

$$P = P_0 + \Delta P \quad (5.23)$$

Vérifions si $T > 2L/c$

$$c = \sqrt{\frac{k/\rho}{1 + \frac{kD}{Et}}} \quad (5.24)$$

Avec,

k : Module de compressibilité de l'eau $2.1 \times 10^9 N/m^2$

E : Module d'élasticité du matériau de conduite (acier) $2.1 \times 10^{11} N/m^2$

D : Diamètre de la conduite (mm)

t : Épaisseur de paroi (mm)

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

$$\Rightarrow c = \sqrt{\frac{2.1 \times 10^9 / 1000}{1 + \frac{2.1 \times 10^9 \times 500}{2.1 \times 10^{11} \times 10}}} \Rightarrow c = 1448.77 \text{ m/s}$$

Donc $2L/c = 0.186$, donc $2L/c < t < 10 \times (2L/c) = 1.86$

La durée de fermeture étant plus grande que la durée critique (0.186 s) mais plus courte que dix fois sa valeur, on peut donc utiliser la formule d'Allievi :

$$N = \left(\frac{90 \times 5}{9.81 \times 17 \times 5} \right)^2$$

$$\Rightarrow N = 0.29$$

D'où

$$\Delta P = 17 \times \left(\frac{0.29}{2} \pm \sqrt{\frac{0.29^2}{4} + 0.29} \right)$$

$$\Delta P = +11.73 \text{ m}; +6.97 \text{ m}$$

La pression maximale dans la conduite serait : $17 + 11.73 = 28.73 \text{ m}$ ou 0.28 N/mm^2 (1 m d'eau $\equiv 9.807 \text{ kN/m}^2$)

D'où

$$e = \frac{0.28 \times 0.5}{2 \times 140 \times 0.9} + 0.01$$

$$e = 0.01055 \text{ m ou } 10.55 \text{ mm}$$

► **Pertes de charge dans les conduites forcées**

On utilise la formule suivante :

$$h_f = \frac{0.08fLQ^2}{d^2} \quad (5.23)$$

(Pertes de charge au niveau des parois)

En consultant la charte de Moody, on trouve : $k = 0.01$

$$\frac{k}{d} = \frac{0.01}{500} = 0.02 \times 10^{-3}$$

$$1.2 \frac{Q}{d} = 1.2 \times \frac{2}{0.5} = 2$$

$$f = 0.007$$

L'équation (5.23) devient :

$$h_f = \frac{0.08 \times 0.007 \times 90 \times 1^2}{0.5^2}$$

$$h_f = 0.20$$

► **Pertes de charges dans les turbines**

$$h_{turbine} = \frac{V^2}{2g} (K_{entrance} + K_{bend} + K_{contraction} + K_{valve}) \quad (5.24)$$

(Pertes dues aux turbulences)

Les valeurs des coefficients $K_{entrance}$, K_{bend} , $K_{contraction}$ et K_{valve} sont déterminées à partir du Tableau D.3.

$$h_{turbine} = \frac{5^2}{2 \times 9.81} (0.5 + 0.3 + 0 + 0.25)$$

$$h_{turbine} = 1.33 \text{ m}$$

Donc, les pertes de charge sont :

$$h_{totales} = h_{turbine} + h_1 = 1.33 + 0.201$$

$$h_{totales} = 1.53 \text{ m}$$

La hauteur de chute nette :

$$h_{nette} = h_{brute} - h_{totales} \quad (5.25)$$

$$\Rightarrow h_{nette} = 17 - 1.531 \quad \Rightarrow h_{nette} = 15.47 \text{ m}$$

5.2.6 Cheminée d'équilibre

La cheminée d'équilibre peut être considérée comme un grand tube connecté au niveau de sa base à la conduite forcée et ouvert à l'atmosphère. L'action fondamentale d'une cheminée d'équilibre est de réduire la longueur de la colonne d'eau en plaçant une surface d'eau libre plus proche de la turbine. Nous utiliserons ce dispositif (cheminée d'équilibre) dans notre projet puisque la longueur de conduite est supérieure à 5 fois la dénivellation, l'aménagement est susceptible de générer des coups de bélier

5.2.7 Bâtiment de la centrale

La centrale aura une dimension de 6m de longueur, 4m de largeur et 12m de hauteur, elle sera construite entièrement en béton armé. L'accès à la salle des machines se fait par un escalier et une ouverture au plafond de 1m20 × 1m50 pour permettre le passage des équipements lourds.

5.3 Turbine

5.3.1 Introduction

Une turbine est une machine hydraulique tournante équipée de pales qui transforme l'énergie de l'eau en énergie mécanique. La machine hydraulique constitue un élément essentiel de la réalisation d'une mini centrale hydroélectrique, c'est l'élément clé qui doit intégrer les contraintes topographiques, hydrologiques, géologiques, géotechniques, environnementales, et électriques.

C'est aussi l'élément qui conditionne les dimensions et les coûts des ouvrages de génie civil et des matériels électromécaniques. La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables. L'équipement est caractérisé par sa grande robustesse, sa fiabilité et sa longue durée de vie. L'entretien de l'installation est simple et les frais de fonctionnement sont réduits (quelques pourcents de l'investissement). Il s'agit d'une énergie qui ne génère directement aucune émission nocive significative et en particulier pas de gaz à effets de serre. Il s'agit de pour cela de bien dimensionner les différents équipements électromécaniques en particulier la turbine qu'on aura à dimensionner tout au long de notre travail afin d'exploiter au mieux notre centrale hydroélectrique.

5.3.2 Historique de la turbine hydraulique

Les roues hydrauliques étaient connues des Romains, qui les utilisaient dans les moulins à grain. Elles ont animé pendant longtemps les moulins à céréales mais aussi des installations artisanales ou industrielles. Héritières des antiques moulins à aubes, les turbines hydrauliques apparurent au cours du dix-neuvième siècle. La première réalisation de turbine hydraulique est due à Benoît Fourneyron, un français, en 1827, elle est le perfectionnement des roues hydrauliques qui existaient depuis plusieurs siècles ; c'est une turbine à réaction. L'invention de la turbine hydraulique puis de la dynamo et enfin de l'alternateur ont ouvert une voie importante vers l'hydroélectricité qui constitue la source d'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde. Les noms de certains scientifiques que nous aurons à développer tout le long de notre enchaînement sont rattachés aux principales découvertes techniques. Elles permettent aujourd'hui d'obtenir des puissances unitaires très élevées, de l'ordre de 200 MW pour certaines machines hydrauliques et qui pourrait atteindre 500 000 MW avec d'autres dépendamment des conditions d'exploitations ; ainsi que des rendements énergétiques dépassant 90%. Les premières turbines de haute chute, fonctionnant sous 200 m de hauteur d'eau, furent installées, en 1869, près de Lancey, dans le Dauphiné, par l'ingénieur Aristide Bergès. Actuellement les turbines hydrauliques utilisent des chutes allant de quelques mètres comme les centrales marémotrices jusqu'à 2000m

5.3.3 Principe de fonctionnement et caractéristiques générales de la turbine

Une turbine est un dispositif muni d'ailettes, de pales ou d'aubes (dont l'ensemble s'appelle aubage), auquel un fluide imprime un mouvement de rotation transmis à un mécanisme par l'intermédiaire d'un arbre placé au centre du dispositif. Par extension, on appelle turbine un ensemble formé des appareils injecteurs ou compresseurs, de la chambre de combustion et de la turbine proprement dite, ensemble dit aussi turbomoteur. Une installation hydroélectrique est une installation qui transforme l'énergie hydraulique de l'eau en énergie mécanique par

l'intermédiaire d'une roue dite « turbine ». Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique à l'aide d'une génératrice (dynamo ou alternateur). Une turbine est constituée d'une partie fixe, le distributeur ou stator, et d'une partie mobile, le rotor. Le stator peut être constitué d'un ou plusieurs injecteurs comme dans la turbine Pelton, ou comporter, comme le rotor, des aubages disposés de telle sorte que la conversion de l'énergie de l'eau en énergie mécanique de rotation s'effectue suivant les principes d'action, de réaction, ou résulte de la combinaison des deux. Ces différents modes de fonctionnement sont obtenus à partir de la forme et de la disposition du stator et du rotor, et par des profils d'aubes adaptés.

5.3.4 Présentation des différentes classes de turbines

Dépendamment des conditions d'exploitations d'une centrale hydroélectrique, il en existe plusieurs types de turbines qui sont susceptibles d'être utilisées et qui appartiennent à deux variétés de classes qui sont :

- 1) **Les turbines à action** : ce sont les turbines dont la pression à la sortie du distributeur et la pression à la sortie de la roue sont identiques et égales à la pression atmosphérique, où seule l'énergie cinétique est transformée en énergie mécanique. ce sont principalement les turbines dite PELTON et les turbines CROSS FLOW ou BANKI.
- 2) **Les turbines à réaction**: ce sont les turbines de types dont la pression d'entrée est supérieure à la pression de sortie, les turbines appartenant à cette classe se voient une partie de leur énergie cinétique et une partie de l'énergie de pression transformée en énergie mécanique . L'énergie cinétique restante ainsi que l'énergie potentielle peuvent être en partie récupérées au moyen d'un aspirateur, on retrouve dans cette classe les turbines dites FRANCIS dite radiale, les turbines KAPLAN ou à hélice dite axiale et les pompes turbines.

5.3.5 Critère de choix des turbines

En général, le choix du type de turbine dépend principalement du débit, de la hauteur de chute et de la vitesse de rotation de l'arbre. De plus, pour les installations où le débit est suffisamment constant tout au long de l'année, il est également possible d'utiliser des groupes turbopompes, ce système permettant de stocker une grande quantité d'énergie potentielle en amont de l'installation en heures creuses et de la restituer aux heures de forte consommation. En effet, Depuis la roue à aubes entraînant un moulin, les machines hydrauliques ont subi une évolution technique considérable. Il existe actuellement plusieurs types de turbines, et pour chaque type, une large plage de caractéristiques. Il est donc important pour l'ingénieur s'occupant de l'acquisition d'une turbine, de posséder un certain nombre de connaissances au sujet de ces machines, de leur implantation et de leur fonctionnement. Il est à noter aussi que le choix du type de turbine et de ses caractéristiques, taille, vitesse de rotation et aspiration dépend du débit et de la hauteur de chute sur le site de la centrale. Pour les stations hydrauliques à réaction, il dépendra principalement des débits maximum et moyen et notamment des différentes courbes de débits.

Nous allons donc étaler les caractéristiques des différents types de turbines présentées dans la section précédente afin de mieux choisir dépendamment des conditions d'exploitations

5.3.6 Turbines à action

Nous présentons d'abord les turbines à action qui sont la turbine PELTON et la turbine BANKI ou CROSS FLOW.

5.3.6.1 Principe de fonctionnement

Un jet d'eau agit sur des augets en forme de double cuillère placés à la périphérie de la roue. Ce jet exerce une force hydraulique sur l'auget en rotation, effort qui est converti en couple sur l'arbre de la turbine. La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage a lieu à pression constante, généralement la pression atmosphérique. La roue de la turbine est dénoyée et tourne dans l'air.

5.3.6.2 Turbine PELTON

La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur. Les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue. La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min, ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique.

Ses principales caractéristiques sont les suivantes:

- 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.

5.3.6.3 Turbine CROSS FLOW ou BANKI

La turbine Cross flow, appelé aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales :

- 1) Un injecteur de section rectangulaire et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilé rotative, similaire à une vanne papillon.

- 2) Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilée.
- 3) Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

Cette turbine est un compromis entre la turbine Pelton (turbine à action) et la turbine Francis pour sa possibilité de fonctionner en charge à Laval, elle est majoritairement utilisée pour les raisons suivantes:

- Adaptée aux chutes moyennes (150 -1 m).
- Puissance jusqu'à 2000kW 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

5.3.7 Turbines à réaction

5.3.7.1 Principe de fonctionnement

Une turbine à réaction est une machine complètement immergée dans l'eau et mise en rotation par effet tourbillon au moyen d'une bêche en forme de spirale et des aubages directeurs fixes ou mobiles. Les aubages de la turbine sont profilés de manière à donner aux filets d'eau une direction parallèle à l'axe de rotation à la sortie de la turbine. C'est à la fois l'énergie cinétique de l'eau et la différence de pression entre l'intrados et l'extrados des aubages qui génère le couple, contrairement aux turbines à action pour lesquelles seule l'énergie cinétique de l'eau est impliquée.

5.3.7.2 Turbine FRANCIS

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l/s et 6000 l/s). Elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10m à 100m. Elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min).

On a les caractéristiques suivantes :

- 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

5.3.7.3 Turbine KAPLAN

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants de l'ordre de 300 l/s à 15000 l/s. Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible. La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement de la turbine.

- 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

On a fini avec la présentation des différents types de turbines avec leurs avantages et désavantages, il convient donc d'en choisir une des différents types adaptés à notre situation qui est évidemment la conception d'un mini central hydroélectrique sur la **rivière Momance**.

En effet nous allons présenter les différentes caractéristiques de notre mini central ayant rapport avec le débit d'équipement, la hauteur de chute, la vitesse spécifiques afin de mieux orienter notre choix.

De part notre souci de concevoir une mini centrale hydroélectrique sur la **rivière Momance**, se situant dans la plaine de Léogâne ; évidemment avec une hauteur de chute basse et aussi d'en limiter les coûts d'installation on va devoir trancher afin de conserver les avantages pour de meilleures conditions.

En effet les turbines à réaction comme les turbines FRANCIS et KAPLAN que nous venons de présenter ne sont pas choisies en raison de leurs adaptations aux chutes élevées pour la turbine Francis et aux débits élevés pour la turbine Kaplan et de plus dans le souci de concevoir une centrale hydroélectrique avec une puissance moindre que deux (2) MW, ces types de turbines nous paraît pas être les mieux appropriées, pour la turbine à réaction de type KAPLAN elle est

plus adaptées aux chutes élevées et le dernier restant qui n'est autre que le type CROSS FLOW ou BANKI nous paraît le mieux adaptée en raison de sa conception pour les mini centrales de basses chutes avec un débit très petit. Ainsi avec souci de conception d'une mini centrale avec un barrage au fil de l'eau et aussi ses différents avantages comme son cout, sa simplicité, et les nombreux autres avantages évoqués dans la présentation de ce type de turbine font d'elle le choix le plus approprié.

Nous présentons dans la Figure 5.2 les différentes considérations que nous venons de faire à propos des différents types de turbines afin de mieux justifier le choix du type de turbine que nous venons de faire.

Ainsi, à partir de la Figure 5.2 présentant les critères de choix des différents types de turbines nous déduisons le graphe qui nous intéresse le plus à savoir celle présentant exclusivement la marge d'utilisation des turbines **Banki** ou **CROSS FLOW** dans la figure 5.3.

Figure 5.2 : Diagramme de choix des types de mini-Turbine

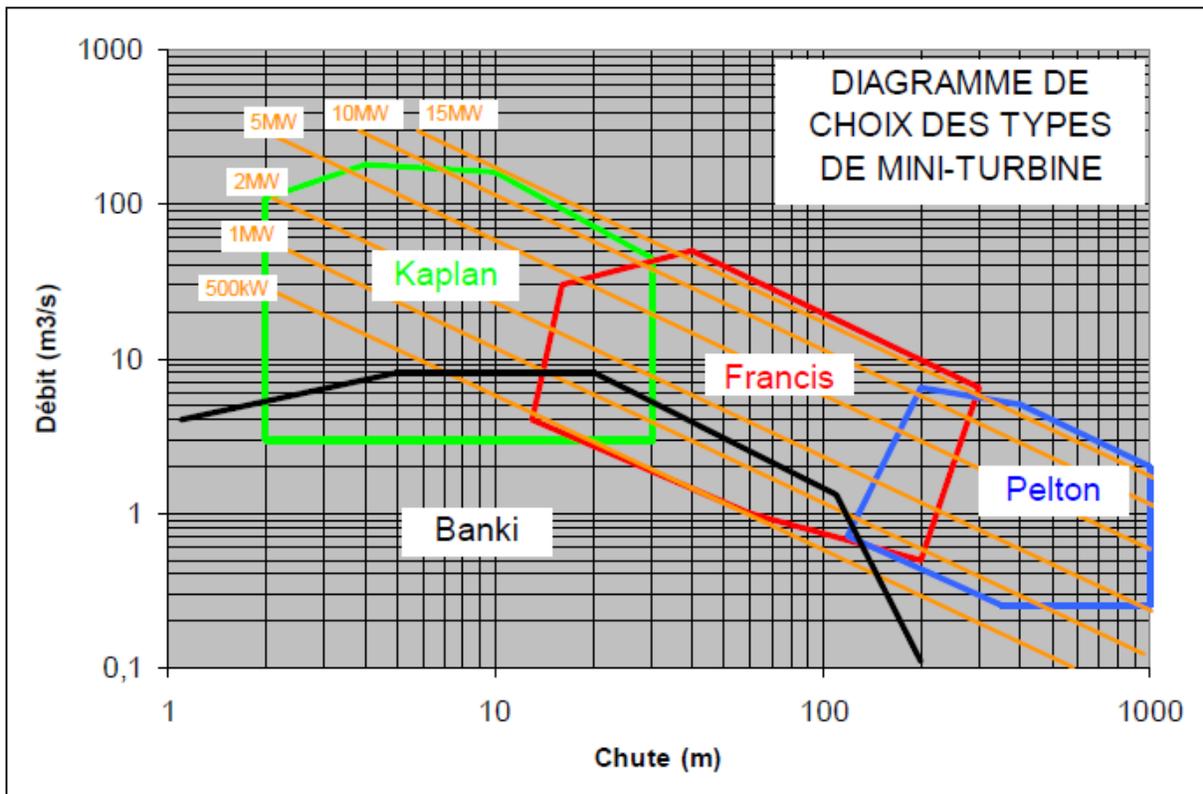
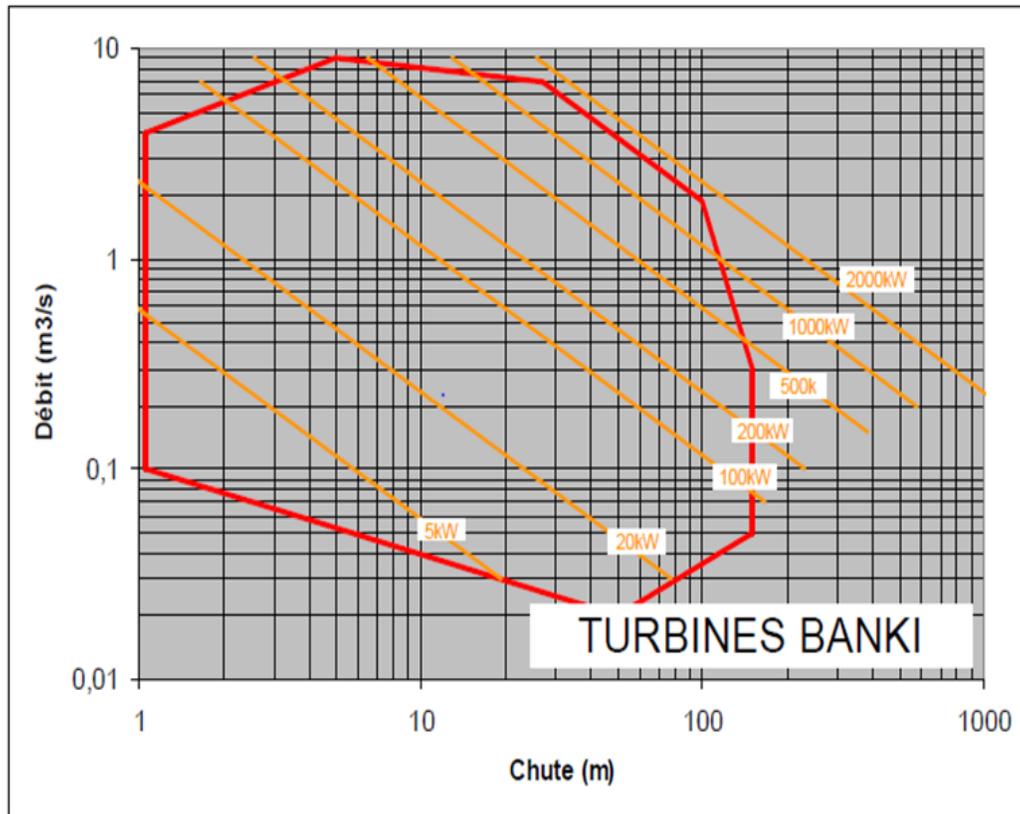


Figure 5.3: Turbines BANKI



5.3.8 Dimensionnement théorique des turbines

Ainsi dans le tableau ci dessous nous présentons les différentes caractéristiques du type de turbine que nous aurons à utiliser dans le cadre de notre projet. Les grandeurs ainsi présentées ont été choisies ou calculées sur des bases dites d'une part économiques pour la viabilité de notre projet et d'autre part plus ou moins conformes aux principes de conception des mini centrales.

5.3.9 Choix du nombre de groupe

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 notre centrale.

Ayant analysé les conditions d'exploitations telles la sécurité de notre centrale, la puissance pas très élevée que nous aurons à fournir d'une part et le point de vue économique, nous sommes dans l'obligation de trouver un équilibre satisfaisant et du point de vue économique afin de rendre viable notre projet et d'autre part de maintenir une certaine sécurité. En effet nous avons décidé de fractionner notre puissance en deux groupes, pourquoi? Disons que choisir d'utiliser deux groupes est meilleur que d'utiliser une seule groupe, en effet prenons le cas où l'on aura à faire des travaux de maintenance dans notre centrale on doit toujours éviter que la centrale soit à l'arrêt alors qu'il n'y a pas de manque d'eau ce serait alors une perte énorme en économie via les revenus que la vente d'électricité durant cette période pourrait rapporter économiquement, et d'autre part supprimer un apport considérable d'énergie durant cette période de maintenance alors que la production totale ne couvre même pas la totalité des demandes. Aussi l'on ne pourra pas aussi aller au delà de deux groupes vu que notre gamme de puissance est très petite et ainsi notre souci de rendre viable notre projet. il y aura deux groupes donc deux turbines et normalement deux conduites forcées et chacune d'entre ces deux groupes transportera la moitié de la puissance totale.

5.3.10 calculs de la puissance disponible ainsi que la puissance mécanique

La puissance hydraulique à disposition des turbines est donnée par :

$$P_h = \rho g Q H \quad (5.26)$$

Où

ρ : masse volumique de l'eau [kg/m³]
 Q : débit [m³/s]
 g : accélération de la pesanteur [m/s²]
 H : chute nette [m]

Donc avec une chute nette constante de 15.47 m et un débit d'équipement de l'ordre de 2 m³/s on peut aisément déterminer la puissance hydraulique disponible du site ainsi:

$$P_h = 1000 \times 9.8 \times 2 \times 15.47 \Rightarrow P_h = 303.19 \text{ KW}$$

5.3.11 Puissance mécanique

Elle est donnée par la relation suivante:

$$P_{méc} = P_h \cdot \eta \quad (5.27)$$

Avec,

P_h : Puissance hydraulique

η : Rendement de la turbine (fixé à 82% pour les turbines cross flow)

Il vient donc:

$$P_{méc} = 303.19 \times 0.82 \Rightarrow P_{méc} = 248.61 \text{KW}$$

Avec deux groupes disponibles pour transporter notre puissance nous pouvons alors déterminer la puissance de chaque groupe. Étant donné que chaque groupe aura à transporter la moitié de la puissance totale il vient donc:

$$P_1 = 248.61/2 = 124.3 \text{KW}$$

p_1 : Puissance mécanique de chaque groupe

Ainsi le dimensionnement des turbines que nous aurons à commander auront une puissance hydraulique unitaire de 160 kW

5.3.12 Dimensionnement de la turbine

- 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. Il faut noter que 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.

5.3.13 Vitesse de rotation des turbines

Afin de mieux dimensionner les équipements électromécaniques de notre centrale nous sommes appelés à déterminer la vitesse de rotation de notre turbine qui sera aussi celle de notre alternateur afin de limiter les effets de cavitation on a, en effet d'après les différents documents et publications relatives au type de turbine choisie qui est la turbine cross flow connu aussi sous bien nombres d'autres appellations comme BANKI MITCHELL ou encore JLA KIT, la vitesse de rotation varie entre 50 tours/min à 1000 tours/minute environ mais parfois il est souvent

conseille de prendre les deux tiers de la vitesse de rotation maximale qui est de l'ordre de 1000 tours/min dans notre cas, ainsi notre vitesse de rotation a été prise égale à 600 tours/min soit un peu moins que les deux tiers conseille. Il est aussi bon de rappeler que la vitesse de rotation plus basse évite les effets de cavitations telle a été toujours notre souci dans le cadre de cette démarche.

La vitesse de rotation étant connu nous pouvons déterminer aisément la vitesse spécifique de la turbine :

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}} \Rightarrow \quad (5.28)$$

$$n_s = \frac{600\sqrt{1}}{(9.8 \times 15.46)^{3/4}} = \mathbf{13.89 \text{ tr/min}}$$

Ns : vitesse spécifique (tr/min)

N : vitesse de rotation (tr/min)

P : puissance (CV)

H: hauteur brute en m

H : hauteur de chute brute (m)

► **Calcul du diamètre et la largeur de la roue de la turbine**

Pour une turbine cross flow on a la relation suivante qui lie son diamètre à son roue

$$Q = 0.25\alpha \times \frac{D \cdot B}{2} \sqrt{\times 2gh} \quad (5.29)$$

D: diamètre de la roue en mètres (m)

B: Largeur de la roue en mètres (m)

α : angle d'injection en rad ($\pi/2$ à $2\pi/3$) selon les constructeurs

Q: débit en m^3/s

g: accélération en m/s

h : hauteur en m

En prenant $\alpha = 2\pi/3$ on a donc

$$1 = 0.25 \times \frac{2\pi}{3} \times \frac{D \cdot B}{2} \sqrt{2 \times 9.8 \times 15.47}$$

$$1 = 0.523 * \frac{D \cdot B}{2} * 17.4$$

Il vient donc : $D \cdot B = 0.22$

Or $\omega = 0.45 \sqrt{\times 2gh} \frac{2}{D}$ avec $\omega = \frac{\pi N}{30}$

ω : En rad/s et N : en tr/min (vitesse de rotation)

Il vient donc alors:

$$D_{turbine} = 38 \frac{\sqrt{H}}{N} = 38 \frac{\sqrt{15.47}}{600} \Rightarrow D_{turbine} = 0.25m$$

Par la suite on peut calculer facilement la valeur de la largeur de la roue

On a:

$$B = \frac{0.22}{0.249} \Rightarrow B = 0.88m$$

Ainsi, on en déduit les caractéristiques des turbines CROSS FLOW à utiliser :

Type de turbine	CROSS FLOW
Débit maximum	1 m³/s
Hauteur nette	15.4m
Rendement turbine	82%
Puissance mécanique	160 KW
Nombre d'aubages	6
Diamètre Turbine D_{turbine}	0.25 m
La largeur de la roue B	0.88 m
Vitesse de rotation	600 tr/min
Vitesse d'emballent	1.8×600=1080 tr/min

5.4 La transmission

La Transmission est le système qui permet de communiquer au générateur les mouvements de la turbine. Lorsque la turbine et le générateur fonctionnent à la même vitesse et peuvent être placés de sorte que leurs arbres soient alignés, un accouplement direct constitue la meilleure solution puisqu'elle permet d'éviter les pertes mécaniques dues au multiplicateur de vitesse et de réduire la maintenance en évitant un système de transmission généralement par courroies ou par engrenages. La multiplication par engrenages sous carter est utilisée pour des turbines de 100 kW environ jusqu'à plusieurs MW.

Les multiplicateurs de vitesse à engrenages, malgré un rendement élevé, produisent de la chaleur et peuvent avoir besoin de dispositifs de refroidissement par eau ou air. Ils disposent souvent aussi de systèmes de circulation d'huile de lubrification des dentures et paliers, ainsi que des contrôles de température, de pression, de débit d'huile. La multiplication de vitesse de la turbine n'est pas, du moins théoriquement, la seule solution pour régler le problème des basses vitesses de certaines turbines. On a pensé, de façon moins classique et plus récente, à produire avec la turbine un courant de fréquence relativement basse.

Avec des turbines d'une puissance mécanique de plus de 100 w la transmission se fera par engrenages

► **Calcul des engrenages**

Les cylindres primitifs étant toujours tangents et le glissement impossible, on a :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (5.30)$$

N_1 et N_2 : vitesse de rotation respective de la turbine et de l'alternateur

d_1 et d_2 : diamètre des dents des engrenages des arbres d'entrées et sorties

Z_1 et Z_2 : longueur des dents des engrenages des arbres d'entrées et sorties

Les différents éléments constituant la denture sont liés par :

$$\begin{aligned} d_1 &= m_t \cdot Z_1 \\ m_n &= m_t \cdot \cos \beta \end{aligned} \quad (5.31)$$

Où m_t désigne le module apparent et m_n le module réel. Pour les engrenages à axes parallèles, Z_1 est le nombre de dent. La valeur normale de l'angle est 20° et le nombre de dents minimal pour l'engrènement est $Z_1=12$ dents. Avec une turbine de diamètre $d_1=D_{\text{turbine}}=0.249\text{m}$,

On a donc :

$$m_t = \frac{D_{\text{turbine}}}{Z_1} = \frac{0.249}{12} = 0.021 \quad (5.32)$$

Ensuite il vient $m_n = 0.021 \cdot \cos 20^\circ = 0.19\text{m}$

La condition de sécurité s'écrit de la façon suivante :

$$m_n \geq \sqrt[3]{\frac{11M_t}{kzR_p}} \quad (5.33)$$

Avec $k=9$ suivant les constructeurs en mécanique et $R_p = 8\text{kg/mm}^2 \Leftrightarrow 80 \cdot 10^6 \text{N/m}^2$ pour

l'acier mi-dur, et aussi on a : $M_t = \frac{P_{\text{mec}}}{\omega} = \frac{P_{\text{mec}}}{\frac{\pi N}{30}} = \frac{160 \times 10^3}{\frac{\pi \times 600}{30}} = 2547.77 \text{N.m}$

La relation 5.33 devient

$$m_n = 0.19 \geq \sqrt[3]{\frac{11 \times 2547.77}{9 \times 12 \times 80 \times 10^6}} = 0.0148$$

La condition de sécurité est donc vérifiée.

► Vérification à l'arbre

Les arbres constituent l'organe essentiel des machines motrices dont le mouvement principal est généralement un mouvement de rotation. Ils doivent avoir une bonne résistance mécanique, rigidité à la torsion et à la flexion, être équilibrés statiquement et dynamiquement pour éviter les contraintes dangereuses engendrées par les forces d'inerties aux vitesses critiques.

Les arbres de couplage de l'ensemble turbine-alternateur sont des arbres longs avec charges transversales négligeables donnant un moment fléchissant faible.

Donc on calcule l'arbre à la torsion puis on le vérifie à la déformation

► **Calcul à la torsion**

La condition de sécurité s'écrit :

$$\frac{M}{\frac{I_o}{\nu}} \leq R_{pg} \quad (5.34)$$

M_t : Moment de torsion maximal

I_o : Moment quadratique polaire

ν : module de torsion

Pour un arbre circulaire en acier mi-dur on a : $R_{pg} = 8 \text{ kg/mm}^2$, $E = 20000 \text{ kg/mm}^2$
Si on impose un diamètre en bout d'arbre ; $d = 100 \text{ mm}$ ou 0.10 m ; le moment quadratique polaire est :

$$I_o = \frac{\pi D^4}{32} \quad (5.35)$$

$$I_o = \frac{\pi \times 0.1^4}{32}$$

$$I_o = 9.81 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$\nu = \frac{d}{2} = \frac{0.08}{2} \quad \Rightarrow \quad \nu = 0.04 \text{ m}$$

D'où

$$\frac{I_o}{\nu} = \frac{9.81 \times 10^{-6}}{0.04} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_o}{\nu} = 245.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Calcul du moment de torsion et du couple maximale pour une puissance d'entrée égale à 151.6 KW

$$C = \frac{P}{N} \quad (5.36)$$

Avec

$$N = \frac{\pi n}{30} \quad (5.37)$$

$$\Rightarrow C = \frac{P}{\frac{\pi n}{30}} = \frac{30P}{\pi n} \quad \Rightarrow \quad C = \frac{30 \times 151.6 \times 10^3}{\pi \times 600} \quad \Rightarrow \quad C = 2.41 \text{ kNm}$$

La force exercée par l'eau sur les aubages de la turbine est :

$$N(x) = \frac{C}{\frac{D}{2}} = \frac{2.54 \times 10^3}{\frac{0.249}{2}} \quad \Rightarrow \quad N(x) = 19.35 \text{ kN} \quad (5.38)$$

En considérant AB un arbre (Figure 5.4) de longueur 2m et dont le point O est situé à 0.5m de B

L'équilibre de la statique nous permet d'écrire en négligeant le poids de l'arbre et on note R_1 , R_2 les réactions d'appuis respectifs :

$$\sum \vec{M}_A = \vec{0} \quad (5.39)$$

Et

$$\sum \vec{R} = \vec{0} \quad (5.40)$$

Il vient donc :

$$-R_B \times AB + N(x) \times AO = 0$$

$$\Rightarrow -R_B \times 2 + 19.35 \times 10^3 \times 0.5 = 0 \quad \Rightarrow \quad R_B = \frac{19.35 \times 10^3 \times 0.5}{2}$$

$$\Rightarrow R_B = 4.83 \text{ kN}$$

par projection sur l'axe de l'arbre on a :

$$R_A + R_B - N(x) = 0$$

$$\Rightarrow R_A + R_B = N(x) \quad \Rightarrow \quad R_A = N(x) - R_B \quad \Rightarrow \quad R_A = 19.35 - 5.1$$

$$\Rightarrow R_A = 14.25 \text{ kN}$$

R_A , R_B : Réactions du support

► **Calcul du moment de torsion maximal M_t**

$$M_t = M_{turbine} = N(x) \times OA \quad (5.41)$$

$$\Rightarrow M_t = 19.35 \times 10^3 \times 0.5$$

$$\Rightarrow M_t = 9.675 \text{ kN.m}$$

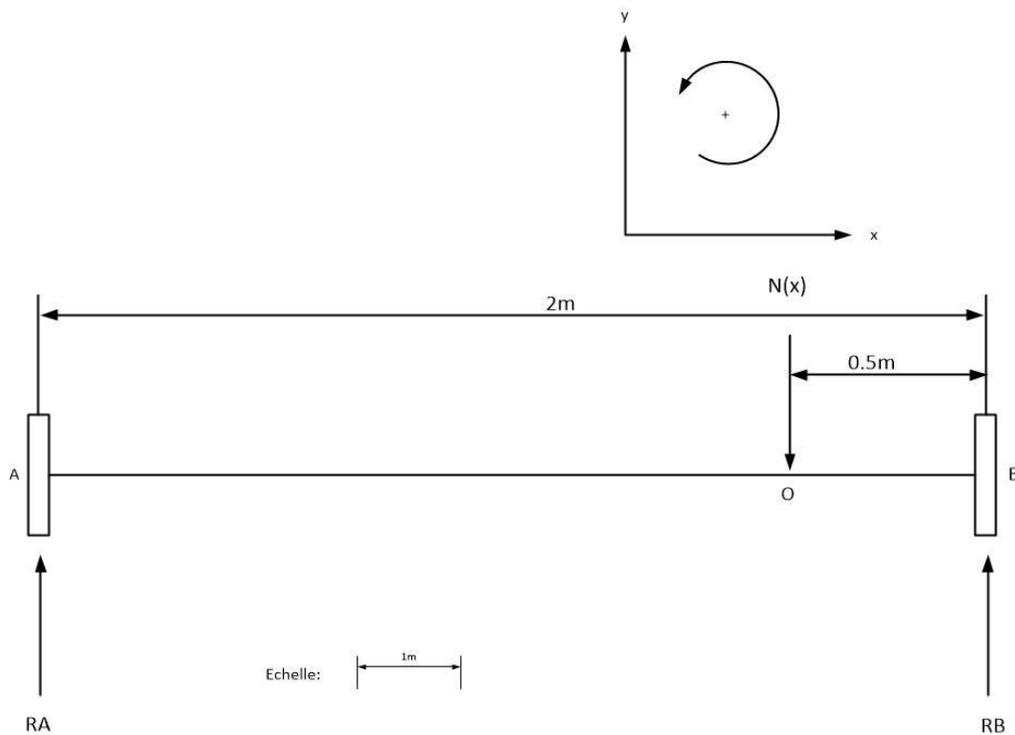
L'équation devient :

$$\frac{9.675 \times 10^3 \times 10^3 \times 10^{-1} \text{ kgmm}}{245.25 \times 10^{-6} \times 10^9 \text{ mm}^3} \leq R_{pg}$$

$$4.16 \text{ kg/mm}^2 < 8 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Avec } 1 \text{ kg} = 10 \text{ N}$$

Figure 5.4 : Diagramme des forces exercées sur l'arbre de transmission



► Vérification à la déformation

L'arbre de la turbine peut se risquer de se comporter comme un ressort au cas d'une

brusque variation de charge, dans ce cas il nous faut imposer une limite à l'angle de torsion.

La condition de sécurité s'écrit:

$$\frac{M_t}{GI_0} \leq \theta_{\max} \quad (5.42)$$

Où G : module d'élasticité transversale en kg/mm^2 et θ_{\max} : angle unitaire limite de torsion en rad/mm généralement égal à 0.25rad/mm

On a: $G=4 \times E=0.4 \times 20000$, $G=8000\text{kg/mm}^2$

Il vient donc:

$$\frac{9.675 \times 10^3 \times 10^3 \times 0.1\text{kgmm}}{8000\text{kg/mm}^2 \times 245.25 \times 10^{-6} \times 10^{12}\text{mm}^4} = 4.93 \times 10^{-7} \leq 0.25\text{rad/mm}$$

Acceptable.

► Dimensionnement des roulements

Les **paliers** sont des organes utilisés en construction mécanique pour supporter et guider, en rotation, des arbres de transmission.

Suivant l'usage désiré, ces paliers peuvent être :

- lisses où les arbres qui reposent sur des coussinets sont soumis au frottement de glissement entre les surfaces en contact.
- à roulement où le contact s'effectue par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux contenus dans des cages. On a là un phénomène de frottement de roulement qui permet une plus grande charge sur les paliers et une plus grande vitesse de rotation

Dans le souci de garder en équilibre l'arbre de la turbine par reprise des forces de réaction qu'elle transmet aux supports, les paliers en jouent un rôle primordial.

Un roulement permet le positionnement, la transmission des efforts et la rotation entre deux pièces par le remplacement du glissement par le roulement. Ce composant mécanique optimise le frottement et la précision de la liaison.

Les matériaux employés dépendent de l'application pour laquelle est conçue le roulement, mais il doit être généralement très résistant à la compression. C'est pourquoi on choisit souvent l'acier ou la céramique.

► **Calcul des roulements à billes**

Les paliers sont réalisés en fonction du type de roulements employé : à billes, à rouleaux ou à aiguilles. Pour les roulements à billes, On distingue les roulements à une rangée de bille dit roulement à gorge profonde, les roulements à deux rangées de billes, qui ont une plus grande capacité que les roulements à une rangée,

On utilise par la suite des roulements à une rangée de billes à gorge profonde. A noter que ces types de roulements ont une grande capacité de charge radiale avec capacité de charge axiale raisonnable.

Pour une machine fonctionnant 24h/24h la durée de vie acceptable l_h est de 45000 heures en moyenne, il vient donc :

$$l_h = \frac{10^6 l}{60N} \quad (5.43)$$

$$\Rightarrow l = \frac{60N \times l_h}{10^6} \Rightarrow l = \frac{60 \times 600 \times 45000}{10^6} \Rightarrow l = 1620 \text{ millions de tours}$$

l : Durée nominale en millions de tours.

En supposant que $C \neq P$ on aura donc :

$$l = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \Rightarrow C = P^3 \sqrt[3]{l} \quad (5.44)$$

P : charge équivalente en N

C : charge dynamique de base en N

► **Roulement à installer au point B**

On utilise l'équation 5.44 avec, $P = R_B \Rightarrow P = 5.10kN$

$$C = 5.1 \times 10^3 \times \sqrt[3]{1620}$$

$$C = 59.9 kN$$

$$\begin{cases} d = 100 \text{ mm} \\ C = 59.90 \text{ kN} \end{cases}$$

Au point A on a avec, $P = R_A \Rightarrow P = 15.30 \text{ kN}$

$$C = 15.3 \times 10^3 \times \sqrt[3]{1620}$$

$$C = 179.70 \text{ kN}$$

$$\begin{cases} d = 100 \text{ mm} \\ C = 179.70 \text{ N} \end{cases}$$

► Canal de fuite

Le canal de fuite assure la restitution des eaux turbinées à partir des aspirateurs de la centrale jusqu'au bief aval de la centrale. De la même façon que pour le canal d'amenée, il est utilisé pour maximiser la chute totale pouvant être développée à la centrale. Il a la même structure que celle du bassin de décantation.

5.5 Alternateur

5.5.1 Introduction

La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est assurée par les machines synchrones monophasées ou triphasées.

Une **machine synchrone** est une machine électrique soit produisant un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor : fonctionnement en « génératrice » dans deux quadrants du plan couple-vitesse. L'alternateur est une application particulière de la machine synchrone, fonctionnant en génératrice dans un seul quadrant du plan couple-vitesse. Soit absorbant un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du rotor : fonctionnement « moteur »

Au-delà de quelques kilowatts, les machines synchrones sont généralement des machines triphasées. Le rotor, souvent appelé « roue polaire », est alimenté par une source de courant continu ou équipé d'aimants permanents.

Dans le cadre de notre projet nous allons utiliser la machine synchrone en transformant l'énergie mécanique d'une turbine en énergie électrique. Donc nous allons utiliser la machine électrique en alternateur triphasé.

Les alternateurs sont du type horizontal lorsqu'ils sont entraînés par des turbines à gaz ou à vapeurs ou des moteurs diesel, ou type vertical généralement utilisé dans les installations hydro-électriques.

5.5.2 Généralités

La machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor, et d'une partie fixe, le stator. Le rotor peut se composer d'aimants permanents ou être constitué d'un bobinage alimenté en courant continu et d'un circuit magnétique (électro-aimant).

Stator

Du point de vue électrique, le stator d'un alternateur est identique à celui d'un moteur asynchrone triphasé. Il se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé. L'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre.

On préfère la connexion en étoile à celle en triangle pour les raisons suivantes :

1. La tension par phase étant seulement 58 % de celle entre les lignes, on peut réduire l'épaisseur de l'isolant dans les encoches. Cela permet de grossir la section des conducteurs et, par conséquent, la puissance de la machine.
2. Lorsque l'alternateur est en charge, la tension induite par phase se déforme de sorte que la forme d'onde n'est plus tout à fait sinusoïdale. Cette distorsion est due principalement à la présence des tensions de troisième harmonique qui se superposent à la tension fondamentale. Avec une connexion en étoile, les troisièmes harmoniques n'apparaissent pas entre les fils de ligne, car elles s'annulent. Par contre, si l'on utilise une connexion en triangle, ces tensions s'additionnent et provoquent la circulation d'un courant dans le triangle et, par conséquent, occasionnent des pertes Joule supplémentaires.

La tension nominale (ligne à ligne) d'un alternateur varie selon sa puissance en kVA. En général, plus la capacité de la machine est grande, plus sa tension est élevée. Cependant, la tension nominale d'un alternateur dépasse rarement 25 kV, car autrement le volume de l'isolation des conducteurs dans les encoches deviendrait prohibitif.

Rotor

Si l'on fait tourner le rotor, les lignes de flux produites par les pôles inducteurs balayent les trois enroulements du stator et induisent dans ceux-ci des tensions triphasées. Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils sont entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à haute vitesse par des turbines à vapeur.

a) Rotor à pôles saillants

Afin d'extraire la puissance maximale de la chute d'eau, les turbines hydrauliques des centrales à basse et à moyenne chutes d'eau tournent toujours à basse vitesse : entre 50 et 300 tr/min.

Comme les alternateurs sont raccordés directement aux turbines et puisqu'une fréquence de 60 Hz (ou 50 Hz) est imposée, on doit placer un grand nombre de pôles sur le rotor. Les alternateurs à basse vitesse ont donc toujours un grand diamètre, de façon à donner l'espace nécessaire pour loger le nombre de pôles requis. Dans ces machines, le rotor est constitué d'une roue en acier montée sur un arbre vertical et sur laquelle sont fixées les pièces polaires.

b) Rotor à pôles lisses

Les turbines à vapeur tournent toujours à haute vitesse : 3600 r/min ou 1800 r/min sur les réseaux à 60 Hz, et 3000 ou 1500 r/min sur ceux à 50 Hz. Par conséquent, les alternateurs qu'elles entraînent comportent 2 ou 4 pôles seulement ; on les désigne sous le nom de turbo-alternateurs. Leur rotor a une forme cylindrique, car les pôles sont formés en plaçant des bobines dans des encoches taillées dans la masse même du rotor. Les forces centrifuges intenses dues à la haute vitesse de rotation imposent une limite au diamètre du rotor ;

Comme, d'autre part, les grandes puissances (500 MW à 1500 MW) nécessitent un gros rotor, on est obligé de lui donner une forme très allongée.

c) Bagues collectrices

Les bagues collectrices sont montées sur l'arbre du rotor et branchées aux extrémités de l'enroulement inducteur. Des balais en carbone sont maintenus en contact avec la surface des bagues à l'aide de ressorts. Ce mécanisme permet de brancher l'enroulement inducteur à une source d'énergie extérieure, responsable de son alimentation. Pour que l'ensemble bagues/balais fonctionne bien, il importe de maintenir une pression constante sur les balais. Le ressort doit donc remplir efficacement cette fonction pendant toute la durée de vie des balais.

Excitatrice

L'excitation d'un alternateur constitue un de ses éléments les plus importants. En effet, le champ doit non seulement induire une tension appropriée, mais il doit aussi pouvoir varier rapidement lorsque la charge varie brusquement. La vitesse de réponse est un facteur important pour le maintien de la stabilité du réseau auquel l'alternateur est branché. Afin d'obtenir une réponse rapide on utilise deux excitatrices : une excitatrice principale et une excitatrice pilote.

L'excitatrice principale fournit le courant d'excitation de l'inducteur, habituellement par l'intermédiaire de balais et de bagues. En régime normal, la tension générée est comprise entre 125 V et 600 V. On peut la régler manuellement ou automatiquement en faisant varier l'intensité du champ inducteur, c'est-à-dire en agissant sur le courant d'excitation I , provenant de l'excitatrice pilote.

En régime normal, l'excitation est commandée automatiquement; elle varie suivant les fluctuations de la charge pour garder la tension constante ou, encore, pour changer la puissance réactive débitée par l'alternateur. Une perturbation grave sur un réseau peut occasionner une baisse subite de la tension aux bornes de l'alternateur. L'excitatrice doit alors répondre très rapidement pour soutenir la tension.

À cause de l'usure des balais et de la poussière conductrice qu'ils dégagent, il faut effectuer une maintenance constante des bagues et du collecteur, sinon on risque des courts-circuits. Pour éviter ce problème, on utilise de nos jours les systèmes d'excitation sans balais dans lesquels un

alternateur-excitateur et un groupe de redresseurs fournissent le courant continu à l'alternateur principal.

L'alternateur-excitateur et les redresseurs sont montés en bout d'arbre et tournent ensemble avec l'alternateur principal. L'alternateur-excitateur triphasé possède habituellement un nombre de pôles tel que sa fréquence soit 2 ou 3 fois celle du réseau.

5.5.3 Principe de fonctionnement

Pour produire du courant, on utilise une force extérieure pour faire tourner le rotor : son champ magnétique, en tournant, induit un courant électrique alternatif dans les bobines du stator. La vitesse de ce champ tournant est appelée « vitesse de synchronisme ». Il n'est pas possible de faire démarrer correctement, sans aide extérieure, une machine synchrone en connectant ses enroulements statoriques directement sur un réseau alternatif. Si l'on n'entraîne pas le rotor par une force extérieure, il est possible de la faire tourner en alimentant ses enroulements statoriques par un courant alternatif dont la fréquence augmente progressivement de zéro à la fréquence de synchronisme et en faisant en sorte que la tension aux bornes des enroulements soit proportionnelle à la fréquence. Sa vitesse de synchronisme sera directement fréquence de l'alimentation électrique.

Un autre moyen est de réaliser l'auto-pilotage de la machine, c'est-à-dire de maintenir l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique, par exemple, en disposant sur son axe un capteur qui délivre une information de la position du rotor. Cette information est traitée par un convertisseur électronique qui fournit le courant statorique à la machine, en phase avec sa force contre-électromotrice.

Dans notre projet, nous utiliserons la machine synchrone en alternateur. L'alternateur convertit une puissance mécanique absorbée par le rotor sous la forme d'une rotation, en puissance électrique, qu'il délivre sous forme alternative, et ce au travers d'un principe simple et avec des rendements extrêmement importants puisque proches de 100 %. Le stator (l'induit) produit la puissance électrique. Les bobinages induits sont immobiles et sont portés par le stator. En principe, il est constitué de trois bobinages décalés l'un de l'autre d'un tiers de tour (120°) dans l'espace, afin de créer des forces électromotrices décalées l'une de l'autre d'un tiers de période.

Du point de vue électrique, les alternateurs se composent de deux éléments distincts : **l'inducteur** et **l'induit**.

Les alternateurs sont construits avec un inducteur fixe ou un inducteur rotatif. L'inducteur est composé de deux ou plusieurs pôles produisant un champ magnétique constant.

Un alternateur à inducteur fixe a la même apparence qu'une génératrice à courant continu. Les pôles saillants produisent le champ magnétique qui est coupé par les conducteurs situés sur l'induit. L'induit porte un enroulement triphasé dont les bornes sont connectées à trois bagues montées sur l'arbre. Un groupe de balais fixe recueille la tension triphasée qui est appliquée à la charge. L'induit est entraîné par un moteur à explosion ou toute autre source de force motrice.

La valeur de la tension triphasée dépend de la vitesse de rotation et de l'intensité du champ magnétique. La fréquence dépend de la vitesse et du nombre de pôles de l'inducteur.

Les alternateurs à inducteur fixe sont utilisés pour des puissances inférieures à 5 KVA, pour des puissances plus importantes, il est plus économique, plus sécuritaire et plus pratique d'employer un inducteur tournant.

Un alternateur à inducteur tournant possède un induit fixe, le stator. Cette construction est plus avantageuse car elle permet d'alimenter directement le circuit d'utilisation sans passer par des bagues de fortes dimensions qui seraient requises avec un induit tournant. De plus, l'isolement des bobinages du stator est grandement simplifié du fait qu'ils ne sont soumis à aucune force centrifuge. Mais les machines entraînées par turbine, à cause de la force centrifuge, utilisent en lieu et place des pôles saillants des pôles noyés obtenus en taillant sur le rotor des encoches parallèles ou radiales.

5.5.4 Puissance apparente de l'alternateur

La puissance d'entrée de l'alternateur correspond à la puissance mécanique développée par la turbine qui est de l'ordre de 124.3 KVA. La puissance apparente de l'alternateur se calcule comme suit :

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad (5.45)$$

Avec $\cos\varphi = 0,8$, on a :

$$S = 155.38 \text{ KVA}$$

► Nombre de pôles

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire.

Chaque fois qu'une paire de pôles se déplacent devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet. On déduit que la fréquence est donnée par l'équation :

$$f = \frac{PN}{120} \quad (5.46)$$

$$\Rightarrow P = \frac{120f}{N} \Rightarrow P = \frac{120 \times 60}{600} \Rightarrow P = 12 \text{ pôles ou } p = \frac{P}{2} = 6 \text{ paires de pôles}$$

5.6.5 Caractéristiques de l'alternateur

Type d'alternateur : générateur synchrone triphasés à pôles saillants.

Puissance	: 160 KVA
Tension (phase-phase)	: 480 ± 5 V
Fréquence	: 60 Hz
Facteur de puissance	: 0.8
Connexion	: Y
Vitesse nominal	: 600 tr/mn
Survitesse	: 1.8×600 tr/mn
Excitation	: auto-excitée, autorégulée
Température	: 40 °C
Durée de vie	: 30 ans

5.6.6 Conception du stator

► **Dimensions principales de l'induit**

Le rapport de la longueur virtuelle de l'induit au pas polaire est tel que :

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau_p} \tag{5.47}$$

D'après la Figure D.4, ce rapport est donné en fonction du nombre de paires de pôles p .

Pour $\lambda = 2$, l'alternateur est du type pôles allongés.

D'après la Figure D.5, le pas polaire τ_p est donné en fonction de l'expression mathématique :

$$\frac{S \cdot 10^{-3}}{p \cdot f \cdot \lambda} = \frac{160 \times 10^3 \times 10^{-3}}{6 \times 50 \times 2} = \mathbf{0.26 \text{ kW}s}$$

D'où, $\tau_p = \mathbf{0.15 \text{ m}}$

Le diamètre d'alésage ou diamètre intérieur du stator est :

$$D = \frac{2p \cdot \tau_p}{\pi} \tag{5.48}$$

$$\Rightarrow D = \frac{12 \times 0.15}{3.14} \Rightarrow \mathbf{D = 0.57m}$$

La longueur virtuelle de l'induit est :

$$l_i = \lambda \tau_p \quad (5.49)$$

$$\Rightarrow l_i = 2 \times 0.15 \Rightarrow l_i = \mathbf{0.3m}$$

Calcul du coefficient d'utilisation correspondant

$$C = \frac{S \cdot 10^{-3}}{D^2 \cdot l_i \cdot N} \quad (5.50)$$

$$\Rightarrow C = \frac{160 \times 10^3 \times 10^{-3}}{0.57^2 \times 0.3 \times 600} \Rightarrow C = \mathbf{2.73}$$

Le coefficient d'utilisation précédent a été déterminé à $\cos\varphi = 0,8$ et $f = 50 \text{ Hz}$

Cherchons le coefficient d'utilisation correspondant à $f = 60 \text{ Hz}$

$$\frac{C_{50}}{C_{60}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.51)$$

$$\Rightarrow \frac{C_{50}}{C_{60}} = \frac{60}{50} = 1.2 \Rightarrow C_{60} = \frac{2.73}{1.2} \Rightarrow C_{60} = \mathbf{2.27}$$

Considérons un diamètre d'alésage égal à 0.5 m

La longueur virtuelle de l'induit devient :

$$l_i = \frac{160 \times 10^3 \times 10^{-3}}{0.5^2 \times 2.27 \times 600}$$

$$\Rightarrow l_i = \mathbf{0.46 m}$$

Et la valeur de τ_p est :

$$\tau_p = \frac{\pi \times 0.5}{2 \times 6}$$

$$\Rightarrow \tau_p = \mathbf{0.13}$$

Les canaux de ventilation du stator sont superposés à ceux du rotor.

Pour $\delta = 1.9 \text{ mm}$ et $b_{vt} = 10 \text{ mm}$, d'après la Figure D.6 on a : $b'_{vt} = 5.5 \text{ mm}$.

On a alors la longueur de l'induit :

$$l_a = l_i + b'_{vt} \cdot n_{vt} \quad (5.52)$$

On choisit $n_{vt} = 2$

$$l_a = 0.46 + 5.5 \times 10^{-3} \times 2$$

$$l_a = \mathbf{0.47m}$$

► **Enroulement du stator**

Il est prévu pour le stator un enroulement avec une seule couche à raison de trois (3) encoches par pôles par phase.

Le nombre total d'encoches est :

$$Z = 2pqm \quad (5.53)$$

$$\Rightarrow Z = 2 \times 6 \times 3 \times 3 \Rightarrow Z = 108 \text{ encoches}$$

m : Nombre de phases

q : Nombre d'encoches/phase

D'où la distance entre axes de deux dents voisines :

$$\tau_z = \frac{\pi \cdot D}{Z} \quad (5.54)$$

$$\Rightarrow \tau_z = \frac{\pi \cdot 0.5}{108} \Rightarrow \tau_z = \mathbf{0.0145 m}$$

Le facteur de distribution de k_d est donné par :

$$k_d = \frac{\sin \frac{qp\varepsilon}{2}}{q \sin \frac{p\varepsilon}{2}} \quad (5.55)$$

Avec,

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{Z} \quad (5.56)$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{2\pi}{108}$$

L'équation (5.55) devient :

$$k_d = \frac{\sin\left(\frac{3 \times 6 \times \frac{2\pi}{108}}{2}\right)}{3 \times \sin\left(\frac{6 \times \frac{2\pi}{108}}{2}\right)}$$

$$\Rightarrow k_d = \frac{\sin\frac{\pi}{6}}{3 \times \sin\frac{\pi}{18}} \Rightarrow k_d = 0.96$$

La valeur d'inclinaison est $k_i = 1$ (conducteurs d'induit rectiligne), le facteur de raccourcissement est $k_r = 1$. Le facteur de bobinage k_w est :

$$k_w = k_i \cdot k_r \cdot k_d \quad (5.57)$$

$$\Rightarrow k_w = 0.96$$

La courbe d'induction correspondant à l'arc polaire est sinusoïdale. Nous choisissons pour le rapport $\frac{b_p}{\tau_p}$ la valeur 0.75. Les constructeurs recommandent alors une valeur de l'entrefer $\delta = 0.015\tau_p$ soit :

$$\delta = 0.015 \times 0.13$$

$$\Rightarrow \delta = 1.95\text{mm}$$

La valeur de l'arc polaire virtuel b_i dépend de la largeur et de la forme de l'épanouissement polaire $b_i = \alpha_i \cdot \tau_p$. La Figure D.7 donne α_i en fonction de $\frac{b_p}{\tau_p}$.

$$\alpha_i = 0.65 \text{ on a alors } b_i = 0.65 \times 0.13$$

$$\Rightarrow b_i = 0.084 \text{ m}$$

Sur la Figure D.8, on trouve la valeur B_δ de l'induction dans l'entrefer en fonction de τ_p .

$$B_\delta = 0.83 \text{ T} \quad (5.58)$$

On déduit de cette valeur le flux :

$$\Phi = B_\delta \cdot b_i \cdot l_i \quad (5.59)$$

$$\Rightarrow \Phi = 0.83 \times 0.084 \times 0.46 \Rightarrow \Phi = 0.032\text{wb}$$

La Figure D.7 donne le facteur de forme de l'onde fondamentale $k_f = 1.25$

A vide $E = 480 \text{ kV}$

$$N_1 = \frac{E_\phi}{4k_f \cdot f \cdot k_w \cdot \Phi} \quad (5.60)$$

$$\Rightarrow N_1 = \frac{\frac{480}{\sqrt{3}}}{4 \times 1.25 \times 60 \times 0.96 \times 0.032} \Rightarrow N_1 = 30.08 \text{ spires/phase}$$

L'enroulement est réalisable avec $N_1 = 30$ spires/phase

Soit

$$\frac{30}{3} = 10 \text{ spires/encoche}$$

$$\frac{10}{2} = 5 \text{ spires/bobine simple}$$

Il y a donc 5 conducteurs par encoche et $108 \times 5 = 540$ conducteurs au total.

Le produit $A_1 B_\delta$ étant imposé pour une certaine valeur de C, on a :

$$B_\delta = \frac{30.08}{30} \times 0.83 \Rightarrow B_\delta = 0.832T$$

$$\Phi = \frac{30.08}{30} \times 0.032 \Rightarrow \Phi = 0.03208 \text{ Wb}$$

La densité linéaire de courant est donnée par l'équation :

$$A_1 = \frac{Z_1 \cdot I_1}{\pi D} \quad (5.61)$$

$$S = 3E_\phi I_1 \quad (5.62)$$

$$\Rightarrow I_1 = \frac{160 \times 10^3}{3 \times 277} \Rightarrow I_1 = 192.53 \text{ A}$$

D'où

$$A_1 = \frac{540 \times 192.53}{\pi \times 0.5} \Rightarrow A_1 = 66220.50 \text{ A/m}$$

► Dimensions des encoches

En utilisant un conducteur de dimension $6 \times 4.5 \text{ mm}$ c'est-à-dire de section 27 mm^2 et une isolation en papier de coton de 0.5 mm d'épaisseur. Le conducteur isolé a pour section droite $(6+0.5)(4.5+0.5)=76\text{mm}^2$

Largeur de l'encoche b_z :

Conducteurs 6.5 mm

Gaine de micartite $2 \times 1 = 2 \text{ mm}$

Jeu entre gaine et encoche $2 \times 0.2 = 0.4 \text{ mm}$

Largeur totale : $b_z = 8.9\text{mm}$

Hauteur de l'encoche h_c :

Conducteurs $2 \times 5 = 10\text{mm}$

Gaine de micartite $2 \times 1 = 2 \text{ mm}$

Jeu entre gaine et encoche $2 \times 0.2 = 0.4 \text{ mm}$

La hauteur totale : $h_c = 12.4\text{mm}$

Supposons la hauteur de la clavette de fermeture égale à 7 mm .

Calcul de l'induction apparente à la tête des dents de l'encoche

Elle est donnée d'après l'expression suivante :

$$B_{zt} = \frac{l_i \cdot \tau_z}{k_f \cdot l_{FC} \cdot Z_t} B_\delta \quad (5.63)$$

Avec

$$Z_t = \tau_z - b_z \quad (5.64)$$

$$\Rightarrow Z_t = 0.0145 - 0.0089 \Rightarrow Z_t = 0.0056 \text{ m}$$

$l_{FC} = 0.6$ et $k_f = 0.95$

D'où

$$B_{zt} = \frac{0.46 \times 0.0145}{0.95 \times 0.6 \times 0.0056} \times 0.832$$

$$\Rightarrow B_{zt} = 1.73T$$

Cette valeur étant relativement faible, on peut donc conserver les dimensions de l'encoche calculées précédemment.

- **Calculons la longueur moyenne du conducteur ou longueur moyenne d'une demi-spire**

$$l_{c01} = \frac{2 \times \text{spire/bobine_simple}(l_a + \tau_p) - \tau_z}{2 \times \text{spire/bobine simple}} \quad (5.65)$$

Une bobine simple est composée de 5 spires dont 4 ont pour dimension $l_a + \tau_p$. La 5^{ème} ayant un coté écourté du pas dentaire.

$$l_{c01} = \frac{2 \times 5(0.47 + 0.13) - 0.0145}{2 \times 5}$$

$$\Rightarrow l_{c01} = 0.59 \text{ m}$$

La longueur totale de l'enroulement d'induit est :

$$L_{c01} = Z_1 l_{c01} \quad (5.66)$$

$$\Rightarrow L_{c01} = 108 \times 0.59 \Rightarrow L_{c01} = 63.72 \text{ m}$$

Calcul de la résistance de l'induit par phase à 75°C

$$R = \frac{\rho \cdot L_{c01}}{m \cdot S_{c01}} \quad (5.67)$$

$$\Rightarrow R = \frac{0.0216 \times 10^{-6} \times 63.72}{3 \times 27 \times 10^{-6}} \Rightarrow R = 0.0169 \Omega/\text{phase}$$

La résistance équivalente par phase en considérant quatre (4) conducteurs en parallèle est :

$$R_{eq} = \frac{0.0169}{4} \Rightarrow R_{eq} = 0.004 \Omega/\text{phase}$$

Calcul de la masse de cuivre

$$m_{cu} = \rho_{cu} \cdot L_{c01} \cdot S_{c01} \quad (5.68)$$

$$\Rightarrow m_{cu} = 8.9 \times 10^3 \times 63.72 \times 27 \times 10^{-6} \Rightarrow m_{cu} = 15.31 \text{ kg}$$

Si nous prenons pour la valeur d'induction dans la culasse $B_{j1} = 1 \text{ T}$, la hauteur nécessaire pour la culasse est :

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2k_F \cdot l_{FC} \cdot B_{j1}} \quad (5.69)$$

$$\Rightarrow h_{j1} = \frac{0.03208}{2 \times 0.95 \times 0.6 \times 1} \Rightarrow h_{j1} = 0.028 \text{ m}$$

A cette valeur de h_{j1} correspond un diamètre extérieur d'induit tel que :

$$D_e = D + 2h_z + 2h_{j1} \quad (5.70)$$

Avec,

$$h_z = Z_t + \tau_z \quad (5.71)$$

$$\Rightarrow h_z = 0.0056 + 0.0145 \Rightarrow h_z = 0.0201 \text{ m}$$

D'où,

$$D_e = 0.5 + 2 \times 0.0201 + 2 \times 0.028 \Rightarrow D_e = 0.59 \text{ m} \quad (5.72)$$

5.5.7 Conception du rotor

► Dimensions des pôles

On suppose que le flux de dispersion 15 % du flux dans l'entrefer, le flux dans le noyau polaire est :

$$\Phi_p = 1,15\Phi \quad (5.73)$$

$$\Rightarrow \Phi_p = 1.15 \times 0.03208 \Rightarrow \Phi_p = 0.03689 \text{ Wb}$$

En considérant 1,15 T comme induction dans le pôle, calcul de la surface du pôle :

$$s_p = \frac{\Phi_p}{B_p} \quad (5.74)$$

$$\Rightarrow s_p = \frac{0.03689}{1,15} \Rightarrow s_p = 0.03208 \text{ m}^2$$

Les épanouissements polaires sont formés de toles de 1 mm d'épaisseur avec un facteur de remplissage $K_f = 0,95$

► Longueur axiale du pôle

$$l_p = l_a \quad (5.75)$$

$$\Rightarrow l_p = 0.47 \text{ m}$$

La largeur du pôle est donnée par l'expression suivante:

$$b_n = \frac{S_p}{K_f \cdot l_a} \quad (5.76)$$

$$\Rightarrow b_n = \frac{0.03208}{0.95 \times 0.47} \Rightarrow b_n = 0.071 \text{ m}$$

La hauteur de l'épanouissement polaire est prise $h_p = 0.13 \tau_p$

$$\Rightarrow h_p = 0.13 \times 0.13 \Rightarrow h_p = 0.0169 \text{ m}$$

Pour $\frac{b_p}{\tau_p} = 0.75$, on a $b_p = 0.75 \times \tau_p$

$$\Rightarrow b_p = 0.75 \times 0.13 \Rightarrow b_p = 0.0975 \text{ m}$$

De la Figure D.9 on tire la hauteur de l'enroulement $h_n = 0.055 \text{ m}$

Avec 10 mm de plus pour la fixation et l'isolation des enroulements, on trouve :

$$h'_n = 0.055 + 0.01 \Rightarrow h'_n = 0.065 \text{ m}$$

► Culasse du rotor

La roue polaire est en acier coulé. Nous prenons comme induction pour la culasse $B_{j2} = 1 \text{ T}$.

On obtient la section de la culasse :

$$S_{j2} = \frac{\Phi_p}{2B_{j2}} \quad (5.77)$$

$$\Rightarrow S_{j2} = \frac{0.03689}{2} \Rightarrow S_{j2} = 0.01844 \text{ m}^2$$

Les dimensions principales de l'alternateur étant fixées, nous pouvons calculer la caractéristique de marche à vide.

5.5.8 Caractéristique de marche à vide

La détermination théorique de la caractéristique à vide de l'alternateur est d'une importance capitale dans la conception de ce dernier. L'objectif est de prévoir le fonctionnement de l'alternateur à vide et aussi son comportement lorsqu'il est soumis à des régimes variés en tension et courant, notamment à charge nominale.

► **Chute de potentiel magnétique dans la culasse de l'induit**

L'induction dans la culasse est calculée d'après la formule suivante :

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_f \cdot l_{FC} \cdot h_{j1}} \quad (5.78)$$

Où

$$\Phi = B_\delta \cdot b_i \cdot l_i \quad (5.79)$$

$$\Rightarrow \Phi = 0.084 \times 0.46 \times B_\delta \Rightarrow \Phi = 0.03864 B_\delta \quad (5.80)$$

$$B_{j1} = \frac{0.03864 B_\delta}{2 \times 0.93 \times 0.6 \times 0.028} \Rightarrow B_{j1} = 1.23 B_\delta \quad (5.81)$$

Pour $B_\delta = 0.832 \text{ T}$; $B_{j1} = 1.23 \times 0.832 = 1.023 \text{ T}$

La chute de potentiel magnétique dans la culasse de l'induit :

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} \quad (5.82)$$

Or,

$$l_{j1} = \frac{\pi D_e}{2p}$$

$$\Rightarrow l_{j1} = \frac{3.14 \times 0.59}{2 \times 6} \Rightarrow l_{j1} = 0.15 \text{ m}$$

D'où

$$U_{j1} = 0.15 H_{j1} \quad (5.83)$$

De la courbe d'aimantation de la Figure D.10, on tire pour $B_{j1} = 1.023 \text{ T}$, $H_{j1} = 300 \text{ A/m}$

On utilise des tôles de 2 mm d'épaisseur avec un chiffre de pertes de 2,3 W/kg.

$$U_{j1} = 0.15 \times 300 \Rightarrow U_{j1} = 45 \text{ A}$$

► **Chute de potentiel magnétique dans les dents de l'induit**

L'induction apparente dans les dents de l'induit est :

$$B_z = \frac{l_i \cdot \tau_z}{k_f \cdot l_{FC} \cdot Z_{1/3}} B_\delta \quad (5.84)$$

$Z_{1/3}$ représente la largeur de la dent au $1/3$ de la hauteur à partir de la tête.

En effet l'équation de la largeur d'une dent est :

$$Z(x) = \frac{2\tau_z}{D} x + \tau_z - b_z \quad (5.85)$$

Pour

$$x = \frac{1}{3} h_z,$$

$$Z\left(\frac{1}{3} h_z\right) = \frac{2\tau_z}{D} \times \frac{1}{3} h_z + \tau_z - b_z \quad (5.86)$$

$$h_z = 0.0201 \text{ m}$$

$$\Rightarrow Z(0.0067) = \frac{2 \times 0.0145}{0.5 \times 3} \times 0.0201 + 0.0145 - 0.0089$$

$$\Rightarrow Z(0.0067) = 0.0059 \text{ m}$$

L'induction apparente dans la dent devient :

$$\Rightarrow B_z = \frac{0.46 \times 0.0145}{0.93 \times 0.6 \times 0.0059} \times B_\delta$$

$$\Rightarrow B_z = 2.02 B_\delta \quad (5.87)$$

$$B_z = 2.02 \times 0.832 \Rightarrow B_z = 1.6 \text{ T}$$

La chute de potentiel magnétique correspondante dans les dents vaut:

$$2U_z = 2h_z \cdot H_z \quad (5.88)$$

$$\Rightarrow 2U_z = 2 \times 0.0201 \times H_z \Rightarrow 2U_z = 0.04 H_z \quad (5.89)$$

La courbe d'aimantation de la Figure D.10 donne $H_z = 4500 \text{ A/m}$

$$\Rightarrow 2U_z = 0.04 \times 4500 \Rightarrow 2U_z = 180 \text{ A}$$

► **Chute de potentiel magnétique dans le fer :**

L'entrefer n'étant pas constant à cause des dents et des encoches. De ce fait, nous introduisons le facteur de Carter K_c qui nous permettra de calculer l'entrefer fictif.

$$K_c = 1 ;$$

L'entrefer fictif vaut :

$$\delta' = K_c \cdot \delta \quad (5.90)$$

$$\Rightarrow \delta' = \delta \Rightarrow \delta' = 1.95 \text{ mm}$$

La chute de potentiel magnétique dans les deux entrefers vaut :

$$2U_\delta = \frac{2\delta'}{\xi_o} B_\delta \quad (5.91)$$

$$\Rightarrow 2U_\delta = \frac{2 \times 0.00195}{4 \times 3.14 \times 10^{-7}} B_\delta \Rightarrow 2U_\delta = 3105.09 B_\delta \quad (5.92)$$

$$\Rightarrow 2U_\delta = 3105.09 \times 0.832$$

$$\Rightarrow 2U_\delta = 2583.4 \text{ A}$$

En marche à vide et à tension nominale, $2U_\delta = 2583.4 \text{ A}$

► **Chute de potentiel magnétique dans les pôles**

Le pôle est traversé par le flux Φ de l'entrefer et par la plus grande partie du flux de dispersion Φ_σ .

L'équation suivante nous donne la perméance entre les surfaces des épanouissements polaires :

$$\Lambda_{\sigma p} = \xi_o \left[\frac{l_p h_p}{a_p} + 1,5 h_p \log \left(1 + \frac{\pi b_p}{2 a_p} \right) \right] \quad (5.93)$$

$$l_p = 0.47 \text{ m}$$

$$b_p = 0.0975 \text{ m}$$

$$a_p = \tau_p - b_p \Rightarrow a_p = 0.13 - 0.0975 = 0.0325 \text{ m}$$

$$h_p = 0.0169 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow \Lambda_{\sigma p} &= 4 \times 3,14 \times 10^{-7} \left[\frac{0,47 \times 0,0169}{0,0325} + 1,5 \times 0,0169 \log \left(1 + \frac{\pi \times 0,0975}{2 \times 0,0325} \right) \right] \\ &\Rightarrow \Lambda_{\sigma p} = 3,30 \times 10^{-7} H\end{aligned}$$

La perméance entre les surfaces du noyau :

$$\Lambda_{\sigma n} = \xi_o \left[\frac{l_n h_n}{a_n} + 1,5 h_n \log \left(1 + \frac{\pi b_n}{2 a_n} \right) \right] \quad (5.94)$$

$$l_n = 0,47 \text{ m}$$

$$b_n = 0,071 \text{ m}$$

$$a_n = 0,059 \text{ m}$$

$$h_n = 0,055 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow \Lambda_{\sigma n} &= 4 \times 3,14 \times 10^{-7} \left[\frac{0,47 \times 0,055}{0,059} + 1,5 \times 0,055 \log \left(1 + \frac{\pi \times 0,071}{2 \times 0,059} \right) \right] \\ &\Rightarrow \Lambda_{\sigma n} = 5,87 \times 10^{-7} H\end{aligned}$$

L'expression de la d.d.p magnétique entre les épanouissements polaires est donnée par :

$$U_\sigma = 2U_\delta + 2U_Z + U_{j1} \quad (5.95)$$

$$\Rightarrow U_\sigma = 2583,4 + 180 + 45 \Rightarrow U_\sigma = 2808,4 \text{ A}$$

Le flux total de dispersion Φ_σ pour les deux côtés du pôle devient :

$$\Phi_\sigma = 2U_\sigma (\Lambda_{\sigma p} + \Lambda_{\sigma n}) \quad (5.96)$$

$$\Rightarrow \Phi_\sigma = 2U_\sigma \times (3,30 \times 10^{-7} + 5,87 \times 10^{-7})$$

$$\Rightarrow \Phi_\sigma = 9,17 \times 10^{-7} U_\sigma \quad (5.97)$$

$$\Rightarrow \Phi_\sigma = 9,17 \times 10^{-7} \times 2808,4 \Rightarrow \Phi_\sigma = 0,0025 \text{ Wb}$$

D'où l'expression du flux dans le noyau polaire :

$$\Phi_p = \Phi + \Phi_\sigma \quad (5.98)$$

$$\Rightarrow \Phi_p = 0,03208 + 0,0025 \Rightarrow \Phi_p = 0,03458 \text{ Wb}$$

Le pôle se compose de tôles d'acier de 1mm d'épaisseur. Il est chanfreiné aux arrêtes. Sa section vaut :

$$s_p = 0.03208 \text{ m}^2$$

Cette valeur de s_p nous permet de trouver l'induction dans les pôles en marche à vide et à tension nominale:

$$B_p = \frac{\Phi_p}{s_p} \quad (5.99)$$

$$\Rightarrow B_p = \frac{\Phi_p}{0.03208} \quad (5.100)$$

$$\Rightarrow B_p = \frac{0.03458}{0.03208} \Rightarrow B_p = 1.07$$

La distance de la base du pôle à la surface de l'épanouissement polaire est :

$$h_{po} = h_p + h'_n \quad (5.101)$$

$$\Rightarrow h_{po} = 0.0169 + 0.065 \Rightarrow h_{po} = 0.0819 \text{ m}$$

La chute de potentiel dans deux pôles voisins devient :

$$2U_p = 2h_{po} \cdot H_p \quad (5.102)$$

$$\Rightarrow 2U_p = 2 \times 0.0819 H_p \Rightarrow 2U_p = 0.163 H_p \quad (5.103)$$

Pour $B_p = 1.07 \text{ T}$, $H_p = 320 \text{ A/m}$ (Figure D.10)

$$\Rightarrow 2U_p = 0.163 \times 320 \Rightarrow 2U_p = 52.16 \text{ A}$$

► **Chute de potentiel magnétique dans la culasse de la roue polaire**

L'induction dans la culasse magnétique de la roue polaire est donnée par :

$$B_{j2} = \frac{\Phi_p}{2S_{j2}} \quad (5.104)$$

$$\Rightarrow B_{j2} = \frac{\Phi_p}{2 \times 0.01844} \quad (5.105)$$

$$\Rightarrow B_{j2} = \frac{0.03458}{2 \times 0.01844} \Rightarrow B_{j2} = 0.93 \text{ T}$$

► **La longueur d'une ligne d'induction dans la culasse polaire est**

$$l_{j2} = \frac{\pi D_i}{2p} \quad (5.106)$$

Avec,

$$D_i = D - 2(\delta + h_{po}) \quad (5.107)$$

$$\Rightarrow D_i = 0.5 - 2(0.00627 + 0.0819) \Rightarrow D_i = 0.33 \text{ m}$$

D'où

$$l_{j2} = \frac{\pi \times 0.33}{2 \times 6} \Rightarrow l_{j2} = \mathbf{0.086 \text{ m}}$$

► **La chute de potentiel dans la roue polaire**

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} \quad (5.108)$$

$$\Rightarrow U_{j2} = 0.086 H_{j2} \quad (5.109)$$

La Figure D.11 donne la valeur de H_{j2} correspondant à $B_{j2} = 0.93 \text{ T}$ pour l'acier coulé.

$$H_{j2} = 11 \times 10^2 \text{ A/m}$$

$$\Rightarrow U_{j2} = 0.086 \times 11 \times 10^2 \Rightarrow U_{j2} = 94.6 \text{ A}$$

D'où

$$2U_p + U_{j2} = 52.16 + 94.6 \Rightarrow \mathbf{2U_p + U_{j2} = 146.76 \text{ A}} \quad (5.110)$$

5.5.9 Caractéristique des courbes magnétiques

La force magnétomotrice d'un circuit dans la marche à vide est la somme de toutes les chutes de potentiels magnétiques partielles.

$$F_{ei} = U_{j1} + 2U_z + 2U_\delta + 2U_p + U_{j2} \quad (5.111)$$

$$\Rightarrow F_{ei} = 2583.4 + 180 + 45 + 146.76 \Rightarrow F_{ei} = 2955.16 \text{ A}$$

Lorsqu'on fait varier l'intensité du courant d'excitation en marche à vide, à vitesse de rotation nominale : les flux, les différences de potentiels magnétiques et les forces magnétomotrices changent de valeur.

Les relations (5.80), (5.81), (5.83), (5.87), (5.89), (5.92), (5.95), (5.97), (5.98), (5.100), (5.103), (5.105), (5.109), (5.110), (5.111) nous permettent de tracer la caractéristique de marche à vide

$\Phi = f(F_{ei})$ ainsi que les caractéristiques partielles $\Phi_{\sigma} = f(U_{\sigma})$; $\Phi_{\delta} = f(U_{\delta})$; $\Phi = f(U_{\sigma})$; $\Phi_p = f(2U_p + U_{j2})$ en obtenant ces variables pour les différentes valeurs du flux. (Figure D.12)

5.5.10 Force magnetomotrice d'excitation à charge

A la force electromotrice longitudinale $E_1 = 277 V$ correspond un flux :

En utilisant l'équation(5.60),on trouve :

$$\Phi_1 = \frac{277}{4 \times 1.25 \times 0.96 \times 60 \times 30} \Rightarrow \Phi_1 = 0.032 \text{ Wb}$$

$$2U_{\delta} = 3105.09 \times \frac{0.032}{0.03864} \Rightarrow 2U_{\delta} = 2571.5 \text{ A}$$

Pour $B_{\delta} = 0.832 T$, on trouve à partir de la courbe $H_z = 220 A/m$

d'après l'équation (5.89),

$$2U_z = 0.04 \times 220 \Rightarrow 2U_z = 8.8A$$

L'équation (5.81) donne

$$B_{j1} = 1.23 \times 0.832 \Rightarrow B_{j1} = 1.023T$$

D'après l'équation (5.83),on trouve

$$U_{j1} = 45 A$$

D'après l'équation (5.95)

$$U_{\sigma} = 8.8 + 2571.5 + 45$$

$$\Rightarrow U_{\sigma} = 2625.3 A$$

En ajoutant la force magnetomotrice longitudinale donnée par:

$$F_{ml} = C_1 F_1 \sin \gamma \quad (5.123)$$

on trouve la force magnetomotrice totale ($U_{mtotale}$) entre deux epanouissements polaires.

A partir de la courbe de la Figure D.15 on trouve la valeur de C_1 qui est de 0,85. D'où

$$F_{ml} = 0.85 \times 231.05 \times \sin 35^\circ$$

$$\Rightarrow F_{ml} = 112.64 A$$

$$U_{mtotale} = U_{\sigma} + F_{ml} \quad (5.124)$$

$$\Rightarrow U_{mtotale} = 2625.3 + 112.64 \Rightarrow U_{mtotale} = 2737.94 A$$

A la chute de potentiel magnétique $U_{mtotale}$ correspond le flux de dispersion :

D'après l'équation(5.97),on a :

$$\Phi_{\sigma} = 9.17 \times 10^{-7} \times 2737.94$$

$$\Phi_{\sigma} = 0.0025 Wb$$

D'autre part,l'équation(5.98) permet d'avoir :

$$\Phi_p = 0.032 + 0.0025 \Rightarrow \Phi_p = 0.03451Wb$$

D'après L'équation (5.100),on a :

$$B_{\delta} = \frac{0.03451}{0.03208} \Rightarrow B_{\delta} = 1.07T$$

$$H = 4.3 \times 10^2 A/m$$

$$2U_p = 0.163 \times 4.3 \times 10^2$$

$$\Rightarrow 2U_p = 70.09 A$$

D'après l'équation(5.105),on a:

$$B_{j2} = \frac{0.03451}{2 \times 0.01844} \Rightarrow B_{j2} = 0.93 T$$

$$H_{j2} = 3 \times 10^2 A/m$$

$$U_{j2} = 0.086H_{j2} \Rightarrow U_{j2} = 0.086H_{j2} \times 3 \times 10^2 \Rightarrow U_{j2} = 25.8 A$$

$$D'où 2U_p + U_{j2} = 70.09 + 25.8 \Rightarrow 2U_p + U_{j2} = 95.89 A$$

D'où la force magnetomotrice d'excitation à la charge nominale est :

$$Fei(100\%) = U_{mtotale} + 2U_p + U_{j2} \quad (5.125)$$

$$\Rightarrow Fei(100\%) = 2737.94 + 95.89 \Rightarrow Fei(100\%) = 2833.53 A$$

Pour 25% de surcharge en courant, à tension et fréquence nominales, la force magnetomotrice devient :

$$Fei(125\%) = 3541.91 A$$

Selon la caractéristique de marche à vide, à charge nominale pour une force magnetomotrice

$$F_{ei}(100\%) = 2833.53 A$$

On trouve :

$$\Phi_0 = 0.034 Wb$$

D'après l'équation (5.60) on a :

$$E_\emptyset = 4 \times 1.25 \times 0.96 \times 60 \times 0.034 \times 30 \Rightarrow E_\emptyset = 293.76 V$$

D'où la variation de tension

$$\Delta V = \frac{(293.76 - 277.12)}{277.12} \Rightarrow \Delta V = +6 \%$$

► Calcul de l'enroulement d'excitation

L'alternateur est à excitation propre. La tension d'excitation vaut 220 V. La longueur d'un conducteur est :

$$l_{co2} = l_a + b_n \quad (5.126)$$

$$\Rightarrow l_{co2} = 0.47 + 0.071 \Rightarrow l_{co2} = 0.541 m$$

Nous choisissons pour largeur du conducteur 5 mm. La section du conducteur est calculée pour $F_{ei}(125\%)$ et une température de 125°C.

$$S_{co2} = \rho_{co2} \cdot p \cdot l_{co2} \cdot \frac{2F_{ei}(125\%)}{V_2} \quad (5.127)$$

$$\Rightarrow S_{co2} = 0.025 \times 10^{-6} \times 6 \times 0.541 \times \frac{2 \times 3541.91}{220} \Rightarrow S_{co2} = 2.6 \times 10^{-6} m^2$$

Section du conducteur $7 \times 5 \text{ mm}$

Isolation (micartite) 0.5 mm

Jeu 0.3 mm

La hauteur de l'enroulement est donnée par la Figure D.9

$$h_{en} = 0.09 m$$

Calcul du nombre réalisable de spires par pôle :

$$\frac{N_2}{2} = \frac{90}{7 + 0.5 + 0.3}$$

$$\Rightarrow N_2 = 24 \text{ spire/paire de pôles}$$

D'où le courant d'excitation à charge nominale :

$$I_2 = \frac{F_{ei}(100\%)}{N_2} \quad (5.128)$$

$$\Rightarrow I_2 = \frac{2833.53}{24} \Rightarrow I_2 = 118.06 \text{ A}$$

La longueur totale de l'enroulement d'excitation vaut :

$$L_{co2} = p \cdot N_2 \cdot 2l_{co2} \quad (5.129)$$

$$\Rightarrow L_{co2} = 6 \times 24 \times 2 \times 0.541 \Rightarrow L_{co2} = 155.8 \text{ m}$$

La masse de cet enroulement est :

$$m_{co2} = \rho_{cu} \cdot L_{co2} \cdot S_{co2} \quad (5.130)$$

$$\Rightarrow m_{co2} = 8.9 \times 10^3 \times 155.8 \times 2.6 \times 10^{-6} \Rightarrow m_{co2} = 3.6 \text{ kg}$$

La résistance de l'enroulement d'excitation rapportée à 75 °C est :

$$R_2 = \rho \frac{L_{co2}}{S_{co2}} \quad (5.131)$$

$$\Rightarrow R_2 = \frac{0.0216 \times 10^{-6} \times 155.8}{2.6 \times 10^{-6}} \Rightarrow R_2 = 1.2 \Omega/\text{phase}$$

5.5.11 Choix d'un mode d'excitation

Le courant d'excitation est fourni par une génératrice triphasée de puissance nominale :

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \quad (5.132)$$

$$\Rightarrow P_2 = 220 \times 118.06 \Rightarrow P_2 = 25973.2 \text{ VA ou } 25.97 \text{ kVA}$$

Son rotor que porte l'arbre de l'alternateur a des pôles lisses (2 paires de pôles) et constitue l'induit de l'excitatrice. Le courant est injecté au rotor de l'alternateur après redressement par pont de diodes.

En marche à vide, le stator de l'excitatrice est alimenté par une batterie d'accumulateur. A charge, l'induit de l'alternateur par l'intermédiaire d'un transformateur et de diodes se substitue aux accumulateurs.

Selon les variations de la charge, on peut changer l'intensité du courant à l'aide du rhéostat de champ R_h . La variation de I_2 correspondante doit amener la tension de phase de l'alternateur à 220 V.

Les montages redresseurs seront constitués de diodes (montage parallèle double) pouvant supporter des intensités de l'ordre d'une centaine d'ampères et des tensions inverses de :

$$V_{i_{max}} = 2V_m \cos \frac{\pi}{2m} \quad (5.133)$$

$$\Rightarrow V_{i_{max}} = 2 \times 220 \sqrt{2} \cos \frac{\pi}{6}$$

$$\Rightarrow V_{i_{max}} = 538.89 \text{ V}$$

Nous préférons ce mode d'excitation aux autres parce qu'il nous évite les frais d'entretien qu'entraînerait l'utilisation de balais et collecteurs. Ceux-ci devant être nettoyés régulièrement. La grande durée de vie des diodes augmente la fiabilité du système.

5.5.12 Pertes et échauffements

Toute transmission ou transformation d'énergie s'accompagne de pertes. Elles se traduisent bien souvent par un échauffement de la machine pouvant amener à sa détérioration. L'estimation théorique des pertes permettra d'évaluer le rendement de l'alternateur bien avant sa construction et de prévoir un système adéquat d'évacuation de chaleur.

Calcul des pertes

► Pertes dans le cuivre

Les pertes par effet Joule sont ramenées à la température de fonctionnement qui est de 75°C. Les pertes dans l'enroulement d'induit s'élèvent à:

$$P_1 = 3R_1 \cdot I_1^2 \quad (5.134)$$

$$\Rightarrow P_1 = 3 \times 0.004 \times 192.53^2 \Rightarrow P_1 = 444.81 \text{ W}$$

Celles dans le rotor sont de l'ordre de :

$$P_2 = R_2 \cdot I_2^2 \quad (5.135)$$

$$\Rightarrow P_2 = 1.2 \times 118.06^2 \Rightarrow P_2 = 16725.79 \text{ W}$$

D'où les pertes dans le cuivre : **P=17170.6 W**

► Pertes additionnelles

Les pertes additionnelles sont évaluées à l'aide de la Figure D.16. L'alternateur est de grandeur petite avec tôles terminales soudées ensembles et sans renforcement.

La courbe (c) donne pour

$$\frac{A_1 \tau_p^{1.5}}{\delta} = 15.9 \times 10^5 \text{ A/m} \quad (5.136)$$

$$\frac{P_{ad}}{\pi D} = 3.5 \times 10^2 \quad (5.137)$$

$$\Rightarrow P_{ad} = 3.5 \times 10^2 \pi D$$

$$\Rightarrow P_{ad} = 3.5 \times 10^2 \times 3.14 \times 0.5 \Rightarrow P_{ad} = 549.5 \text{ W}$$

► Pertes dans le fer

L'induit se compose de tôles de 0.5 mm d'épaisseur et de chiffre de pertes:

$$P_{Fe} = 1.7 \text{ W/kg}$$

La masse de la culasse d'induit est :

$$m_{j1} = \rho_{Fe} \cdot k_f \cdot l_{Fe} \left[\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} + h_z \right)^2 \right] \quad (5.138)$$

$$\Rightarrow m_{j1} = 7.6 \times 10^3 \times 0.95 \times 0.15 \left[\left(\frac{0.59}{2} \right)^2 - \left(\frac{0.5}{2} + 0.0201 \right)^2 \right] \Rightarrow m_{j1} = 15.16 \text{ kg}$$

Les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans la culasse d'induit sont données par :

$$P_{h+wj} = \sigma_h \cdot f \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} \cdot k_{hj} \cdot 10^{-2} + \sigma_w \cdot (s \cdot f \cdot B_{j1}) \cdot m_{j1} \cdot k_{wj} \cdot 10^2 \quad (5.139)$$

D'après le Tableau D.5, $\sigma_h = 2.85$ et $\sigma_w = 4.4$

D'après les Figures D.17 et D.18, Les facteurs d'hystérésis sont tels que :

$$k_{hj} = 1.09 \text{ et } k_{wj} = 1.35$$

D'où,

$$P_{h+wj} = 2.85 \times 60 \times 1.023^2 \times 15.16 \times 1.09 \times 10^{-2} + 4.4 \times (0.5 \times 10^{-3} \times 60 \times 1.023) \times 15.16 \times 1.35 \times 10^2$$

$$\Rightarrow P_{h+wj} = 305.93 \text{ W}$$

► Calcul des pertes dans le fer des dents

La masse des dents est :

$$m_z = \rho_{Fe} \cdot k_f \cdot l_{Fe} \cdot N_1 \cdot Z_{1/3} \cdot h_z \quad (5.140)$$

Avec $Z_{1/3} = 0.0059$

$$\Rightarrow m_z = 7.6 \times 10^3 \times 0.95 \times 0.15 \times 30 \times 0.0059 \times 0.0201$$

$$\Rightarrow m_z = 3.85 \text{ kg}$$

Les pertes dans les dents sont calculées comme suit :

$$P_{h+w} = P_{Fe} \cdot B_{mz}^2 \cdot m_z \quad (5.141)$$

Avec $B_{mz} = 1.5 \text{ T}$

$$\Rightarrow P_{h+w} = 1.7 \times 1.5^2 \times 3.85 \Rightarrow P_{h+w} = 14.72 \text{ W}$$

► Pertes superficielles

Les pertes superficielles spécifiques sont données par l'équation:

$$P_{sup} = K_{sup} \cdot (N_1 \cdot 60 \cdot N / 100000)^{1.5} \cdot (B_0 \cdot \tau_z)^2 \cdot 10^6 \quad (5.142)$$

Les épanouissements polaires sont en tôles de 1 mm d'épaisseur. Sur la base d'expériences effectuées sur des induits à encoches ouvertes, les constructeurs prennent $K_{sup} = 4.6$.

B_0 est l'amplitude de la variation de l'induction et se calcule ainsi :

$$B_0 = B_b \cdot k_c \cdot B_\delta \quad (5.143)$$

La Figure D.19 donne la valeur de B_b pour $\frac{b_z}{\delta} = 4.6$

On a : $B_p = 0.35$

$$\Rightarrow B_0 = 0.35 \times 1 \times 0.832 \Rightarrow B_0 = 0.291 T$$

$$\Rightarrow P_{sup} = 4.6 \times (30 \times 60 \times 600/100000)^{1.5} \times (0.291 \times 0.0145)^2 \cdot 10^6$$

$$\Rightarrow P_{sup} = 2906.02 W$$

Avec $\frac{b_z}{\delta} = 4.6$ et $\frac{B_p}{\tau_p} = 0.75$ on trouve à la Figure D.20

$$\frac{P_{supmoyenne}}{P_{sup}} = 0.45$$

D'où

$$P_{supmoyenne} = 1307.7 W/m^2$$

La surface de l'épanouissement polaire est :

$$A_p = 2p \cdot b_p \cdot l_p \quad (5.144)$$

$$\Rightarrow A_p = 2 \times 6 \times 0.0975 \times 0.47 \Rightarrow A_p = 0.55 m^2$$

D'où les pertes superficielles totales sont :

$$P_{sup tot} = P_{supmoyenne} \cdot A_p \quad (5.145)$$

$$\Rightarrow P_{sup tot} = 1307.7 \times 0.55 \Rightarrow P_{sup tot} = 719.23 W$$

► Pertes par ventilation et frottement dans les paliers

La Figure D.21 nous permet d'affirmer que ces pertes seront inférieures à 0.25 % de la puissance apparente. Les pertes par ventilation et frottement peuvent être évaluées à 400 W.

Pertes	Puissance(W)
Pertes dans le cuivre de l'induit	444.81
Pertes dans le cuivre de l'inducteur	16725.79
Pertes additionnelles	549.5
Pertes dans le fer de la culasse de l'induit	305.93
Pertes dans le fer des dents	14.72
Pertes superficielles	719.23
Pertes par ventilation et frottement	400
Pertes totales	19159.98

D'où le rendement de l'alternateur :

$$\eta = \frac{128 \times 10^3}{128 \times 10^3 + 19159.98} \Rightarrow \eta = 86.98 \%$$

Calcul des échauffements

► Ventilation

Elle sera assurée par un ventilateur porté par l'arbre de la turbine. Le fort courant d'air qu'il crée évacuera une grande partie de la chaleur produite par le stator, le rotor de l'alternateur et les machines auxiliaires. La quantité de chaleur produite par ces dernières étant négligeable par rapport à celle générée dans le cuivre et le fer de l'alternateur proprement dit.

Considérons un ventilateur de diamètre extérieur $d_{vent} = 0.2 \text{ m}$

Calcul de la vitesse périphérique :

$$V_{vent} = \frac{\pi \cdot d_{vent} \cdot N}{60} \quad (5.146)$$

$$\Rightarrow V_{vent} = \frac{3.14 \times 0.2 \times 600}{60} \Rightarrow V_{vent} = 6.28 \text{ m/s}$$

Le rapport $\frac{V_{rot}}{V_{vent}}$ est donné à la Figure D.22

On a :

$$\frac{V_{rot}}{V_{vent}} \times 100 = 4 \quad (5.147)$$

On en déduit la vitesse de l'air dans les canaux de ventilation du stator :

$$\Rightarrow V_{rot} = 0.04V_{vent} \Rightarrow V_{rot} = 0.2512 \text{ m/s}$$

La surface d'entrée libre des tôles du stator est :

$$A_{st} = (\pi D - N_1 b_z) b_{vt} \cdot n_{vt} \quad (5.148)$$

$$\Rightarrow A_{st} = (3.14 \times 0.5 - 30 \times 0.0089) \times 0.010 \times 2 \Rightarrow A_{st} = 0.026 \text{ m}^2$$

Le débit d'air entrant dans le stator et léchant les flancs de l'enroulement du rotor est :

$$F_{ro} = V_{rot} \cdot A_{st} \quad (5.149)$$

$$\Rightarrow F_{ro} = 0.2512 \times 0.026 \Rightarrow F_{ro} = 0.0065 \text{ m}^3/\text{s}$$

Considérons le débit d'air entrant dans la turbine égale à environ $0.0065 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un diamètre de conduite égale 50 cm, la vitesse moyenne de l'air dans cette conduite est tel que:

$$V_a = \frac{0,223}{\pi \times \frac{0,5^2}{4}} \Rightarrow V_a = 0.03 \text{ m/s}$$

Conductivité thermique résultante de l'isolation des encoches

L'isolation du conducteur statorique comprend 1 mm de papier imprégné et 1 mm ou (10^{-3}) m de coton imprégné, chaque couche ayant respectivement pour conductivité thermique :

$$\lambda_1 = 0.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}, \quad \lambda_2 = 0.24 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Le conducteur isolé est séparé du fer de l'encoche par une gaine de micartite ($\lambda_3 = 0.24 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) et une couche d'air ($\lambda_4 = 0.028 \text{ W/m}^\circ\text{C}$).

Le coefficient de conduction de Cu à la surface intérieure de la gaine est :

$$\alpha_{\lambda_{1-2}} = \frac{\frac{\lambda_1}{10^{-3}} \times \frac{\lambda_2}{10^{-3}}}{\frac{\lambda_1}{10^{-3}} + \frac{\lambda_2}{10^{-3}}} \quad (5.150)$$

$$\Rightarrow \alpha_{\lambda_{1-2}} = \frac{\frac{0.7}{10^{-3}} \times \frac{0.24}{10^{-3}}}{\frac{0.7}{10^{-3}} + \frac{0.24}{10^{-3}}} \Rightarrow \alpha_{\lambda_{1-2}} = 178.72 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Du cuivre à la surface de la gaine on a :

$$\alpha_{\lambda_{1-3}} = \frac{\alpha_{\lambda_{1-2}} \times \frac{\lambda_3}{10^{-3}}}{\alpha_{\lambda_{1-2}} + \frac{\lambda_3}{10^{-3}}} \quad (5.151)$$

$$\Rightarrow \alpha_{\lambda_{1-3}} = \frac{178.72 \times \frac{0.24}{10^{-3}}}{178.72 + \frac{0.24}{10^{-3}}} \Rightarrow \alpha_{\lambda_{1-3}} = 102.44 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Du cuivre à la paroi de l'encoche :

$$\alpha_\lambda = \alpha_{\lambda_{1-4}} = \frac{\alpha_{\lambda_{1-3}} \times \frac{\lambda_4}{10^{-3}}}{\alpha_{\lambda_{1-3}} + \frac{\lambda_4}{10^{-3}}} \quad (5.152)$$

$$\Rightarrow \alpha_{\lambda} = \frac{102.44 \times \frac{0,028}{10^{-3}}}{102.44 + \frac{0,028}{10^{-3}}} \Rightarrow \alpha_{\lambda} = 21.99 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

La distance du cuivre à la paroi de l'encoche est égale à 5.5 mm

La conductivité thermique résultante est :

$$\lambda_{res} = 0.0055 \times 21.99 \Rightarrow \lambda_{res} = 0.121 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

Transmission de chaleur par rayonnement

D'après la loi de Stefan Boltzmann, la quantité de chaleur rayonnée par unité de surface en une seconde est :

$$q_s = 5.7 \times 10^{-8} \nu \cdot (T^4 - T_a^4) \quad (5.153)$$

Où T est la température absolue du corps et T_a la température ambiante

On sait que pour du fer sombre, $\nu = 0.95$

$$T = 348.15 \text{ }^{\circ}\text{K} ; T_a = 298.15 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$\Rightarrow q_s = 5.7 \times 10^{-8} \times 0.95 \cdot (348.15^4 - 298.15^4) \Rightarrow q_s = 367.648 \text{ W/m}^2$$

Convection extérieure

La turbine est entourée d'eau à 20°C alors que sa température de fonctionnement est de 75°C. Le refroidissement par l'eau de la conduite forcée sera donc considérable, l'eau ayant une capacité calorifique plus grande que l'air.

La courbe d'échauffement de la turbine aura la même allure que celle de l'échauffement d'un corps homogène.

Si nous supposons qu'à l'instant t=0, l'alternateur est mis en marche à la température ambiante, sa courbe d'échauffement sera :

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{max} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.154)$$

$$\text{Avec } \Delta\theta_{max} = 75 - 20 = 55^{\circ}\text{C}$$

Après un certain temps $t \gg \tau$, la température de l'alternateur se stabilise:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{max} = 55^{\circ}\text{C}$$

5.6 Régulation

5.6.1 Introduction

Le fonctionnement d'une turbine dépend essentiellement de la mise en place d'un système de régulation. Ce dernier doit permettre d'adapter le régime de vitesse de la turbine en fonction de la consommation électrique et du débit à l'entrée de la prise d'eau. Cette régulation doit permettre de maintenir la vitesse de rotation la plus constante possible afin que le réseau reste calé sur sa fréquence propre, en l'occurrence 60 Hz.

Il existe deux types de régulation :

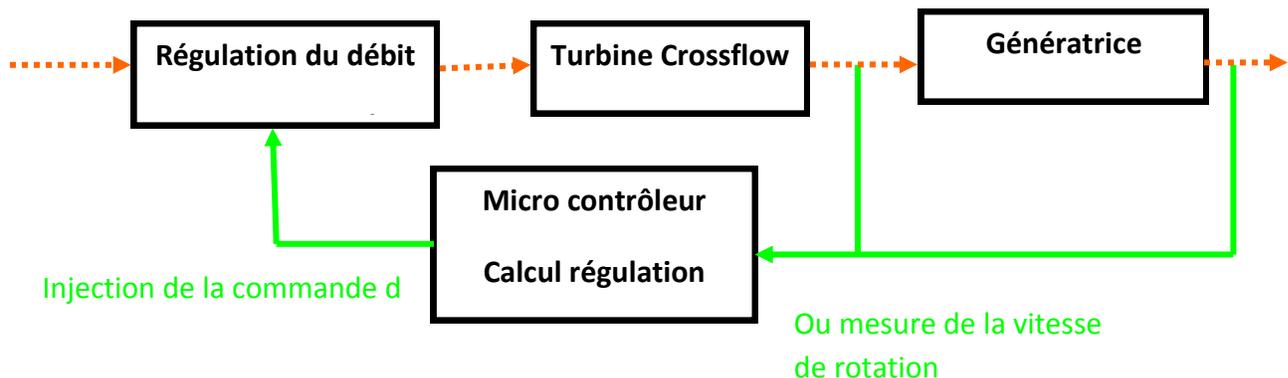
La régulation « vitesse débit » et la régulation « charge fréquence »

Régulation « vitesse débit »

Elle consiste à adapter le débit de l'eau afin de réguler la vitesse de rotation. Le contrôle du débit se fait par l'intermédiaire de pointeaux amovibles dans les injecteurs par deux volets rotatifs au niveau de l'injection d'eau de notre turbine qui est une turbine Crossflow.

Comme le contrôle des vannes de notre aménagement se fait par l'intermédiaire de vérins qui sont commandés sur le principe de la rétroaction. La vitesse de rotation en sortie de turbine est mesurée à l'aide d'un capteur, l'information étant ensuite transmise à un microcontrôleur qui calcule la course à donner aux vérins pour adapter le débit. On va utiliser un régulateur de type PID, c'est-à-dire Proportionnelle Intégrale Différentielle qui assurent une correction à la fois précise et rapide. La figure 5.2 donne un schéma de principe de la régulation « vitesse débit »

Figure 5.5 : Principe de régulation « vitesse débit »



Lorsqu'une retenue d'eau est présente, la régulation « vitesse débit » présente l'avantage de consommer l'eau de façon intelligente. En effet, quand la demande du réseau est faible, cette méthode permet d'économiser de l'énergie et de la stocker sous forme d'énergie potentielle hydraulique. La commande sera faite de façon automatique et nécessite la programmation d'un micro contrôleur, l'implantation de capteur et l'intervention d'un système de conversion numérique analogique.

Régulation « charge fréquence »

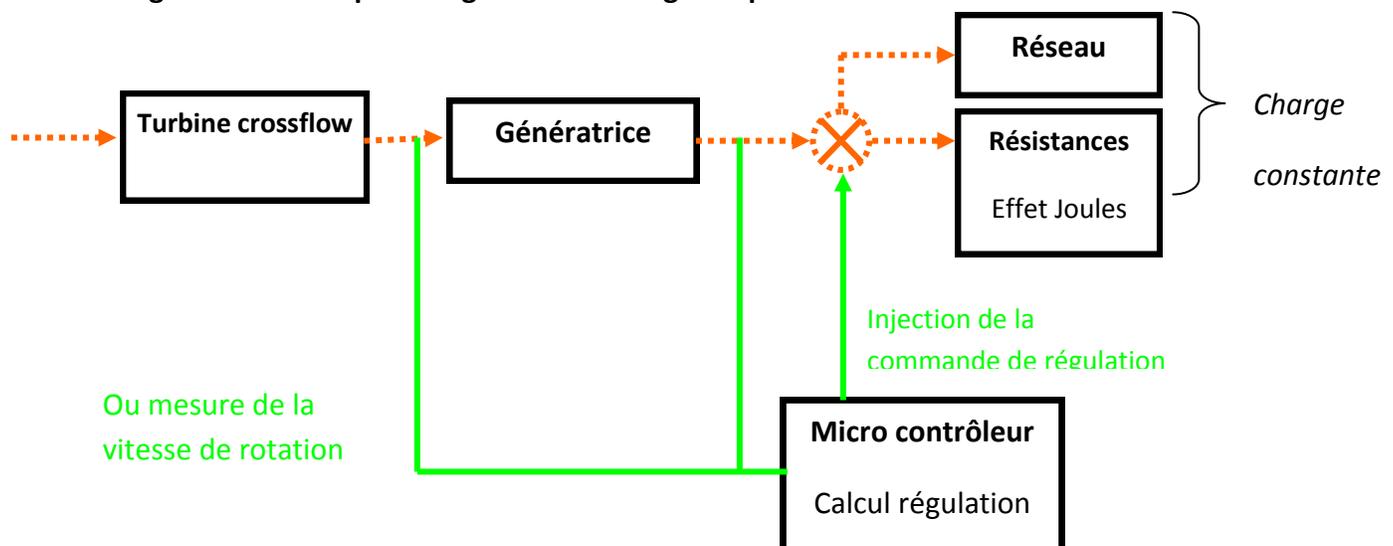
Elle agit afin de garder constante la charge électrique du réseau, sans système de contrôle du débit. La régulation s'effectue par dissipation du surplus d'énergie dans des charges résistives. Toute l'énergie non consommée est redirigée dans une batterie de résistances. La centrale tourne donc toujours au maximum de sa capacité, produisant sa puissance nominale. La figure 5.3 donne le schéma de principe.

De la même manière que pour la régulation « débit vitesse », le délestage de l'énergie excédentaire peut s'effectuer de manière automatique ou de façon manuelle. Nous choisissons de le faire de façon automatique.

Nous présentons ainsi les Caractéristiques du régulateur de fréquence

- ▶ Fréquence de référence est de 60 HZ
- ▶ Tolérances en fréquence de +5% et de -1%
- ▶ Il convient de faire remarquer qu'un régulateur de tension sera présente dont les tolérances en tensions admises sont de +/- 5 %.

Figure 5.6 : Principe de régulation « Charge fréquence »



5.7 Les systèmes auxiliaires

Dès qu'on parle de systèmes auxiliaires, on voit tout l'appareillage électrique et électromécanique essentiel à la marche, à l'exploitation et à l'entretien du matériel principal de production. Ce sont principalement : les équipements de mécanique lourde, des équipements de services auxiliaires mécaniques et électriques, les équipements de système auxiliaire à courant continu, les équipements nécessaires à la transformation de l'énergie électrique. On y trouve aussi des équipements (vanne) qui permettent d'isoler un groupe turbine-alternateur du bief aval, en cas d'inspection ou de réparation, des équipements de manutention sont nécessaires pour réaliser le montage et l'entretien des alternateurs, turbines et autres pièces de la centrale. La disposition et la capacité des équipements de manutention (pont roulant, grues) sont dictées par l'encombrement et la masse des pièces les plus importantes.

5.7.1 Systèmes auxiliaires mécaniques

Les services auxiliaires mécaniques qui seront présente dans notre aménagement sont les suivants :

- le système d'eau de refroidissement dont la fonction peut être l'une ou plusieurs des activités suivantes : récupération de la chaleur dégagée par l'alternateur, refroidissement d'huile des paliers du groupe ou du transformateur de puissance ; ce système comprend principalement les éléments suivants : pompe, tuyauterie, filtres, robinets et soupapes ;
- le système d'air de service dont la fonction est de fournir l'air comprimé nécessaire à l'entretien ; il comprend les éléments suivants : compresseur d'air, réservoir, tuyauterie, filtre, soupape ;
- le système de vidange et de remplissage des groupes dont la fonction est de vidanger un groupe en vue de travaux d'inspection, d'entretien ou de réparation ou de le remplir afin de permettre son démarrage ;
- le système de drainage dont la fonction est de canaliser et d'évacuer les infiltrations et les fuites d'eau qui se produisent dans la centrale ; ce système comprend : pompe, tuyauterie et caniveau, puisard ;
- le système de manutention d'huile dont la fonction est de fournir l'huile en quantité et qualité adéquate pour les besoins des groupes turbine-alternateur ou de certaines vannes à opération hydraulique ;
- le système de protection contre l'incendie qui peut comprendre un système de distribution d'eau d'incendie alimentant des extincteurs automatiques et des boyaux d'incendie ;
- les systèmes d'eau potable et d'eau de service qui fournissent l'eau nécessaire aux besoins du personnel et à l'entretien de la centrale ;

- le système de ventilation dont la fonction est de maintenir une atmosphère saine dans la centrale.

5.7.2 Systèmes auxiliaires électriques

Nous allons utiliser un tableau BT puisque la tension de sortie des alternateurs sont de 480 V, un tableau BT subdivisé en deux sections de jeux de barres (seulement en cas d'entretien). Ce tableau va être alimenté par les deux alternateurs de la centrale. A partir de ce même tableau nous allons alimenter les accessoires de la centrale qui sont en 480 V. Pour les autres accessoires nous allons utiliser deux transformateurs type sec pour usage intérieur 480 V – 240/120 V. Parmi les deux transformateurs, un sera utilisé en cas de défaillance de l'autre. Un groupe électrogène de 6 KVA sera mise en place en cas de défaillance des transformateurs, il sera là aussi comme groupe de secours pouvant servir à l'alimentation de la centrale en cas où les groupes ne fonctionnent pas ou le circuit du réseau alimentant la centrale n'est pas alimenté. A l'aide du même tableau BT, la puissance produite sera évacuée vers les transformateurs de réseau, chacun ayant une puissance correspondant à celle d'un groupe. Il s'agit de deux transformateurs de 160 KVA 480v – 12.47KV. La sortie des transformateurs de puissance va alimenter un autre tableau avec jeu de barres et à partir de ce tableau va partir une ligne MT en 12.47 KV qui va être branché sur la ligne du réseau métropolitain alimentant la commune de Léogane. Une ligne MT sera construite entre le barrage et la centrale. Un réseau de mise à la terre sera construit au niveau de la centrale. Ce réseau de mise à la terre sera mis sur pied dans la cour ou sera construit notre centrale. Nous utiliserons des sectionneurs de mise à la terre, transformateur de courant et de tension pour effectuer les mesures.

Un groupe avec 2 inverters et batteries ayant une autonomie suffisante pour l'alimentation de la centrale, l'éclairage et certains services auxiliaires. Ce groupe est nécessaire en cas où il y aurait un problème au niveau de la centrale, aucune alimentation n'est disponible.

5.7.3 Systèmes auxiliaires électriques à courant continu

Nous avons déjà prévu la présence d'un groupe de secours qui est un groupe électrogène mais en cas de défaut d'alimentation ou de déclenchement du réseau il est nécessaire de prévoir une alimentation de secours sur batteries permettant d'assurer les fonctions vitales de mise en sécurité de l'installation. De plus les systèmes de contrôle-commande fonctionnent en général en courant continu 24 V ou 48 V. Pour notre alimentation en courant continu de la centrale il est indispensable de prévoir 2 redresseurs par batterie et d'ajouter le système d'alimentation pour les instruments de contrôle et de mesure ainsi que pour les systèmes de communication (24/48 V).

5.8 Systèmes et tableaux de commandes

Les systèmes et les tableaux de commandes garantissent la sécurité des équipements et du personnel et permettent le contrôle et le pilotage sur place ou à distance d'un groupe.

Ceux qui seront utilisés dans notre aménagement sont les suivants :

- les tableaux de commande et de contrôle équipés d'appareils de mesure, de contrôle et de commande
- les tableaux d'automatisme et de protection
- les appareils de surveillance et d'enregistrement des mesures, position et de signalisation

Quand on parle de tableaux de commande et de contrôle équipés d'appareils de mesure, ce sont des tableaux indispensables à la centrale. Ces tableaux sont nécessaires pour aider à avoir le contrôle de la centrale, d'avoir à tout instant la fréquence du réseau, la tension ainsi que d'autres paramètres pouvant aider à la régulation.

Ces appareils de mesure sont les suivantes :

- ▶ 1 synchronoscope pour la synchronisation des deux alternateurs
- ▶ 2 fréquencemètres pour des mesures de fréquence
- ▶ 6 ampèremètres pour mesurer différentes valeurs de courants
- ▶ 6 voltmètres et commutateur
- ▶ 2 wattmètres
- ▶ 2 compteurs d'heures
- ▶ plusieurs thermomètres

Les tableaux d'automatisme et de protection possèdent les instruments indispensables à l'opération de la centrale et les éléments de protection nécessaire à la sécurité de la centrale. Ces éléments de protection seront placés dans deux armoires (dont une par groupe) placées à l'intérieur du bâtiment de la centrale.

Chaque armoire aura les éléments de protection suivants :

- ▶ Bornier d'arrivée
- ▶ Bornier départ régulation
- ▶ 6 fusibles HPC + réserve
- ▶ Relais contrôle tension-fréquence (pour le contrôle en surtension et en sous-fréquence)
- ▶ 1 bouton d'arrêt d'urgence
- ▶ Disjoncteur général magnétothermique

- ▶ Jeu de barre
- ▶ Contacteur tripolaire (commandé par la régulation et les sécurités)
- ▶ 3 disjoncteurs triphasés
- ▶ Départ éclairage du local
- ▶ Protection parafoudre classe 1,5 pour l'automatisme
- ▶ Départ prise et chargeur de batterie protection 16 A
- ▶ Bornier de départ
- ▶ 2 Compteurs d'énergie produite
- ▶ Commande de mise en service et signalisation diverses

5.8.1 Alimentation électrique de l'évacuateur/commande

L'évacuateur de crue est considéré comme l'une des parties les plus importantes de la centrale. Parce-que le dysfonctionnement immédiat de l'évacuateur peut causer la destruction de la centrale en cas de crue. Un contrôle est effectuée au niveau de l'évacuateur afin d'ajuster le débit et de réguler la vitesse de la turbine. D'où l'importance de traiter avec précaution l'alimentation et la commande des vannes. Aujourd'hui les vannes sont commandées de façon automatique mais dans notre centrale Les vannes comporteront une commande manuelle pour l'éventualité d'un manque de courant électrique.

On prévoit deux sources d'alimentation :

- ▶ Alimentation par une ligne MT en provenance de la centrale
- ▶ Alimentation en secours par un groupe électrogène diesel (6 kVa) situé à proximité du barrage

5.8.2 Commande des vannes du barrage

Les vannes du barrage seront commandées de façon automatique. Un capteur de mesure du niveau amont sera utilisé pour donner les ordres d'ouverture ou de fermeture.

5.8.3 Alimentation électrique des vannes de la prise d'eau

Les vannes de la prise d'eau seront alimentées par la ligne MT construite entre la centrale et le barrage.