UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Etude des possibilités de réalisation d'une centrale hydroélectrique : cas de rivière Ruvyironza

Madidi, Désiré; Ndayishimiye, Germain; Sous la direction de: Ir. Vyumvuhore, Jérôme

2006-01
UB, ITS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2326

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI
INSTITUT TECHNIQUE SUPERIEUR
DEPARTEMENT DU GENIE ELECTROMECANIQUE

ETUDE DES POSSIBILITES DE REALISATION D'UNE CENTRALE HYDROELECTRIQUE : CAS DE LA RIVIERE RUVYIRONZA.

par

MADIDI Désiré
et
NDAYISHIMIYE Germain

Sous la direction de:
Ir. VYUMVUHORE Jérôme

Projet de fin d'études présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du grade d'**Ingénieur Industriel en Génie Electromécanique**

Bujumbura, Janvier 2006

DEDICACE

A Dieu tout puissant ;

A mes regrettés parents ;

A toi ma petite sœur Pascaline décédée si jeune ;

A vous frères et sœurs ;

A vous parentés et amis ;

A mes neveux et nièces ;

A tous ceux qui me sont chers ;

Je dédie ce travail

Désiré MADIDI

DEDICACE

A mon regretté père ;

A mes regrettés frères ;

Vous êtes partis trop tôt ;

Vous auriez pu savourer le fruit de vos efforts ;

Pour vous, je garde un vif regret de notre séparation
et je resterai ferme sur les actions qui vous
honorent ;

A ma chère mère qui m'a éduqué dans la dignité humaine,

A mes frères et belles sœurs ;

A mes neveux et nièces ;

A tous ceux qui se réjouissent de ma réussite ;

Je dédie ce travail

NDAYISHIMIYE Germain

REMERCIEMENTS

Qu'il nous soit permis d'exprimer notre gratitude à l'université du Burundi et à tous les professeurs de l'Institut Technique Supérieur pour la formation tant scientifique que humaine dont ils nous ont doté.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent plus particulièrement à Monsieur VYUMVUHORE Jérôme qui a accepté de diriger ce mémoire. Ses conseils riches et très constructifs, ses disponibilités nous ont été d'une utilité sans comparaison.

Nos remerciements s'adressent aussi :

- Aux familles MIKUMBI Salvator, KANDIKANDI P. Claver, NIYOYUNGURUZA Mamert et Abdalahaman Dominique
- Aux amis, aux chers étudiants en particulier ceux de notre promotion avec qui nous avons partagé et vécu plusieurs saisons.

Enfin à toute personne qui, de près ou de loin a intervenu d'une manière ou d'une autre pour que cette œuvre soit à sa fin.

A vous tous nous disons grand merci.

TABLE DES MATIERES

Dédicace i
Remerciements iii
Table des matières iv

CHAP I : Introduction générale 1
CHAP II : Implantation des ouvrages 4
II.1.Les éléments composant une installation d'une centrale 4
II.2.Réseau de transport et de distribution 5
II.3. Critères d'aménagement 6
II.4.Indications pour la construction des ouvrages hydrauliques 6
4.1.Service des installations hydrauliques 6
4.2.Maintien en état 7
II.5.Evacuateur de fond 8
5.1.Description 8
5.2.Exploitation 8
II.6.Le barrage 8
6.1.Le choix de l'emplacement 8
6.2.Ouvrages 10
6.3.Equipements électromécaniques 10
6.4.Fonctionnement d'un déversoir à crête circulaire 11
II.7.L'ouvrage de prise d'eau et les équipements électromécaniques 11
7.1.Ouvrages et équipements électromécaniques 11
7.2.Equipements mécaniques 12
II.8.Galerie d'amenée 12
II.9.Cheminée d'équilibre 13
II.10.Conduite forcée 13
10.1. Détermination des dimensions de la conduite forcée 15

CHAP III: Dimensionnement hydraulique des ouvrages 16
III.1.Les données de base 16
III.2.Dimensionnement hydraulique 17
2.1.Le barrage 17
2.2.Canal de liaison prise d'eau- dessableur 18
2.3.Dessableur 20
2.4.La galerie d'amenée 23
2.5.La cheminée d'équilibre 28
2.6.La conduite forcée 29

CHAP IV : Calcul de la puissance installée 32
IV.1. Introduction 32
IV.2.Les différentes hauteurs de chute 32
IV.3.Puissance hydraulique 33
IV.4.Calcul de la puissance nette installée 34
IV.5.Calcul de la puissance totale installée 35
IV.6.Choix d'une turbine 35
6.1.Notion de vitesse spécifique 35
6.2.Dimensionnement de la turbine Francis selon la méthode de F de Siervo et F de Leva 37

CHAP V : Dimensionnement et choix de l'alternateur 44
V.1.Introduction 44
V.2.Caractéristiques des alternateurs 44
V.3.Calcul de la puissance aux bornes de l'alternateur 45
3.1.Pertes et rendement d'un alternateur 45
3.2.Puissance électrique en courant alternatif 46

CHAP VI : Choix d'un transformateur 49
VI.1.Introduction 49

VI.2.Tensions 50
VI.3.L'intensité 50
VI.4.Le rendement et les pertes du transformateur 51
VI.5.Transformateur triphasé 52
5.1.Constitution générale 52
5.2.Niveau de transformation 52
VI.6.Caractéristiques des transformateurs choisis 53
6.1.La tension nominale U_n 53
6.2.La puissance nominale 53
6.3.Le courant nominal I_n 53
VI.7.Disposition et mise en parallèle des deux transformateurs 54
VI.8.Interconnexion au réseau existant 55
VI.9.Conclusion 55

CONCLUSION GENERALE 56
BIBLIOGRAPHIE 58

CHAP I : INTRODUCTION ET PRESENTATION GENERALE

L'énergie hydraulique constitue une source d'énergie localement disponible sur une longue période de l'année. Si les précipitations sont régulières, elle s'avère compétitive par rapport aux sources d'énergie telles que les hydrocarbures qui, souvent, sont sujettes à différentes conjonctures économiques ou sociales (guerres, embargo, etc.). Il va sans dire que la diversification des sources d'énergie (plusieurs cours d'eau) est un gage de sécurité énergétique.

Les investissements pour l'équipement de petites chutes d'eau doivent être encouragés par la simplification et l'accélération des formalités administratives. En plus, tout doit être mis en œuvre pour que les ressources d'énergie soient exploitées rationnellement. A titre d'exemple, en milieu rural, l'artisanat manque d'énergie nécessaire pour son développement. Ceci ayant une répercussion sur la création d'emplois.

La crise de l'énergie liée à l'augmentation incessante du prix du pétrole a entraîné au niveau mondial un regain d'intérêt pour toutes les ressources énergétiques disponibles. L'hydroélectricité connaît un essor spectaculaire. Aujourd'hui, il n'y a pas de pays disposant de ressources hydrauliques encore mobilisables qui ne se préoccupe de développer l'hydroélectricité basse puissance bien que de grands aménagements soient potentiellement réalisables.

Les pays industrialisés procèdent à nouveau à l'installation de tels équipements après la révision des conceptions de rentabilité qui avait limité la valorisation de l'énergie hydraulique au profit des hydrocarbures.

La fabrication d'appareillages électromécaniques robustes et standardisés est également développée, surtout sur la plan de l'usinage à l'aide des machines à commande numérique.

Cependant, l'utilisation de l'énergie hydraulique pose des problèmes au niveau de l'impact environnemental. Un aménagement hydroélectrique devrait être accompagné d'une possibilité d'utilisation des lacs de retenue, soit pour les loisirs, la pêche et veiller à ce qu'ils ne soient un nid de parasites qui nuisent à la santé publique (prolifération de moustiques, des vers qui sont des vecteurs de certains microbes).

Notre étude porte sur la rivière Ruvyironza . Elle est située dans la commune Giheta en province de Gitega.

Compte tenu du manque de centrales en quantité suffisante dans cette région, ce qui est le cas pour tout le pays, l'idée majeur de ce travail sera de pouvoir calculer les prévisions qui s'imposent en vue de la réalisation d'une centrale sur la rivière Ruvyironza qui pourra alimenter le centre de Giheta, éventuellement le public environnant sans oublier le Collège communal de Giheta.

Nous ferons donc une étude d'avant-projet en essayant d'être le plus prudent car toute sous-estimation entraînerait un grand nombre de problème pendant la réalisation de ladite centrale.

Tout surdimensionnement non seulement cause le problème de réalisation mais aussi des frais supplémentaires.

Les besoins à satisfaire sont :

- Centre communal de Giheta
- Collège communal de Giheta
- Centre de santé de Giheta
- Eclairage public sur une courte distance.

Avec les données hydrologiques recueillies au Ministère de l'Energie et des Mines, nous avons pu calculer le débit moyen sur une période de 1974-1981. Par l'analyse du site qui a été visité, on a pu estimer la hauteur brute de l'aménagement.

Voici quelques données hydrologiques et topographiques.

La rivière RUVYIRONZA a une élévation moyenne de 1470 m par rapport au niveau de la mer.

La superficie du bassin versant est de 2015km².

Son débit moyen est de 20.21m^3/s.

Les précipitations annuelles sont en moyenne de 1333 mm observée pendant la période de 1974-1981.

Toutes les données sont détaillées sur les annexes.

A partir de ces annexes, on aura les informations suivantes :

- les précipitations annuelles sont de 1333 mm
- les débits moyens annuels :- 15,78m^3/s en 1975
  -17,32m^3/s en 1976
  -23,54m^3/s en 1977
  -25,09m^3/s en 1978
  -18,70 m^3/s en 1980
  -19,32m^3/s en 1981

On tient à signaler que les débits moyens des années 1974 et 1979 ne nous sont pas fournis.

CHAP II. IMPLANTATION DES OUVRAGES

II.1. Les éléments composant une installation d'une centrale hydroélectrique

- OUVRAGE DE PRISE : Il s'agit d'un ouvrage de dérivation, de forme et de dimension adaptés aux conditions géologiques. La prise peut être submersible et les digues peuvent être construites en enrochements, gabions, terre, aussi bien qu'en béton.

- CANAL D'AMENEE : le canal d'amenée peut être en terre ou bétonné. La vitesse de l'eau ne doit pas dépasser 0,8m/s dans le second cas.

-CONDUITE FORCEE : les conduites forcées sont généralement en acier ou en polyéthylène et peuvent admettre des vitesses de 3 à 8m/s.

- GRILLE- DEGRILLEUR ET DESSABLEUR : il convient de protéger la turbine contre les corps charriés par la rivière par une grille qu'il y a lieu de nettoyer manuellement ou par un dégrilleur de conception simple, un dessableur permet aux particules fines de se déposer avant l'entrée dans l'installation.

-VANNES : Il est nécessaire de disposer des vannes adaptées à différentes utilisations :

- protection contre les crues
-isolation du canal
-isolation de la turbine

-TURBINES : le choix des équipements est lié aux objectifs poursuivis :

-constituer une source autonome d'énergie, ce qui impose une

certaine continuité dans la production d'énergie électrique

-vendre le courant, ce qui implique un dimensionnement correspondant à une production maximale. Le type de turbine dépend de la hauteur de chute :

*les turbines *hélice* ou *Kaplan* sont utilisées pour les basses chutes. Elles sont constituées par des pales fixées sur un axe, les pales pouvant être orientables en marche.

*les turbines *Francis* sont utilisées pour les chutes moyennes. L'eau est dirigée sur une roue à aube.

*les turbines *Pelton* conviennent pour les hautes chutes. Le jet d'eau, sous très forte pression, est dirigé sur une roue munie de godets par un injecteur permettant de régler le débit.

*les turbines *Banki- Mitchell* couvrent une large gamme de chutes et de débits.

-ALTERNATEUR : La turbine est reliée à un alternateur qui elle- même est une machine électrique triphasée. Ils sont reliés directement ou par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. Les machines asynchrones sont utilisées dans le cas d'un réseau connecté à un circuit de distribution tandis que les alternateurs synchrones sont utilisés dans les réseaux isolés.

II.2. Réseau de transport et de distribution

L'Energie est fournie sous une basse tension triphasée de 220-380V chez les abonnés et peut être utilisée sur place pour une consommation autonome. Si le lieu d'utilisation est éloigné (distance supérieure à 1km), il conviendra le plus souvent de passer de la basse tension <500V à la moyenne tension (20.000V) ce qui nécessitera l'installation d'un transformateur élévateur à MT et un ou plusieurs transformateurs abaisseurs(MT/BT) à l'extrémité de la ligne MT.

Des règlements de sécurité précisent les conditions d'installations intérieures, domestiques ou industrielles, afin de prévenir les courts-circuits et les mises à terre intempestives qui pourraient se traduire par la destruction des générateurs.

II.3. Critères d'aménagement

L'installation hydroélectrique implique la prise en compte de 6 critères principaux :

-connaissance des différents utilisateurs de l'eau sur l'ensemble d'un bassin versant.

-connaissance des besoins locaux. Examen de l'état de l'approvisionnement énergétique actuel. Evaluation et choix de l'utilisation de l'énergie produite par la centrale hydroélectrique.

-détermination des hauteurs équitables.

-connaissance hydroclimatologique : régime des pluies, débits des rivières.

-Connaissance géologique des terrains et détermination des zones exposées aux risques des mouvements du sol et du sous sol pour définir la stabilité des différents ouvrages et réaliser les travaux de génie civil dans les meilleures conditions techniques et financières.

-Analyse de l'impact sur l'environnement, notamment à travers le drainage des sols en amont de l'ouvrage de prise par exemple des perturbations apportées à la pisciculture.

II.4.Indications pour la construction des ouvrages hydrauliques

II.4.1. Service des installations hydrauliques.

Les caractéristiques pour les installations des vannes avec leurs entraînements électro-hydrauliques prévus sur l'évacuateur de fond, prise d'eau et cheminé d'équilibre sont en principe similaires. Les pressions hydrauliques

pour les commandes sont élevées suivant les forces à exercer, spécialement à l'évacuateur de fond.

Il faut avoir sans cesse présent à l'esprit que toute intervention sur les équipements sous haute pression présente des dangers. Avant toute intervention, il est donc nécessaire et indispensable d'isoler la section concernée.

Pour éviter tout accident, il est absolument nécessaire de respecter minutieusement toutes les indications des manuels de manœuvre et d'entretien.

II.4.2. Maintien en état

1) Tous les outils et équipements doivent être maintenus propres.
2) Partout où des traces de rouille apparaissent, un dérouillage avec application de peinture doit être envisagé immédiatement pour éviter que le processus ne s'étende. Chaque fuite doit être éliminée sans délai.

   En général, toutes les réparations jugées nécessaires doivent être faites immédiatement après la découverte de défauts.
3) les dispositifs de sécurité, protection et commande nécessaires à la sécurité des installations hydrauliques et électroniques ne peuvent être ni changés, ni variés ou rendus inopérants de manière inadmissible.

Les interventions pour les essais d'installation, la localisation des défauts et les mesures de commutation pendant une courte durée sont exclues.

4) les signaux d'avertissement, inscription et notes doivent être fixés à des endroits facilement visibles et maintenus en bon état. Les signaux d'avertissement, inscription, notes et marques qui ne sont plus corrects doivent être enlevés.
5) Les changements et extensions déjà exécutées dans les installations doivent être incorporés immédiatement dans les schémas.

II.5 Evacuateur de fond

II.5.1 Description

L'équipement mécanique de l'évacuateur de fond est constitué essentiellement de :

-2 vannes glissières avec entraînement hydraulique

-groupe électrohydraulique

-palan monorail.

Les 2 vannes glissières ainsi que leur système hydraulique d'entraînement interconnectés sont identiques. La vanne aval est celle de service qui reste normalement fermée. La vanne amont est prévue comme celle de secours et reste normalement ouverte.

II.5.2. Exploitation

Pour éviter la formation de dépôts dans les rainures et sur les rails de guidage et d'étanchéité de la vanne de secours qui peuvent empêcher le glissement de la vanne, il faut effectuer des manœuvres de fermeture et d'ouverture à vide (vanne de service fermée) à l'intervalle de 2 mois. Tous les 6 mois, la vanne de service devra être ouverte au moins 30 à 40 % pendant 15 min environ pour rincer la prise d'eau. Après cette manœuvre, la vanne de secours devra être fermée et une ouverture et fermeture complète de vanne de service devront être effectuées pour vérifier son bon fonctionnement.

La vanne de service restera en position fermée et la vanne de secours en position ouverte.

II.6. Le barrage

II.6.1 Le choix de l'emplacement

Le choix de l'emplacement dépend de 3 conditions à savoir :

-la topographie du terrain, sa géologie et l'hydrologie.

Le paramètre hydrologique est important pour la superficie du bassin versant qui doit être suffisante pour alimenter le cours d'eau afin qu'il atteigne le débit nécessaire.

Critères de choix du site :

-régime de la rivière ;

-stabilité du sol ;

-insertion dans l'environnement ;

-les conditions économiques définissant coûts et avantages.

Ces paramètres peuvent être classés en fonction des priorités :

-hauteur de chute : donnée de base pour l'évaluation de la puissance et la production. La dénivellation et la pente de la rivière sur cette dénivellation permettent d'estimer le gain lié à la hauteur de chute, la dépense relative et la longueur de la conduite.

-Régime hydrologique : défini à partir de jaugeage et de la relation pluie efficace-débit, indispensable pour dimensionner les ouvrages de prise d'eau et de production d'énergie et prévoir la rentabilité de l'opération.

-le taux d'utilisation des eaux aussi bien à l'amont de la prise (pour déterminer le débit encore utilisable) qu'à l'aval pour préciser les effets de la dérivation sur des utilisations actuelles ou potentielles.

-impacts des différents aménagements sur l'environnement .

-dimensions des ouvrages et évaluation de leur stabilité à partir des conditions morphologiques, topographiques et géotechniques du sol.

-distance de la prise à l'usine et de l'usine au lieu d'utilisation.

La décision d'exécution de l'équipement intervient sur la base d'une analyse économique coût-avantage, effectuée aux différents niveaux des avant-projets analyse qui sera plus ou moins affinée suivant la nature de l'ouvrage et production d'énergie.

II.6.2. Ouvrages

Le corps du barrage doit être constitué d'une recharge amont et aval en enrochements.
En rive droite doit se situer l'évacuateur de fond constitué de tête en bétòn et une galerie revêtue d'un anneau en béton.
La régulation du débit évacué est assurée par les vannes.
Un bâtiment technique est prévu pour pouvoir abriter les équipements électromagnétiques de commande des vannes ainsi que les dispositifs de lecture des appareils d'auscultation du barrage.
L'évacuateur des crues situé en rive droite se compose essentiellement d'un déversoir à crête circulaire équipé d'un déflecteur sur un puit situé au bassin de tranquillisation aval par une galerie à écoulement libre.

II.6.3 Equipements électromécaniques

Deux vannes glissières sont installées l'une derrière l'autre : la vanne coté aval est prévue comme vanne de service, elle restera fermée ou le cas échéant elle permet d'évacuer et contrôler le débit.
La vanne coté amont est une vanne de secours. Elle a pour fonction de permettre la révision ou être utilisée comme vanne de service en cas de défaillance de la vanne aval.
Le système d'entraînement pour les vannes sera assuré par 2 groupes électrohydrauliques indépendants mais interconnectés.
Ces équipements sont installés dans le bâtiment technique.

Dans ce bâtiment, on doit prévoir un palan monorail pour les manipulations et interventions dans le puit.

II.6.4. Fonctionnement d'un déversoir à crête circulaire.

Le déversoir à crête circulaire a pour rôle d'évacuer les eaux du bassin avant que celles-ci atteignent le niveau supérieur du barrage.
Le niveau supérieur du déversoir sera inférieur de 1m par rapport à la hauteur du barrage.
Lorsque le niveau d'eau sera élevé de telle manière à surpasser la hauteur du barrage, dans ce cas, l'eau va directement entrer dans le déversoir. Cela pour ne pas inonder le barrage.
En passant par le déversoir, l'eau va prendre le chemin de la galerie pour être évacuée par l'intermédiaire de la vanne d'évacuation.

II.7.Prise d'eau

II.7.1 L'ouvrage de prise d'eau et les équipements électromécaniques

La tour de prise d'eau se trouvera sur le flanc ouest du lac de retenu. Cette tour est l'ouvrage de tête de la galerie d'amenée.
En partie amont de l'ouvrage, on met une grille inclinée par rapport à la verticale transformable en batardeau pour permettre la révision de la vanne wagon située immédiatement à l'aval.
La manœuvre de la vanne wagon sera assurée par un vérin.
Le groupe électrohydraulique ainsi que les équipements de mesure de niveau d'eau se trouvent à l'intérieur de l'ouvrage.
En crête de la tour de prise, un portique fixe est prévu pour assurer les manœuvres de la grille et travaux de révision de la vanne.

L'alimentation électrique est assurée à partir de la centrale par câbles 6,6kV enterrées et par un transformateur qui doit se situer dans le bâtiment technique 6,6kV/380V

II.7.2. Equipements mécaniques

Les équipements mécaniques de la prise d'eau se composent principalement des éléments suivants :

-grille d'entrée

-vanne wagon d'entrée avec entraînement hydraulique

-groupe électrohydraulique

-équipement de mesure de niveau d'eau

-portique fixe

Tous ces équipements doivent se trouver à l'ouvrage de prise.

II.8. Galerie d'amenée

Il peut arriver que la conduite forcée amenant l'eau à la turbine soit directement placée sur la prise, mais il se peut aussi que, suivant les conditions de prise ou d'utilisation, il soit nécessaire de réaliser d'abord un canal en terre ou en béton. Ce canal d'amenée de faible pente comportera :

-en tête : une grille destinée à arrêter les corps entraînés par la rivière (feuilles, cailloux) et un dégrilleur de nettoyage.

Un système d'obturation de l'entrée d'eau doit être mis en place pour fonctionner au moment de l'entretien des ouvrages.

- à l'extrémité, au point de départ de la conduite forcée, une chambre de mise en charge et un dessableur à l'amont immédiat. Il importe d'équiper la chambre d'un déversoir et une canalisation assurant l'écoulement en cas d'arrêt de l'usine.

Le rôle de la chambre est de compenser les faibles différences entre le débit dérivé et le débit absorbé par les turbines.

II.9. Cheminée d'équilibre

L'équipement de la cheminée d'équilibre comprend:

-vanne à fermeture rapide

-vérin et chaîne des brimbales

-système de mesure des pressions

-détecteur de survitesse

-palan monorail

La vanne wagon de la cheminée d'équilibre est une vanne de sécurité automatique. La tension de commande est de 24V, courant continu (batterie dans le bâtiment technique), assurant aussi son fonctionnement, même en cas de coupure de l'alimentation électrique de la centrale.

II.10. Conduite forcée

Une conduite forcée peut être fabriquée suivant des sections différentes et tout cela dépend des conditions économiques et des disponibilités industrielles locales :acier, tôle roulée, p.v.c, polyéthylène.

Afin de protéger une conduite forcée, il est nécessaire de disposer d'une cheminée d'équilibre.

Pour leur mise en place, il est bon d'éviter les zones soumises à des risques de mouvements de terrain, ainsi que les pentes fortes qui impliquent un coût de montage et d'entretien plus onéreux.

Leur insertion dans l'environnement doit faire l'objet d'un effort particulier.

La conduite forcée du type *éléments soudés* est celle qui est efficace et est installée sur les supports dans la galerie. Elle est ensuite posée dans une tranchée embrayée.

Les encrages sont assurés par un massif à l'extérieur de la galerie et un deuxième près de la centrale.

Un joint de dilatation dans la galerie absorbe les déplacements dus à la dilatation et à la contraction.

La conduite est appelée ainsi car elle transforme l'énergie potentielle disponible en haut de la chute en énergie de pression directement utilisable par la turbine, au moyen d'un conduit fermé constamment maintenu en charge. Leur pente peut être très forte.

Dans les canaux, c'est la perte de charge qui assure le maintien de l'écoulement à surface libre ; on montre alors que la pente hydraulique (J) est égale à la pente de la surface libre (I) dans le cas des écoulements permanents.

Il existe des relations simples entre la vitesse de l'écoulement et la pente de la surface libre (I) dont la plus utilisée et la plus connue est celle de Manning-Stickler.

$V = K R_H^{\frac{2}{3}} j^{\frac{1}{2}}$

J=perte de charge linéaire

V=vitesse dans le canal.

R_H=rayon hydraulique (S/P=section mouillée/ périmètre mouillé)

K=coefficient de rugosité de Stickler (surface polie K=100, béton K= 65 à 85, rocher brut K de l'ordre de 30).

Les canaux d'amenés doivent être suffisamment imperméables pour ne pas laisser échapper une quantité d'eau qui réduirait le débit escompté et imprégnerait les terrains sous-jacents en risquant de provoquer leur glissement.

Le revêtement imperméable peut être obtenu par simple colmatage : couche d'argile identique au noyau de digues, revêtement cimenté (résiste aux engins de nettoyage, crée un obstacle aux animaux fouisseurs) ; revêtement bitumineux (étanchéité plus durables), revêtement en polyéthylène (non perforage par végétaux).

Dans les conduites, les pertes sont de 2 types :

- les pertes de charges réparties, qui sont proportionnelles à la longueur de l'écoulement considéré.
- Les pertes de charges localisées, qui sont liées aux accidents rencontrés dans la conduite : changement de section, changement de direction.

II.10.1 Détermination des dimensions de la conduite forcée

Le calcul des sections de la conduite implique la détermination de la section économique (Se). La vitesse moyenne dans la conduite V=Q/Se est généralement comprise entre 3 et 8m/s ; pour une perte de charge de 2 à 7% de la hauteur de chute.

En plus de ces contraintes, il est nécessaire de tenir compte des phénomènes très importants, comme par exemple l'oxydation ou la fatigue engendrée par les effets cycliques de certaines contraintes.

Les conduites forcées les plus communément utilisées sont faites en acier.

Elles sont constituées de viroles en tôle roulée et soudée, fabriquées en atelier et que l'on assemble bout à bout par soudure sur le chantier.

Pour les centrales de petites puissances (P< à 100 kW et H <80m). On peut utiliser des conduits en PVC.

Celles-ci présentent cependant l'inconvénient d'être fragiles aux impacts causés par exemple par les chutes de pierres.

D'autre part, ces tuyaux vieillissent vite sous l'effet des radiations solaires (ultraviolets) et se fragilisent d'autant.

Ce dernier point peut être résolu soit par enfouissement de la conduite quand cela est possible, soit par enrobage protecteur (toile de jute et goudron).

Les tubes de polyéthylène présentent l'intérêt d'être moins fragiles aux chocs et de ne pas subir de vieillissement au soleil.

Les tubes en PVC ou en polyéthylène ont une contrainte admissible σ_a faible :de l'ordre de 10 daN/mm².

CHAP. III : DIMENSIONNEMENT HYDRAULIQUE DES OUVRAGES

III.1. Les données de base

Compte tenu de la morphologie du site nous adoptons une hauteur de 78m. Signalons ensuite que pendant l'été les heures de production d'énergie électrique seront réduites à cause de la diminution du niveau du lac.

Dans un premier temps, nous allons supposer un rendement global η_g de 0,8 comprenant les pertes suivantes :

-les pertes en ligne

-les pertes dans les alternateurs

-les pertes dans les turbines

-les pertes de charges linéaires en conduites

-les pertes singulières

-les pertes au passage de vannes et grilles.

Dans un deuxième temps, ces valeurs seront calculées ou estimées séparément compte tenu de l'implantation, du débit et de l'équipement électromécanique.

Avec un débit de 20,21m^3/s, calculons ensuite la puissance maximale théorique :

$P_t = g\,\rho Q H$ $\quad H=78m$

$g=9,81 m/s^2$

$\rho=1000 kg/m^3$

$Q=20,21 m^3/s$

$P_t = 9,81.1000.20,21.78 = 15,46MW$

H=hauteur de chute en m

g = accélération de la pesanteur en m/s^2

ρ= masse volumique du fluide en Kg/m^3

P_t= Puissance maximale théorique en W

Puisque l'aménagement sera au fil de l'eau (dans le réservoir) il faudra qu'à tout instant, un débit de 20,21m^3/s soit turbiné sous une hauteur de chute de 78m.

En résumé, le barrage à crête déversante sera dimensionné pour un débit de crue exceptionnelle de 210m^3/s.

Les ouvrages de prise d'eau, d'amenée et de restitution seront dimensionnés pour un débit Q=20,21m^3/s

III.2.Dimensionnement hydraulique

III.2.1. Le barrage

Le débit d'un déversoir peut être calculé par la relation :

$q=C.\ L.\ h^{3/2}$ où $C=2/3\ .\ \mu\ .\sqrt{2g}$

Avec

μ : coefficient de débit, il est fonction de l'épaisseur du déversoir, du rapport épaisseur sur la charge, de la forme du déversoir.

L : la largeur déversante (m)

h : charge au dessus du déversoir (m)

q : débit en m^3/s

g : 9,81m/s^2

Pour notre cas, q sera le débit de crue exceptionnelle de 210m^3/s. Nous adopterons une valeur μ=0,76 en raison de la forme du déversoir et de la structure.

En appliquant la formule ci-dessus, nous déduisons la charge h.

$$h=\left(\frac{q\cdot 3}{2\cdot\mu\cdot\sqrt{2g}\cdot L}\right)^{\frac{2}{3}}$$

L=19m (voir données topographiques)

μ= 0,76

q=210m^3/s

h à calculer.

$$h=\left(\frac{210\cdot 3}{2\cdot 0{,}76\cdot\sqrt{2\cdot 9{,}81}\cdot 19}\right)^{\frac{2}{3}}=2{,}89\text{m}$$

Ce n'est qu'une approche parce qu'il est assez difficile de le réaliser comme tel.

III.2.2.Canal de liaison prise d'eau-dessableur

Nous le concevons tel que l'écoulement soit uniforme. Les paramètres géométriques et les paramètres de débit restent invariants le long du canal. Ce genre d'écoulement est décrit par les lois de Chézy ou G Manning – Stickler.

La formule de Manning-Stickler montre que :

$$V= k\,.\,R_H^{\frac{2}{3}}.I^{1/2}$$

Avec : V : vitesse uniforme

k : paramètre de rugosité dépendant de la nature des parois

R_H : Rayon hydraulique

$$R_H=\frac{S}{P}$$

S : section mouillée en m^2

P : périmètre mouillé en m

I : Pente du canal en m / m

Dans un écoulement uniforme, la pente du fond I, vaut la perte de charge unitaire.

La pente qui réalise cet écoulement se calcule par la relation précédente, les autres variables sont fixées.

Dimensionnement du canal

Equation de continuité Q= S.V

Formule de manning-Stickler $V= k . R_H^{\frac{2}{3}} . I^{1/2}$

La vitesse dans le canal sera limitée pour qu'il n'y ait par érosion des matériaux constituant le canal et les pertes de charges sont limitées.

La vitesse sera assez grande pour éviter le dépôt d'alluvions (colmatage).

Acceptons V=0,7m/s

$$S=\frac{Q}{V}=\frac{20,21m^3/s}{0,7m/s}=28,87m^2$$

Prenons un canal rectangulaire et fixons un tirant d'eau de 0,95m.

La largeur du canal $l=\frac{28,87m^2}{0,95m}=30,38m$

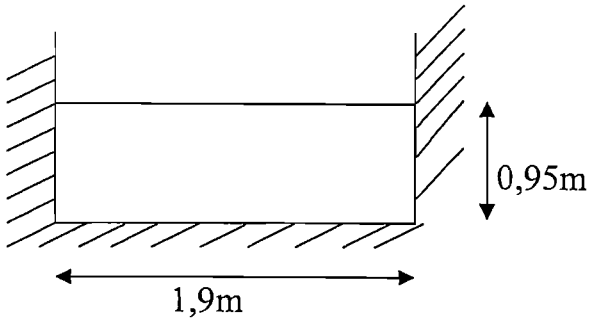
Nous prenons k : coefficient de frottement qui est de 70 car le canal sera exécuté en béton.

Calculons I, la pente qu'il faut donner au canal :

$$I=\frac{V^2}{k^2 \cdot R_H^{\frac{4}{3}}} \quad ; \quad \text{I : pente géométrique}$$

$$R_H=\frac{S}{P}=\frac{28,87m^2}{3,6}=8,01m$$

$$I=\frac{0,7^2}{(70)^2(8,01)^{\frac{4}{3}}}=6,23.10^{-6}m/m$$



P : périmètre mouillé

S : section mouillée

La perte de charge total dans le canal sera $\Delta h_v = \frac{6{,}23.10^{-6} \cdot 37}{1000} = 2{,}3.10^{-7}$m

La valeur est très négligeable ce qui rend le canal presque horizontal.

III.2.3.Dessableur

Il est construit près de la prise d'eau, et sera parfaitement rectiligne. Pour lutter contre l'inondation du dessableur en cas de débordement exceptionnel on prévoit un petit déversoir latéral de 10m avant l'entrée du dessableur.
Le dessableur permet de débarrasser le courant des matériaux solides. Ceux-ci sont prévus pour les pâles ou les aubages des turbines et pour les conduites (corrosion).

a. Dimensionnement du dessableur

Les caractéristiques principales pour le dimensionnement d'un dessableur sont :

- diamètre d (efficacité du dessableur) ; tous les grains de diamètre $d \geq d_o$ doivent tomber au fond.
  Où d est l'efficacité du dessableur en mm.
  C'est-à-dire que tous les grains de diamètre supérieur ou égal à d doivent tomber au fond du dessableur.
- le diamètre maximal des grains qui entrent dans le dessableur et qui est imposé par une grille à l'amont du dessableur.
- la vitesse moyenne de l'écoulement
- d_o , fixe la vitesse de chute .

La vitesse de chute est évaluée selon le tableau suivant ou déterminée à l'aide des diagrammes qui donnent le diamètre des particules en fonction de la vitesse de chute des grains en eau calme.(température moyenne 20° ; poids moyens des grains 2750 kg/m^3).

d(mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1
W(cm/s)	0,7	0,2	3,5	5	6	8	8,5	9	10

Avec les formules de Stickler

d(mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
W(cm/s)	0,97	3,8	8,8	15,6	24,3	35	47,6	62,2	78,7	97

On remarque une très grande différence avec le tableau empirique dès qu'on passe l'efficacité de 0,2mm.

La vitesse moyenne de l'écoulement est imposé par la nature du dessableur.

Pour un dessableur d'écoulement rapide, la vitesse varie de 1 à 1,5m/s mais l'efficacité ne dépasse pas 0,5mm.

Nous projetons un dessableur à écoulement lent. La vitesse est comprise entre 0,2 et 0,5m/s.

Le volume est grand par rapport au volume d'un dessableur rapide mais l'efficacité est meilleure. Nous prendrons une vitesse moyenne d'écoulement de 0,35m/s et une vitesse de chute de 0,007m/s.

b)Choix des sections

Il faut déterminer la section et la longueur du dessableur.

Par similitude, on peut établir les relations des dimensionnements.

$$\frac{V}{L}=\frac{W}{h}$$

$$S= l.h$$

$$Q= S.V$$

$$F=L.l$$

L: longueur du dessableur

h: tirant d'eau

l : largeur du dessableur

S : section

V : vitesse moyenne d'écoulement

W : vitesse de chute

$$Q = S.V = l.h.W.\frac{L}{h}$$

$$= F.W$$

$$F = \frac{\dot{Q}}{W} = \frac{20,21 m^3/s}{0,007 m/s} = 2887,14 m^2$$

$$S = \frac{20,21 m^3/s}{0,35 m/s} = 57,74 m^2$$

Fixons nous sur une profondeur de 1,30m

$$S = l.h \Rightarrow l = \frac{S}{h} = \frac{57,74 m^2}{1,30 m} = 44,41 m$$

$$L = \frac{F}{l} = \frac{2887,14 m^2}{44,41 m} = 65 m$$

Le dessableur ainsi calculé est de 65m x 44,41m x 1,30m.

Esthétiquement, les dimensions ne sont pas adéquates malgré le calcul. Prenons 2 canaux en parallèle.

$$S = 28,87 m^2$$

$$F = 1443,57 m^2$$

Prenons h=1m

$$l = \frac{S}{h} = \frac{28,87 m^2}{1 m} = 28,87 m$$

$$L = \frac{F}{l} = \frac{1443,57 m^2}{28,87 m} = 50,002 m$$

Ainsi le dessableur sera de 50,002m x28,87m x 1m.

c)Système de Purge

Si les matériaux se déposent le long du dessableur, la section du dessableur s'engrave, la vitesse augmente et l'efficacité du dessableur diminue.

Ainsi donc, nous prévoyons un canal de lavage de 40cm de largeur qui débouche tous les 9 m dans un tuyau de vidange à pente forte restituant le débit solide dans la rivière. Chaque tuyau est fermé à son aval par une vanne.

III.2.4.La galerie d'amenée

a)Les lois de l'écoulement

Nous ne ferons pas d'étude théorique de l'écoulement. Nous considérerons seulement les pertes de charge qui nous concernent directement.

Les pertes de charges se divisent en 2 parties :

- Les pertes de charges linéaires
- Les pertes de charges singulières.

Les pertes de charges linéaires ont pour expression :

$$\Delta_{h_l} = \frac{\lambda . l}{D} \cdot \frac{V_m^2}{2g}$$

D : diamètre hydraulique

V_m : Vitesse moyenne de l'écoulement

λ : coefficient de pertes de charge qui ne dépend que de 2 paramètres non dimensionnels, le nombre de Reynolds Re et le rapport K/D qui est une rugosité relative.

Le nombre de Reynolds caractérise l'écoulement et la rugosité relative caractérise l'état physique des parois internes.

$$\lambda = f(\mathrm{Re}, K/D)$$

Dans cette relation la plus générale de λ, nous retiendrons la formule de Coolebrok qui s'applique aux écoulements turbulents.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\log_{10}\left(0{,}27 \cdot \frac{K}{d} + \frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}\right)$$

En pratique, les ingénieurs exploitent le diagramme de Moody plus expéditif que la résolution de l'équation ci-dessus.

Les pertes de charges singulières sont proportionnelles à la pression cinétique.

$$\Delta_{h_s} = \sum_i \zeta_i \frac{V^2}{2g}$$

ζ : coefficient fonction de la singularité rencontrée

V : vitesse moyenne de l'écoulement

α	0	15	30	45	60	90
ζ	0	0,10	0,20	0,50	0,70	1,3

Le coefficient ζ peut être évalué par la formule

$$\zeta = 0{,}9457 \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2{,}047 \cdot \sin^4 \frac{\alpha}{2}$$

Ainsi

α	0	15	45	60	90
ζ	0	0,2	0,18	0,36	0,98

Nous remarquons que les valeurs expérimentales sont beaucoup plus élevées que les valeurs de calcul.

Nous utiliserons ces dernières.

b)Choix de la section

Le choix d'une grande section implique une dépense initiale d'investissement plus élevée mais une perte d'énergie moins élevée. A l'inverse une section faible coûte moins cher mais les pertes sont grandes. Il faut donc un optimum économique, c'est-à-dire la notion du diamètre économique.

Le diamètre économique est donné par la formule $\Delta=\alpha Q^{\frac{3}{7}}$ déduites des considérations précédentes.

α : coefficient dépendant de la qualité de l'installation et de l'exploitation.

Nous allons exploiter les formules de BRESSE.

1ère loi de Bresse

$D_{opt}= 1,5\sqrt{Q}$

avec Q : m^3/s

D_{opt} : m

Cette loi a été ajustée à une vitesse moyenne de 0,57m/s et des diamètres de l'ordre de 0,1 à 1m.

Détermination de la section

D'après Bresse

$$D_{opt}= 1,5\sqrt{Q} =1,5\sqrt{20,21} =6,7m$$

$$S=\frac{D^2\pi}{4}=\frac{6,7^2\cdot 3,14}{4}=35,23m^2$$

$$V=\frac{Q}{S}=\frac{20,21}{35,23}=0,57m/s$$

D'après la formule de Bresse modifiée :

$$D_{opt}= \sqrt{Q} =\sqrt{20,21} =4,5m$$

$$S=\frac{D^2\pi}{4}=\frac{4,5^2\cdot 3,14}{4}=15,89m^2$$

$$V=\frac{Q}{S}=\frac{20,21}{15,89}=1,27m/s$$

Nous retiendrons la 2ème formule parce que les résultats sont mieux adaptés aux dimensions et à l'écoulement.

D_{opt}: 4,5m

V_{opt} : 1,27m

Nous nous fixerons à un diamètre D_N = 1000mm trouvé dans la série NFE 29-001 norme française et conforme à l'ISO.

Ainsi : D=4m

V=1,20m/s

S=16m²

c)Calcul des pertes de charge

1)Pertes linéaires

$$\Delta h_v = \frac{\lambda}{D} L \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$\lambda = f\left(\mathrm{Re}, \frac{K}{D}\right)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot D}{\gamma}$$

Valeur de K pour les tuyaux en acier soudé ou non

K=0,03 à 0,1mm

Prenons K=0,06mm

$$\frac{K}{D} = \frac{0,06}{1000} = 6.10^{-5}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{1,20 \cdot 4}{10^{-6}} = 4,8.10^{6}$$

En utilisant le diagramme de Moody, on lit λ.

$\lambda = f(4,8.10^6, 6.10^{-5})$.

$\lambda = 0,011$

$$\Delta h_v = \frac{(0,011) \cdot 100 \cdot (1,2)^2}{4 \cdot 2 \cdot 9,81} = 2.10^{-2}\mathrm{m}$$

2)Pertes singulières

Sur le tracé, on rencontré 3 coudes :

- coude à 44°
- coude à 27°
- coude à 28°

D'après la formule précipitée, on trouve

$\rho(44) = 0{,}312$; $\rho(27) = 0{,}06$; $\rho(28) = 0{,}06$

Nous adoptons pour l'entrée galérie-Dessableur un cœfficient.

$\mu = 0{,}5$

Alors $\Delta h_s = (0{,}312 + 0{,}06 + 0{,}06) \cdot \frac{1{,}2^2}{2x9{,}81} = 0{,}03\text{m}$

$\Delta h_v = 3cm$

Pertes de charges totales $\Rightarrow \Delta h_t = \Delta h_v + \Delta h_s$

$= 2\text{cm} + 3\text{cm} = 5\text{cm}$

$\Delta h_t = 5\text{cm}$

III.2.5.La cheminée d'équilibre

a.But de l'ouvrage

Une cheminée d'équilibre est un réservoir à l'air libre construit à la jonction de la galerie d'amenée en charge et de la conduite forcée. Elle doit réduire la valeur de la surpression due au coup de bélier dans la conduite forcée et l'atténuer dans la galerie d'amenée.

En réalité, l'ensemble galerie en charge et conduite forcée se comporte comme une longue canalisation en charge. Toute perturbation provoquée par la manœuvre du distributeur des turbines met un temps relativement long pour aller des turbines au réservoir et inversement. C'est dangereux si la perturbation se propage rapidement. Il faut donc prévoir une cheminée d'équilibre

b.Dimensionnement de la cheminée d'équilibre

Deux aspects sont à considérer :

- La cheminée ne doit pas déverser si la centrale perd instantanément sa charge par disjonction, quelque soit la charge.
- Le niveau ne doit pas baisser jusqu'à laisser entrer l'air dans la conduite ou dans la galerie lors de la prise en charge.

En pratique, le dimensionnement de la cheminée d'équilibre permet l'amortissement des oscillations de la masse d'eau. La condition reliant les paramètres géométriques et le paramètre débit, soit $S \geq \frac{V_0 \cdot L \cdot s}{2g \cdot H_0 \cdot J_0}$

S : section de la cheminée d'équilibre

V_0 : vitesse dans la galerie d'amenée

L : longueur de la galerie

s : section de la galerie

J_0 : perte de charge dans la galerie

H_0 : hauteur de chute correspondante au niveau statique diminuée des pertes de charges J_0

H_0=78m -0,05m = 77,95m Ainsi $S \geq \frac{(1,2)^2.100.16}{2.9,81.77,95.0,05}$=30,12m²

c.Détermination de la côte max (hauteur de la cheminée d'équilibre)

$$Z_m = V_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{s}{S}}$$

$$Z_m = 1,2 \cdot \sqrt{\frac{100}{9,81} \cdot \frac{16}{30,12}} = 2,7m$$

$$\text{Alors } S = \frac{V_0^2 \cdot L \cdot s}{Z_m \cdot 2 \cdot g} = \frac{(1,2)^2 \cdot 100 \cdot 16}{2,7 \cdot 2 \cdot 9,81} = 43,49m^2$$

Prenons une section circulaire, on a:

$$\frac{\pi D^2}{4} = 43,49m^2$$

$$D^2 = \frac{43,49 \cdot 4}{3,14} = 55,4m^2$$

$$D = \sqrt{55,4m^2} = 7,44m$$

Ainsi, la cheminée aura :

- une hauteur de 2,7m
- un diamètre de 7,44m
- une section de 43,49m²

III.2.6.La conduite forcée

a)Phénomène du coup de Bélier

Le coup de Belier est un régime non permanent qui apparaît dans une conduite lorsqu'on provoque une variation rapide du débit à l'extrémité aval de celle-ci.

Chaque tranche de la conduite subit des variations de pression et de vitesse à des instants différents.

Contrairement aux autres régimes d'écoulement, celui-ci ne peut être expliqué qu'en faisant intervenir la compressibilité de l'eau et l'élasticité de la conduite.

La variation de débit peut être produite soit par la modification de l'ouverture du distributeur de la turbine alimenté par la conduite forcée au cours du réglage de la puissance, soit par ouverture ou fermeture de la vanne de pied de la conduite.
Pour éviter que le béton se détériore à l'endroit où il est frappé par le jet dévié, on le couvre par un blindage en acier. Une fois le jeu dévié, on ferme le pointeau pour absorber progressivement l'énergie cinétique par frottement.

b)Dimensions hydrauliques

La vitesse moyenne dans la conduite forcée varie de 3 à 6m/s et les pertes de charges sont de l'ordre de 2 à 7%. La section de la conduite forcée est bornée entre 2 valeurs min et max.
La dimension max répond à une limitation de contraintes dans la conduite qui est proportionnelle au diamètre pour une épaisseur et un débit fixé. La valeur minimale du diamètre limite la surpression due au coup de bélier.

$$D_{min} = 0{,}45\sqrt{Q} = 0{,}45\sqrt{20{,}21} = 2{,}02\text{m}$$

$$D_{max} = 0{,}65\sqrt{Q} = 0{,}65\sqrt{20{,}21} = 2{,}9\text{m}$$

Fixons-nous un diamètre de 2,02m

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = 3{,}14\text{m}^2$$

$$V = \frac{Q}{S} = 6{,}43\text{m/s}$$

De la valeur trouvée, on se rapproche aux dimensions normalisées toujours plus intéressantes économiquement.

D=2,02m

S=3,14m²

V=6,43m/s

c)Calcul des pertes de charges

-Pertes de charges linéaires

$$\Delta h_v = \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$\lambda = f(\mathrm{Re}, K/D)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot D}{\upsilon} = \frac{6{,}43 \cdot 2{,}02}{10^{-6}} = 12{,}98.10^6$$

K=0,06mm

$$K/D = \frac{0{,}06}{2000} = 3.10^{-5}$$

$\lambda = f(12{,}98.10^6, 3.10^5) = 0{,}0095$

$$\Delta h_v = 0{,}0095 \cdot \frac{300}{2} \cdot \frac{6{,}43}{2.9{,}81} = 3\mathrm{m}$$

-Pertes singulières

Singularités rencontrées

$\alpha_1=14$;	$\zeta_1=0{,}14$	$\alpha_6=5$;	$\zeta_6=0{,}002$
$\alpha_2=18$;	$\zeta_2=0{,}024$	$\alpha_7=8$;	$\zeta_7=0{,}005$
$\alpha_3=6$;	$\zeta_3=0{,}003$	$\alpha_8=2$;	$\zeta_8=0{,}000$
$\alpha_4=7{,}5$;	$\zeta_4=0{,}003$	$\alpha_9=19$;	$\zeta_9=0{,}027$
$\alpha_5=22$;	$\zeta_5=0{,}064$		

$$\Delta h_s = \sum_i \zeta_i \frac{V^2}{2g}$$

$$\Delta h_s = 0{,}268 \cdot \frac{(6{,}43)^2}{2 \cdot 9{,}81} = 56\mathrm{cm}$$

$$\Delta h_t = \Delta h_v + \Delta h_s$$

$$= 3\mathrm{m} + 0{,}56\mathrm{m} = 3{,}56\mathrm{m}$$

Les pertes de charges totales sont de 3,56m +0,05m =3,61m

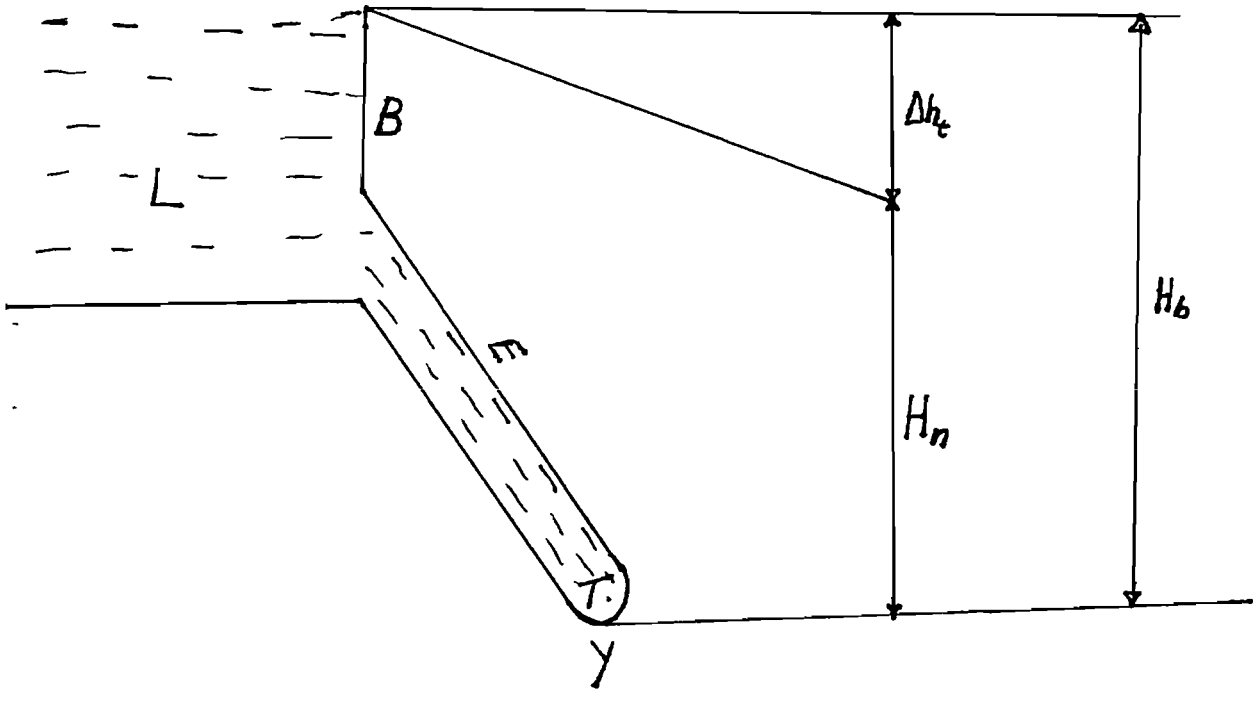
CHAP IV : CALCUL DE LA PUISSANCE INSTALLEE

IV.1.Introduction

La puissance électrique que peut fournir la rivière Ruvyironza n'est qu'une forme de transformation d'une énergie cinétique contenue dans une masse d'eau. Elle est calculée à base des données suivantes :

- le débit d'équipement
- la hauteur de chute nette.

IV.2.Les différentes hauteurs de chute



L : lac de retenue d'eau

B : barrage

E : conduite forcée

H_b : hauteur brute géométrique

H_n : hauteur nette

T : turbine

Δh_t : perte de charges totales

IV.2.1.Hauteur brute, nette et effective

La figure précédente représente une centrale hydroélectrique où l'énergie potentielle entre les points x et y est transformée en :

- énergie mécanique dans la turbine
- chaleur par les pertes de charges dans la conduite.

D'après la formule de Bernouilli appliquée entre les points x et y, on a :

$H_b=Z_x - Z_y = H_n+\Delta_{ht}$

De l'entrée à la sortie de la turbine, il existe des pertes de charges causées par les frottements (fluide-fluide, fluides-parois) ou par choc à l'entrée des aubages.

Alors, on a : $H_{eff} = H_n - \Delta h_{se}$

où H_{eff} : hauteur effective

H_n : hauteur nette

IV.3.Puissance hydraulique

La puissance hydraulique d'une chute d'eau provient d'une forme d'énergie cinétique contenue dans une certaine masse d'eau en mouvement.

L'énergie d'un fluide en régime permanent est constante. Partant des données soit par mesure topographique ou des données disponibles, on a trouvé une hauteur brute de 78m. La puissance hydraulique naturelle est donnée par la formule de Bernouilli.

$H_b = Z_1 - Z_2$

D'où $P_t = \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + (Z_1 - Z_2)\right]\rho g Q$

$P_t = \rho g.Q.H_b$

Où g : accélération de la pesanteur en m/s^2

H_b : hauteur brute totale en m

P_t : puissance théorique en W

ρ : masse volumique du fluide en kg/m^3

P_t :1000.9,81 . 20,21 .78 = 15,46MW

P_t est la puissance théorique qui ne tient compte d'aucune perte de charge. En tenant compte des pertes de charges, on calcule la puissance nette installée.

IV.4.Calcul de la puissance nette installée

C'est une puissance tenant compte de la hauteur de chute nette au lieu de la hauteur totale.

$$P_n = \rho.g.Q.H_n$$

Où P_n : puissance nette en W

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

Q : débit en m^3/s

H_n : hauteur nette en m en tenant compte du rendement hydraulique.

Q= 20,21m^3/s

H_n=Hb- Δh_t =78m-3,61m = 74,39m

P_n= 1000 . 9,81 . 20,21 . 74,39 = 14,74MW

IV.5.Calcul de la puissance totale installée

La puissance totale installée est donnée par l'expression suivante :

$P_i = P_n . \eta$

P_i= puissance installée en W

P_n : puissance nette en W

η : rendement de la turbine

P_i= 14,74 . 0,85 =12,5MW

C'est une puissance totale installée qui est disponible à l'arbre de sortie de la turbine en vue de la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

IV.6.Choix d'une turbine

L'équipement d'une centrale du point de vue hydromécanique, revient à déterminer le type de turbine et sa taille. Les turbines semblables sont caractérisées par la vitesse spécifique n_s et la taille d'une dimension linéaire comme le diamètre par exemple.

IV.6.1.Notion de vitesse spécifique

Cette notion résulte de la similitude des turbines hydrauliques. Considérons 2 machines S et S' géométriquement semblables. La définition de la vitesse spécifique peut alors être énoncée comme suit :

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

$$n_s = n\frac{P_n^{\frac{1}{2}}}{H_n^{\frac{5}{4}}} \Rightarrow n_s = n P_n^{\frac{1}{2}} H_n^{-\frac{5}{4}}$$

$$n = \frac{60f}{P}$$

avec P : nombre de paires de pôles

f : fréquence en Hertz

n : vitesse de rotation de la roue en tr/min

p_n :puissance nette en Watts

Nous fixons une machine de 8 pôles, ce qui donne 4 paires de pôles. Ici, on tient à signaler que les machines à 4 pôles ou plus, sont toujours à pôles saillants.

$n=\frac{60 \cdot 50}{4} = 750$ tr/min

$n_s= n P_n^{\frac{1}{2}} H_n^{-\frac{5}{4}}$

P_n=14,74MW = 14740KW

H_n= 74,39m

n_s= 750 . $(14740)^{1/2}$. $(74,39)^{-5/4}$ =416,7 tr/min

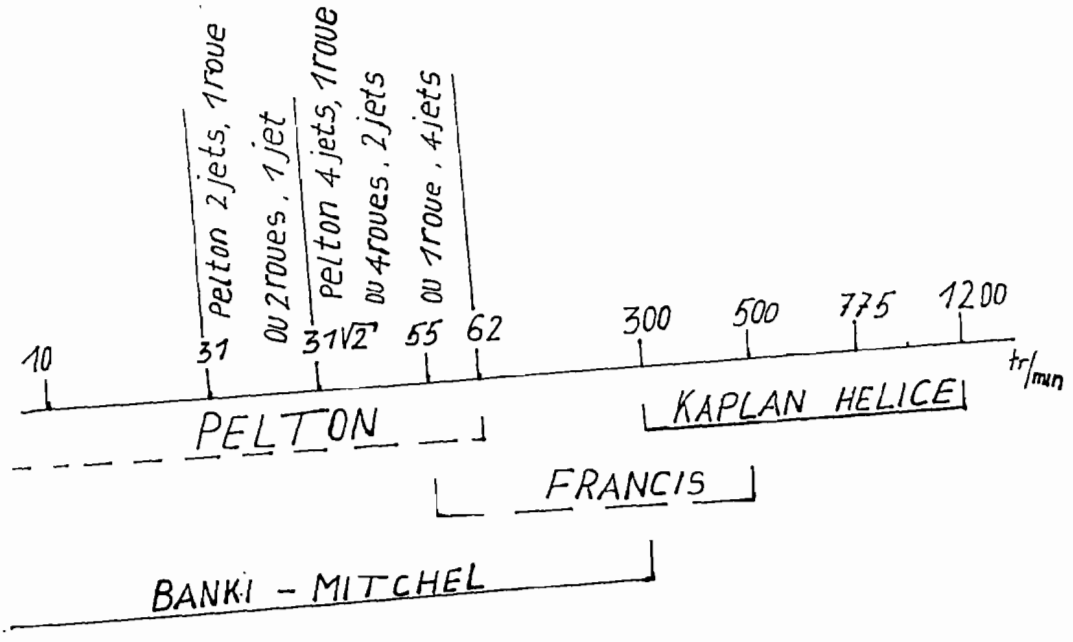
Compte tenu de la puissance à fournir, une seule turbine ne présentera aucun avantage. Par contre, on sera obligé d'utiliser trois turbines en parallèle ; ce qui sera favorisant aussi pendant les travaux d'entretien ou pendant le dépannage de l'une des trois turbines. Ces trois turbines pourront fonctionner simultanément pendant les heures de pointe.

Pour cela :

- la puissance nette installée $=\frac{14,74MW}{3}=4,9MW$
- le débit utilisé par chaque turbine est de $\frac{20,21m^3/s}{3}=6,73\ m^3/s$
- la vitesse spécifique de chaque turbine est : $n_s = nP^{\frac{1}{2}} H_n^{-\frac{5}{4}}$
- $n_s= 750.(4900)^{\frac{1}{2}} \cdot (74,39)^{-\frac{5}{4}}$ =240,3 tr/min

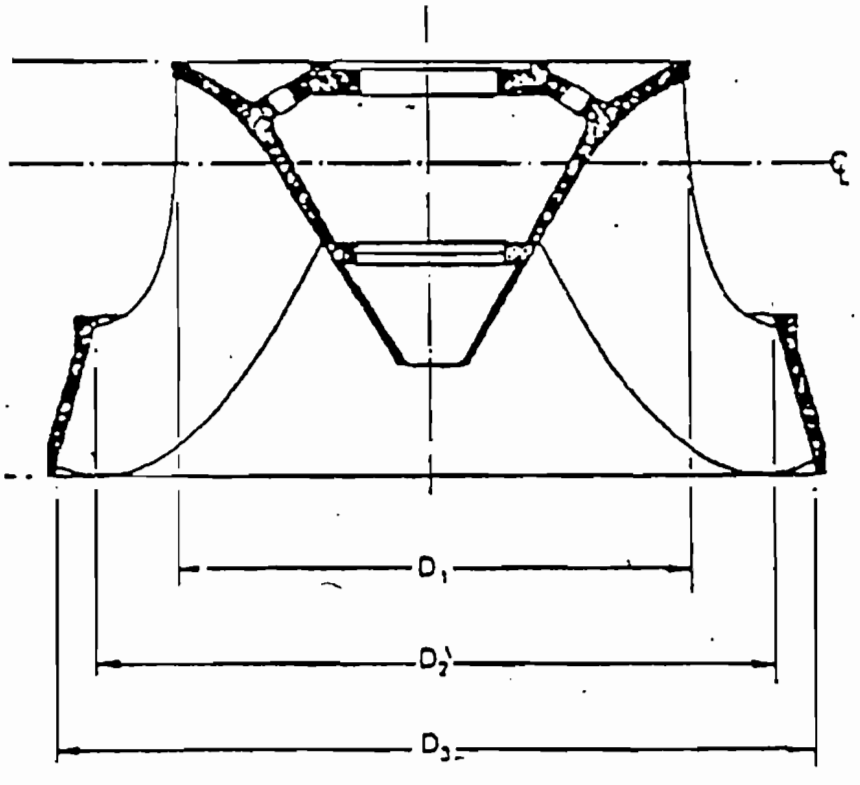
En utilisant le tableau de plage de fonctionnement usuel des différentes familles de turbines en fonction de la vitesse spécifique, on en conclut que la turbine sera de type Francis.

Plage de fonctionnement usuelle des différentes familles de turbines en fonction de la vitesse spécifique



IV.6.2. Dimensionnement de la turbine Francis selon la méthode de F de Siervo et F de Leva

1. Dimensions principales du rotor



K_u $=0,31+2,5.10^{-3}n_s$

$=0,31+2,5.10^{-3}.240,3=0,9$

n_s= 240,3 tr/min

Ensuite, calculons D_3 qui est le diamètre extérieur.

$$D_3=\frac{84,5K_u\sqrt{H_n}}{n}$$

H_n=74,39m

n=750 tr/min

$$D_3=\frac{84,5\cdot 0,9\sqrt{74,89}}{750}=0,87\text{m}$$

$$\frac{D_1}{D_3}=0,4+94,5/n_s$$

D_1 : diamètre intérieur

$$D_1=\left(0,4+\frac{94,5}{240,3}\right)\cdot 0,87=0,69\text{m}$$

$$\frac{D_2}{D_3}=\frac{1}{(0,96+0,00038n_s)}$$

$$D_2=\left(\frac{1}{0,96+0,00038n_s}\right)\cdot 0,87=0,82\text{m}$$

$$\frac{H_1}{D_3}=0,094+0,00025n_s$$

H_1= (0,094+0,00025.240,3) .0,87 =0,13m

$$\frac{H_2}{D_3}=-0,05+42/n_s \quad (50<n_s<110) \qquad (1)$$

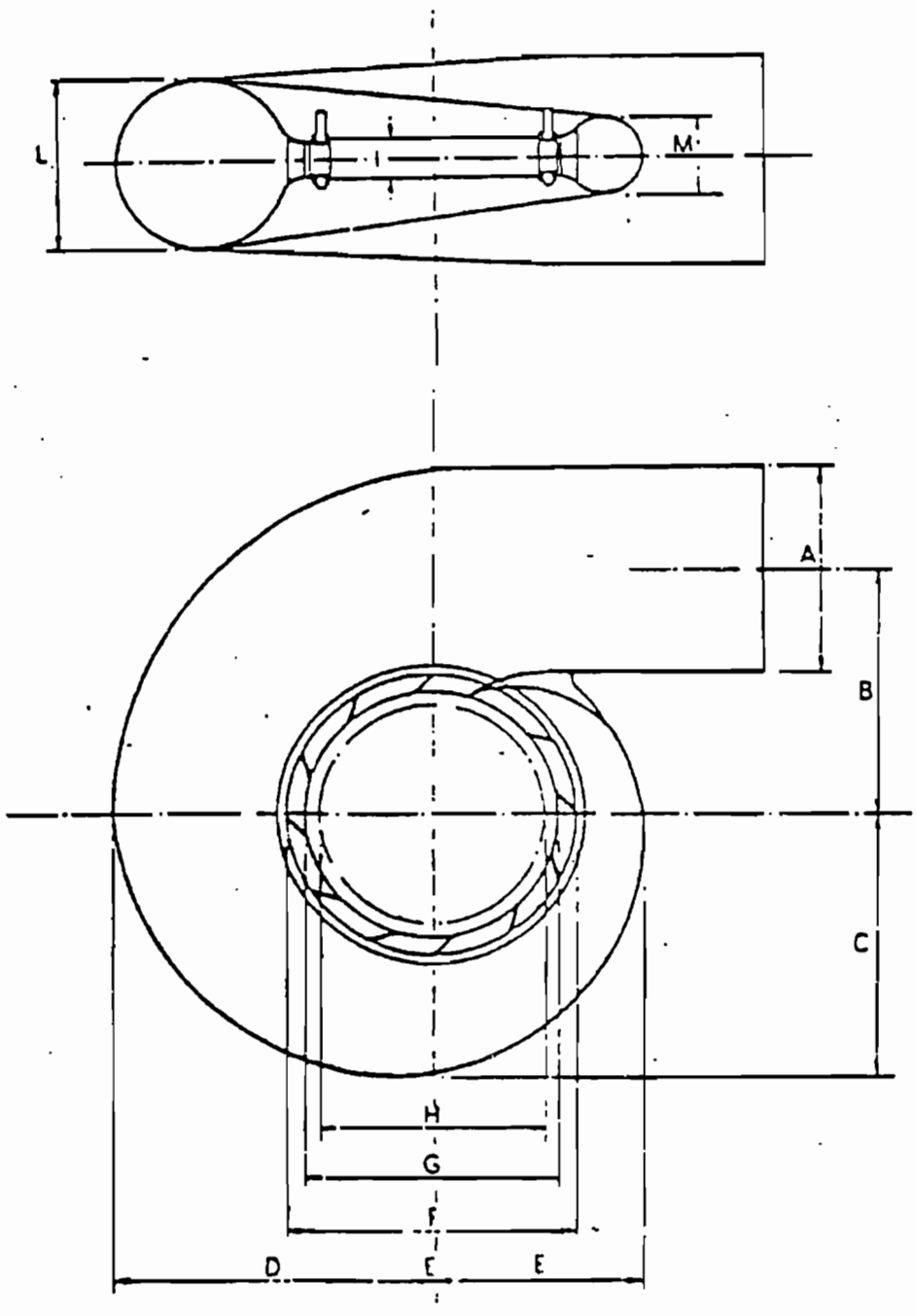
$$\frac{H_2}{D_3}=\frac{1}{(3,16-0,0013\,n_s)} \quad (110<n_s<350) \qquad (2)$$

N_s= 240,3 tr/min, pour cette condition, on utilise le 2ème cas.

$$\frac{H_2}{D_3}=\frac{1}{(3,16-0,0013\,n_s)}$$

$$H_2=\frac{1}{(3,16-0,0013\cdot 240,3)}\cdot 0,87=0,30\text{m}$$

2.Dimensions de la bâche spirale



$$\frac{A}{D_3} = 1{,}2 - 19{,}56 / n_s$$

$$A = \left(1{,}2 + \frac{19{,}56}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 0{,}69\text{m}$$

$$\frac{B}{D_3} = 1{,}1 + 54{,}8 / n_s$$

$$B = \left(1{,}1 + \frac{54{,}8}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}15\text{m}$$

$$\frac{C}{D_3} = 1{,}32 + 49{,}25 / n_s$$

$$C = \left(1{,}32 + \frac{49{,}25}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}32\text{m}$$

$$\frac{D}{D_3} = 1{,}50 + 48{,}8 / n_s$$

$$D = \left(1{,}50 + \frac{48{,}8}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}48\text{m}$$

$$\frac{E}{D_3} = 0{,}98 + 63{,}60 / n_s$$

$$E = \left(0{,}98 + \frac{63{,}60}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}08\text{m}$$

$$\frac{F}{D_3} = 1 + 131{,}4 / n_s$$

$$F = \left(1 + \frac{131{,}4}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}34\text{m}$$

$$\frac{G}{D_3} = 0{,}89 + 96{,}5 / n_s$$

$$G = \left(0{,}89 + \frac{96{,}50}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}12\text{m}$$

$$\frac{H}{D_3} = 0{,}79 + 81{,}75 / n_s$$

$$H = \left(0{,}79 + \frac{81{,}750}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 0{,}98\text{m}$$

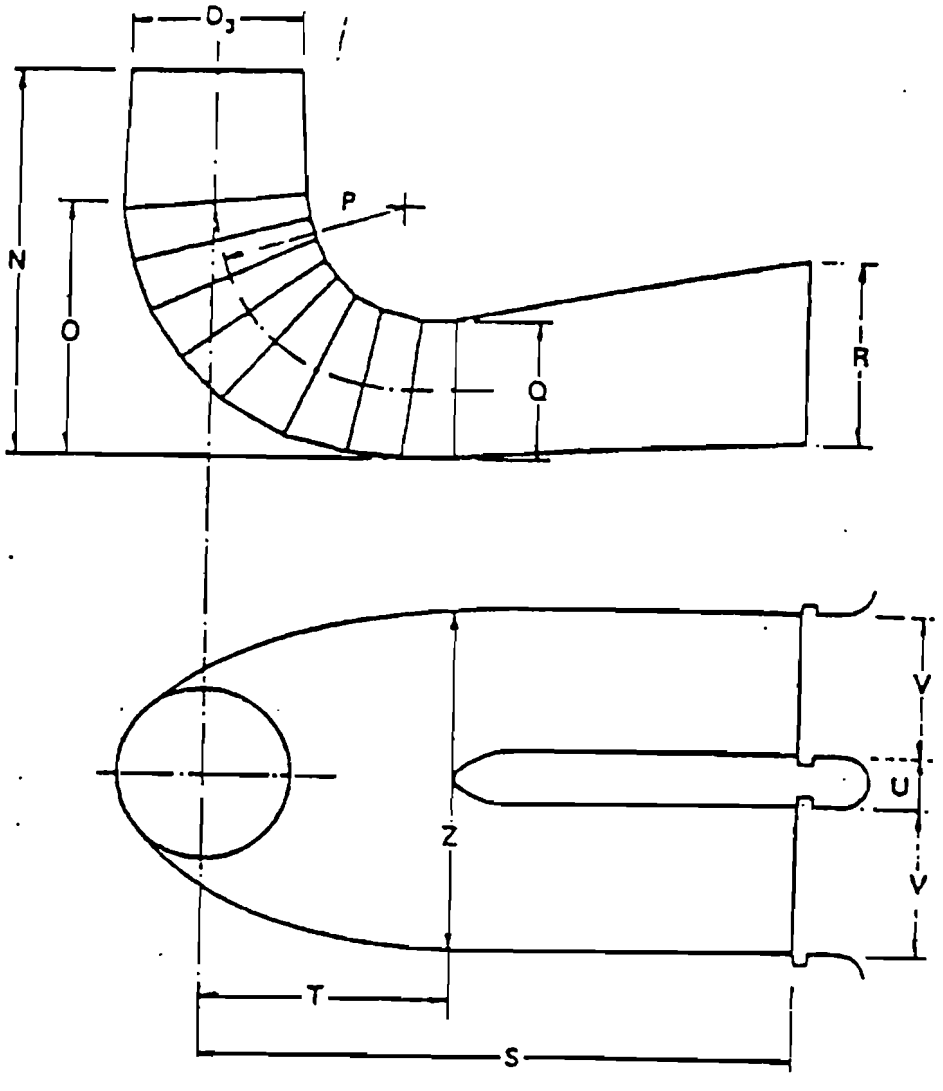
$$\frac{L}{D_3} = 0{,}88 + 0{,}00049 n_1$$

L=(0,88+0,00049.240,3).0,87 =0,86m

$$\frac{M}{D_3} = 0{,}60 + 0{,}000015 n_1$$

M= (0,60+0,000015 .240,3) .0,87 =0,52m

3.Dimensions du tube d'aspiration



$$\frac{N}{D_3} = 1{,}54 + 203{,}5 / n_1$$

$$\mathrm{N} = \left(1{,}54 + \frac{203{,}5}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 2{,}07\mathrm{m}$$

$$\frac{P}{D_3} = 1{,}37 - 0{,}00056 n_1$$

$$0 = (1{,}37 - 0{,}00056 . 240{,}3) \; . 0{,}87 = 1{,}07\mathrm{m}$$

$$\frac{O}{D_3} = 0{,}83 + 140{,}7 / n_1$$

$$O = \left(0{,}83 + \frac{140{,}7}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}23\mathrm{m}$$

$$\frac{Q}{D_3} = 0{,}58 + 22{,}6 / n_1$$

$$\mathrm{Q} = \left(0{,}58 + \frac{22{,}6}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 0{,}58\mathrm{m}$$

$$\frac{R}{D_3} = 1{,}60 - 0{,}0013 / n_1$$

$$R = \left(1{,}60 + \frac{0{,}0013}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}39\mathrm{m}$$

$$\frac{S}{D_3} = n_1 / (-9{,}28 + 0{,}25 n_1)$$

$$S = \left(\frac{240{,}3}{-9{,}28 + 0{,}25 \cdot 240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 4{,}11\mathrm{m}$$

$$\frac{T}{D_3} = 1{,}50 + 0{,}00019 n_1$$

$$\mathrm{T} = (1{,}50 + 0{,}00019 . 240{,}3) \; . 0{,}87 = 1{,}34\mathrm{m}$$

$$\frac{U}{D_3} = 0{,}51 - 0{,}0007 n_1$$

U=(0,51-0,0007.240,3) .0,87= 0,29m

$$\frac{V}{D_3} = 1{,}10 + 53{,}7/n_s$$

$$V = \left(1{,}10 + \frac{53{,}7}{240{,}3}\right) \cdot 0{,}87 = 1{,}15\text{m}$$

$$\frac{Z}{D_3} = 2{,}63 + 33{,}8/n_s$$

Z=(2,63+33,8/240,3) .0,87 =2,41m

CHAP V. DIMENSIONNEMENT ET CHOIX DE L'ALTERNATEUR

V.1. Introduction

Les machines électriques synchrones peuvent fonctionner en générateur, tout comme en moteur. C'est-à-dire qu'elles sont réversibles.

V.2 Caractéristiques des alternateurs

Les paramètres de base aux calculs des alternateurs hydrauliques sont nombreux et variables. On les retrouve sur les plaques signalétiques de chaque alternateur ; c'est à base de ces paramètres qu'on parvient à faire une commande d'un alternateur voulu.

Ces paramètres sont :

- La puissance active P fixée par la turbine en W
- Le facteur de puissance $\cos\varphi$ fixé par le réseau
- La tension U en volts
- La vitesse de rotation N qui est variable dans de très larges proportions (70 tr/min à 1500 tr/min)
- Le couplage des phases de l'enroulement de l'induit (l'enroulement statorique est couplé en étoile)
- La fréquence nominale du courant de l'induit.

En cas de fonctionnement anormal, l'alternateur tolère jusqu'à :

- 1,2 U_n pour la tension, U_n est la tension nominale de fonctionnement
- 10% d'une surcharge.

V.3. Calcul de la puissance aux bornes de l'alternateur

S'il y avait une turbine ou un alternateur idéal, la puissance à l'entrée du groupe serait la puissance contenue dans le fluide (eau) à la sortie de la turbine.
Ces genres d'équipement électromécaniques sont pratiquement irréalisables par les constructeurs. Il doit y avoir des pertes thermiques .

V.3.1. Pertes et rendement d'un alternateur

a. Les pertes

- Les pertes collectives ; ces pertes sont indépendantes du courant. C'est l'ensemble des pertes mécaniques (elles dépendent de la fréquence)
- Les pertes par effet Joule : Ce sont des pertes normales dépendant du courant. Elles sont dues au passage du courant dans les résistances soit de l'induit, soit de l'inducteur.

C'est une partie de l'énergie électrique dissipée sous forme de chaleur dans les enroulements électriques de l'alternateur.

- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur

P_{jr}= UI où p_{jr} : perte par effet Joule

U : tension d'excitation

I : courant d'excitation

- pertes par effet Joule dans l'induit.

$P_{js} = RI^2$: pour un enroulement monophasé

$P_{js}= 3RI^2$: pour un enroulement triphasé et couplé en étoile

$P_{js} = \frac{3}{2} ri^2$: si r est la résistance mesurée entre 2 bornes

Où R : Résistance ohmique d'un enroulement en Ω

I : Intensité du courant en A

P_{js} : perte par effet Joule dans l'induit

b. Rendement et puissance d'un alternateur

$\eta_{alt} = \frac{P_U}{P_a}$; P_a : puissance absorbée en W

P_u : puissance utile en W

η_{alt} : rendement d'un alternateur

La puissance à l'entrée de l'alternateur est de 12,5 MW

Le rendement d'un alternateur est estimé à 98%. Comme nous avons 3 groupes d'alternateurs, la puissance sera repartie en 3 groupes.

On a : $P_{hyd} = \frac{12500KW}{3} = 4166KW$

Par conséquent la puissance à la sortie de chaque alternateur est :

$P_u = P_{hyd} \cdot \eta_{gltur} \cdot \eta_{alt}$

P_u=4166 KW . 0,93. 0,98=3796,8 KW

La puissance utile de chaque alternateur est P_u : 3796,8KW

La puissance absorbée (P_a) de chaque alternateur est :

$P_a = \frac{P_u}{\eta_{alt}} = \frac{3796,8}{0,98} = 3874,2KW$

La somme des pertes de chaque alternateur est :

$P_a - P_u$=3874,2KW-3796,8KW=77,4KW

La somme des pertes sera égale à 77,4KW

V.3.2. Puissance électrique en courant alternatif

Les appareils récepteurs, qui consomment l'énergie distribuée, ont fréquemment besoin d'avoir une fréquence qui soit le plus stable possible. Ceci implique donc que la fréquence distribuée soit rigoureusement constante : il doit d'ailleurs en être de même de l'amplitude de la tension, l'intensité servant alors seule le facteur de réglage de la puissance. On rappelle que la puissance électrique en courant alternatif est donnée par la relation en monophasé.

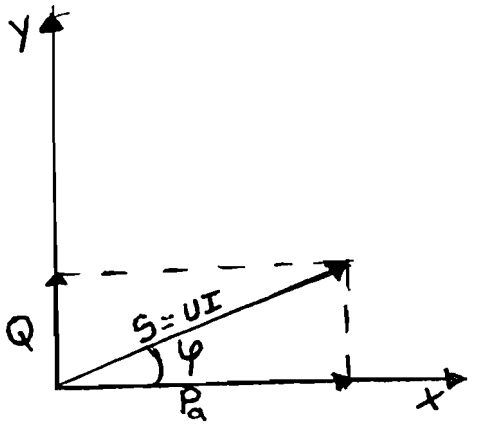
P_a= UICosφ, P est appelé puissance active (en W). A toute puissance active correspond une grandeur

Q=S sin φ appelée puissance réactive en (VAR)

S est une puissance apparente exprimée en VA

φ est le décalage qui existe entre l'intensité (I) est la tension (U) et cos φ est appelé le facteur de puissance. Cela est décrit dans le diagramme vectoriel suivant :

Figure



P_a=UI Cos φ en monophasé

$P_a = \sqrt{3}$ UI Cos φ en triphasé

Q= UI Sin φ en monophasé

Q= $\sqrt{3}$ UI Sin φ en triphasé

S=UI en monophasé

S= $\sqrt{3}$ UI en triphasé

Le terme cosφ, appelé facteur de puissance de l'installation ; dépend des constantes des circuits : résistances , inductances et capacités cosφ=P/S ; selon les définitions antérieures .

Le facteur de puissance d'un circuit à courant alternatif est une expression indiquant le pourcentage de la puissance apparente qui est active.

Comme le transport doit être fait avec le minimum de pertes, le facteur de puissance doit être meilleur, car pour une puissance donnée P_a = UIcosφ consommée, l'intensité efficace du courant est I=$\frac{P_a}{U\cos\varphi}$

Pour une puissance active utilisée par un récepteur, le courant est d'autant élevé que le cosφ est faible. D'où les pertes en lignes plus importantes.

La puissance électrique perdue, par effet joule, dans la ligne de résistance R est :

$$P_j = RI^2 = \frac{RPa^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

Il en résulte alors qu'une faible valeur du facteur de puissance augmente l'intensité et la perte par effet joule dans la ligne.

Pour éviter ce gaspillage, le distributeur d'énergie électrique est autorisé à imposer une redevance supplémentaire aux usagers.

Pour cette raison, il faut maintenir le bon cosφ car les faibles valeurs du facteur de puissances chez les usagers nuisent aussi au fonctionnement de l'alternateur de la centrale.

En effet, celui-ci conçu pour supporter une intensité maximale donnée fournit moins de puissance lorsqu'on augmente le déphasage entre l'intensité et la tension à ces bornes

CHAP VI. CHOIX D'UN TRANSFORMATEUR

VI.1. Introduction

A la sortie des centrales hydroélectriques, la tension électrique (MT)produite doit être élevée à l'aide des transformateurs élévateurs pour être transportée jusqu'à des postes d'interconnexion. Elle est ensuite transformée en moyenne tension par des postes de transformation (HT/MT) à l'aide des transformateurs.

A l'origine de toute installation, un transformateur permet d'adapter la tension du réseau à la tension des appareils d'utilisation.

Quelques hypothèses simplificatrices :

- Les résistances électriques sont négligeables.
- Le noyau ferromagnétique ne présente pas des pertes d'énergie par hystérésis ou dues aux courants de Foucault.
- Le noyau ne présente pas de fuites

Dans ces conditions, considérons Φ_M : la valeur maximale du flux dans le noyau magnétique; ω : la pulsation du courant d'alimentation ; N_1 et N_2 les nombres de spires des deux bobinages qui composent le transformateur.

- Le flux total maximal à travers le primaire est :

$\Phi_{1M}= N_1\Phi_M$

- La valeur efficace de la f.é.m du primaire est donc :

$$E_1 = \omega\frac{\Phi_{1M}}{\sqrt{2}}$$

$$E_1 = \frac{N_1\omega\Phi_M}{\sqrt{2}}$$

- La valeur efficace de f-é-m du secondaire est :

$$E_2 = \frac{N_2\omega\phi_M}{\sqrt{2}}$$

VI.2. Tensions

Pour les tensions électriques et les f-é-m aux enroulements du transformateur, on a : $U_1+E_1=0$, car c'est un récepteur et la chute de tension R_1I_1 est négligeable.
On a alors $U_1=E_1$

$U_2=E_2$

comme le bobinage secondaire se comporte comme un générateur,on a :

$$\frac{U_2}{U_1}=-\frac{E_2}{E_1}=-\frac{N_2}{N_1}$$

La présence du signe moins vient du fait que les tensions primaire et secondaire sont en opposition de phase.

Le rapport $\frac{N_2}{N_1}=K$ est le rapport de transformation.

Si K>1 : le transformateur est dit élévateur de tension

Si K<1 : le transformateur est dit abaisseur de tension

VI.3. L'intensité

La relation de la tension en valeur absolue donne :$U_1=E_1=\frac{N_1\omega\phi_M}{\sqrt{2}}$

Le transformateur alimenté sous une tension de valeur efficace et de pulsation constante, la valeur maximale du flux magnétique dans le noyau reste constante. Pour cela, la valeur efficace des ampères tours sur le noyau du transformateur doit rester constante.

- Pour un fonctionnement à vide, le primaire consomme un courant I_{1v} (courant magnétisant)

On a donc :$N_1 I_{1v}$

- En charge, le secondaire débite un courant I_2 et le primaire doit consommer le courant I_1 différent de I_{1v} de façon que les ampères tours totaux soient $N_1I_1+N_2I_2=N_1I_{1v}$

On admet que $I_{1v} << I_1$

Où I_{1v} : courant à vide

I_1 : courant en charge

Comme le courant à vide est très négligeable devant le courant en charge, on a : $N_1I_1+N_2I_2 \cong 0$ Dans ces conditions, les courants primaire et secondaire en charge sont en opposition de phase et dans le rapport inverse du nombre de spires

Le transformateur qui pourrait satisfaire aux quatre hypothèses simplificatrices citées ci -haut est appelé transformateur parfait

VI. 4. Le rendement et les pertes du transformateur

a) Le rendement

Le rendement d'un transformateur est le rapport des puissances actives du secondaire et du primaire.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} == \frac{P_2}{P_2 + \sum pertes}$$

Le rendement est de 90% pour les petits transformateurs et dépasse 90% pour les gros transformateurs.

b) Les pertes

Nous distinguons les pertes suivantes :

- Les pertes dans le fer (F) qui chauffent les circuits magnétiques
- Les pertes dans le cuivre (c) qui chauffent les circuits électriques

$\eta = \frac{P_2}{P_2 + F + C}$ où η : rendement du transformateur

-Les pertes dans le fer (F) sont dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault.

- Les pertes dans le cuivre (c) sont des pertes par effet Joule dues aux résistance des enroulements.

$$C = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$$

VI.5. Transformateur triphasé

VI.5.1. Constitution générale

Un transformateur triphasé comporte 3 transformateurs monophasés sur la même carcasse magnétique. Chaque noyau et ses enroulements se comportent comme un transformateur monophasé.

Les enroulements primaires doivent être couplés en étoile (Y)ou en triangle (Δ) et les enroulement secondaires doivent être couplés soit en étoile (Y), en triangle (Δ) ou en zigzag.

Les couplages les plus utilisés sont :

Y_{yo} ; Y_{d11} ; Y_{z11} et D_{y11}

Les désignations des couplages s'effectuent par un groupe de 2 lettres et un nombre désignant l'indice horaire.

VI.5.2. Niveau de transformation

Les transformateurs triphasés sont normalement à puissance élevée. Pour la centrale de la RUVYIRONZA, nous avons proposé deux transformateurs triphasés élévateurs, pour la simple raison d'éviter l'inconvénient tel qu'une rupture de fourniture d'énergie. Pour cela, deux transformateurs suffisent pour donner un fonctionnement normal et une exploitation plus simple.

Les transformateurs doivent être adaptés à l'utilisation :

- Avant tout, un transformateur élévateur : 6,6kV/30kV
- Distribution régionale : 30kV
- Distribution locale : 6,6kV
- Utilisation des abonnés : 220/380V

Comme ces transformateurs sont de grandes puissances, ils produisent des pertes sous forme de chaleur. Pour cela, ils doivent être munis d'un système de refroidissement à l'huile.

VI.6. Caractéristiques des transformateurs choisis

VI.6.1. La tension nominale U_n

La tension nominale $\mathbf{U_n}$ de nos transformateurs est de 6,6kV au primaire et 30kV au secondaire pour qu'elles puissent être interconnectées au réseau existant.

VI.6.2. La puissance nominale

La puissance apparente pour chaque alternateur est :

$$S= \sqrt{3}UI = \frac{P_a}{\cos\varphi} = \frac{3796,8kW}{0,85} = 4467kVA$$

La puissance apparente pour la RUVYIRONZA devient la somme de production des trois groupes turboalternateurs. Donc S= 13401 kVA.

VI.6.3. Le courant nominal I_n

Le courant nominal I_n est le courant qui transite dans un fil de ligne

Dans ce cas, $I_n=\frac{S}{\sqrt{3}U}$

où s : puissance apparente en VA

In : courant nominal en A

U : tension nominale en V

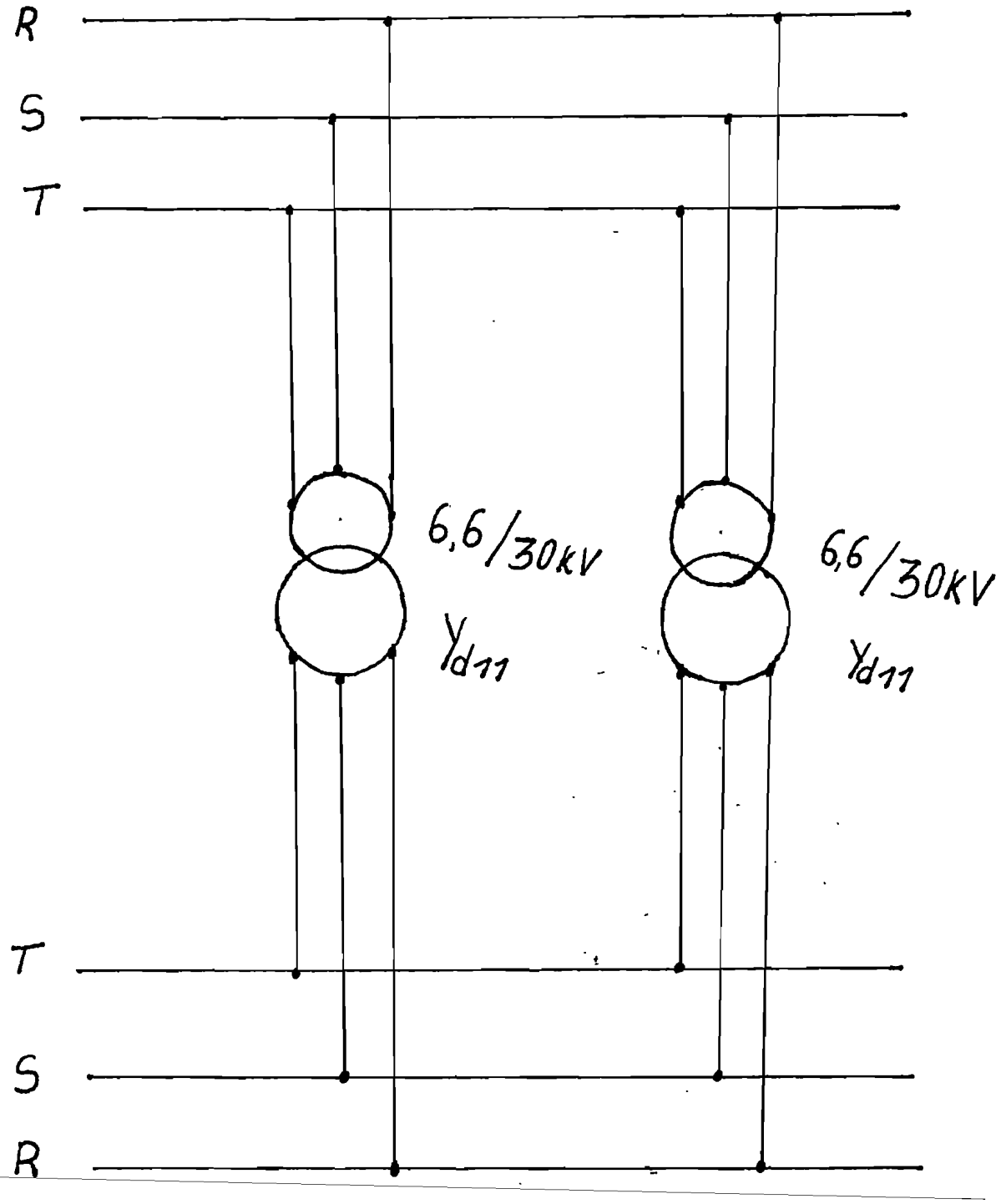
Au primaire $In = \frac{13401}{\sqrt{3}x6,6} = 1172,28A$

Au secondaire $In=\frac{13401}{\sqrt{3}x30} = 257,9A$

Le courant nominal au primaire est I_n=390A

Le courant nominal au secondaire est I_n=86A

VI.7. Disposition et mise en parallèle des deux transformateurs



La mise en parallèle des transformateurs doit satisfaire les conditions suivantes :

- Les tensions nominales au primaire et au secondaire de tous les transformateurs doivent être égales
- Les rapports de transformation doivent être aussi égaux

$$m_1=m_2=\frac{30KV}{6,6KV}=4,54$$

- Les tensions de court-circuit doivent être égales $U_{cc1}=U_{cc2}$

VI.8. Interconnexion au réseau existant

L'énergie que doit produire la centrale de la RUVYIRONZA s'ajoute à la production du réseau existant et permet la compensation d'un manque d'énergie résiduelle ou de l'alimentation d'autres localités.

La capacité de production de la RUVYIRONZA est de 12,5MW. Le réseau principal, celui de Gitega est de 30kV aurait un regain de capacité de 12,5MW une fois l'usine sur la Ruvyironza ici proposée serait réalisée.

VI.9.Conclusion

Pour la centrale hydroélectrique de RUVYIRONZA nous avons deux transformateurs triphasés dont les caractéristiques de chacun sont :

- Puissance apparente S=13401kVA
- Tension nominale :
  - Au primaire U_{n1}=6,6kV
  - Au secondaire : U_{n2}=30kV
- courant nominal au primaire I_{n1}=1172,28A
- Courant nominal au secondaire I_{n2}=257,91A
- Rapport de transformation m=4,54
- Couplage des enroulements : Y_{d11}

CONCLUSION GENERALE

La centrale hydroélectrique de la RUVYIRONZA aura une puissance de 12,5MW. Notre mission principale était de dimensionner les équipements électromécaniques de cette centrale. Nous avons obtenu les types de turbine qu'il faut utiliser, les alternateurs et les transformateurs nécessaires et leurs dimensions essentielles pour pouvoir raccorder notre centrale au réseau existant.

Voici en résumé le résultat de notre travail sous forme tabulaire des caractéristiques des équipements électromécaniques dimensionnés :

Désignation	Caractéristiques	Grandeur	Unités	Valeur
Turbine	-Vitesse spécifique	ns	tr/min	240,3
	-Puissance de la turbine	P	MW	4,16
	-Diamètre extérieur du rotor	D_3	m	0,87
	- Diamètre intérieur du rotor	D_1	m	0,69
	-Diamètre extérieur de la bâche spirale	F	m	1,34
	-Diamètre intérieur de la bâche spirale	H	m	0,98
	-Rendement	η	-	0,85
Alternateur triphasé	rotor à pôles saillants	P	-	-
	nombre de paires de pôles	P	-	4
	vitesse de rotation	N	rot/min	750
	fréquence	f	Hz	50
	puissance utile	P_U	kW	3796,8
	puissance absorbée	P_a	kW	3874,2
	facteur de puissance	Cos φ	-	0,85
	tension nominale	Un	kV	6,6
	courant débité	I	A	1172,28
	Rendement	η	-	0,98

Transformateur élévateur	Puissance apparente	S	kVA	13401
	Tension nominale	U_n	kV	6,6/30
	Courant nominal	I_n	A	1172,28/257,9
	Rapport de transformation	K	-	4,54
	couplage	Yd11	-	-
	Refroidissement dans l'huile	-	-	-
	Rendement	η	-	0,90

Notre travail s'est basé principalement sur le dimensionnement et le choix des organes électromécaniques principaux de la centrale entre autre :

- Les turbines
- Les alternateurs
- Les transformateurs

Concernant le barrage, son emplacement sera placé en aval du pont de la RUVYIRONZA et sera construit en enrochements et d'autres éléments du milieu.

Tout ce travail a été fait à base des données hydrologiques, topographiques et géologiques qui nous ont été fournies par le ministère de l'énergie et des mines.

Nous ne manquerons à préciser que notre travail a connu quelques problèmes notamment :

- Le manque de documentation suffisante y relative.
- L'inexistence de ces équipements sur nos marchés

C'est à cause de ces problèmes que les résultats de nos calculs doivent être notés dans un cahier de charge pour être vérifiés par les fabricants de ces équipements avant la mise en œuvre de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- ELECTRONIQUE : - Réseaux triphasé
  - Machines à courant alternatif
  Par Michel BORNAND
- LES MICROCENTRALES HYDROELECTRIQUES
  Par L. MONITION, M. LENIR, J. Roux
  Edition Masson 1984
- LES MACHINES TRANSFORMATRICES D'ENERGIE, Tome 2
  Par G. LE MASSON
  Librairie de la grave 1982
- PHYSIQUE INSTRUMENTALE
  Par le technicien Dynond
- MANUEL DE L'INGENIEUR ELECTRICIEN
  Tome 2
  Par RZIHA ET SEIDENER
- WATER POWER DEVELOPMENT
  Handout 7
  By prof. B. Petry.
- L'ENERGIE HYDRAULIQUE
  Par R. Ginocchio

ANNEXE I

FICHE DE DEBIT

STATION : RUVYIRONZA

LECTURE ECHELLE (m), DEBIT (m^3/s)

DATE	LECTURE ECHELLE	DEBIT
11. 3. 75	2,46	24,32
2. 4. 75	2,42	20,32
12. 4. 75	2,31	17,39
12. 5. 75	2,08	10,91
20. 5. 75	2,15	14,42
27. 7. 75	1,80	11,05
7. 8. 75	1,78	8,80
24. 8. 75	1,72	7,53
16. 9. 75	1,88	11,86
14. 10. 75	1,78	10,04
8. 11. 75	1,78	9,66
20. 12. 75	2,33	20,99
8. 2. 76	2,00	13,24
8. 3. 76	2,32	21,21
12. 4. 76	2,44	23,94
30. 4. 76	2,82	30,70
23. 5. 76	2,84	35,56
28. 6. 76	1,26	12,06
17. 7. 76	1,88	11,98
3. 8. 76	1,80	8,91
3. 9. 76	1,82	8,90
24. 9. 76	1,83	9,86
11. 11. 76	2	13,59
24. 11. 76	2,32	19,77
6. 12. 76	2,30	18,61
23. 12. 76	2,30	27,83
6. 1. 77	2,18	19,63

24. 1. 77	2,18	26,77
7. 9. 78	1,88	11,47
13. 9. 78	2,05	14,38
2. 10. 78	1,86	11,61
11. 10. 78	1,90	13,14
6. 11. 78	2,09	15,37
22. 11. 78	2,61	33,82
15. 12. 78	2,91	42,42
27. 12. 78	2,68	33,79
5. 2. 79	2,78	39,69
20. 3. 79	2,93	44,48
16. 4. 79	3,16	53,51
9. 7. 79	2,33	25,29
6. 8. 79	2,15	16,35
17. 8. 79	2,11	17,35
2. 10. 79	1,90	11,42
17. 10. 79	2,20	19,99

ANNEXE 2

MOYENNE DE NIVEAUX MOYENS JOURNALIERS (m)

Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1974	-	-	-	-	-	2,39	2,29	2,03	2,05	2,00	2,08	2,08
1975	2,14	2,21	2,47	2,41	2,15	1,92	1,84	1,74	1,78	2,00	1,94	2,13
1976	2,27	2,26	2,45	2,46	2,40	2,06	1,88	1,80	1,84	1,89	1,99	2,18
1977	2,42	2,59	2,50	2,81	2,91	2,98	2,07	1,96	1,96	1,88	2,29	2,46
1978	2,34	2,42	2,90	3,06	2,66	2,25	2,09	2,02	1,96	1,99	2,31	2,68
1979	2,49	2,98	2,76	3,17	3,07	2,54	2,27	2,11	1,97	2,00	2,23	-
1980	2,41	2,25	2,61	2,38	2,37	2,05	1,91	2,80	1,82	1,91	2,26	2,32
1981	2,41	2,36	2,51	2,65	2,50	2,11	1,95	1,89	1,97	1,91	1,92	2,23

ANNEXE 3

DEBITS MOYENS MENSUELS(m^3/s)

Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne annuelle
1974	25,44	22,25	25,12	27,83	21,58	23,77	21,06	14,52	15,09	13,79	15,66	15,65	20,16
1975	17,26	19,25	26,45	24,43	17,28	12,17	10,53	8,84	9,54	14,17	12,63	16,97	15,80
1976	20,82	20,23	25,43	25,96	24,07	15,13	11,33	9,91	10,61	11,78	13,87	18,72	17,32
1977	24,87	30,04	27,17	38,28	42,12	20,53	15,32	13,05	13,09	11,31	21,44	25,88	23,59
1978	22,38	24,84	42,32	47,32	32,18	19,83	15,84	14,29	13,09	13,82	21,75	32,97	25,09
1979	27,00	44,87	35,74	53,01	48,71	28,24	20,16	16,29	15,21	14,02	19,51	25,99	28,90
1980	24,67	20,02	31,16	23,42	23,62	14,92	11,91	9,90	10,27	12,10	20,42	21,85	18,69
1981	24,48	22,84	27,90	31,87	27,39	16,46	12,64	11,51	13,31	11,96	12,22	19,45	19,34
Moyenne	23,85	26,01	30,89	34,90	30,82	18,88	14,85	12,29	12,28	12,87	17,19	21,64	19,97
Max	27,00	44,87	42,37	53,01	48,71	28,24	21,06	16,29	15,09	14,17	21,75	32,97	25,09
Min	17,26	19,25	25,43	23,42	17,28	12,17	10,53	8,84	9,57	11,51	12,22	13,65	15,80
Ecart type	3,23	9,11	6,16	11,72	11,13	5,29	4,01	2,66	1,90	1,18	4,03	6,02	3,63

ANNEXE 4

PRECIPITATIONS SUPERFICIELLES : 1333mm/an

MOYENNE DES PRECIPITATIONS MENSUELS (mm)

Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne annuelle
1974	173,9	112,5	167,0	228,4	101,2	35,6	19,6	3,4	74,4	80,1	114,8	109,1	1220,0
1975	129,9	150,8	179,3	139,5	64,4	0,6	24,8	0	78,0	123,4	126,7	155,0	1172,0
1976	115,0	156,5	150,4	175,3	106,4	0,7	1,7	14,9	81,3	109,1	168,0	158,6	1237,9
1977	207,0	165,3	144,0	260,1	115,9	3,4	0,1	28,7	63,0	53,5	278,6	130,1	1449,7
1978	160,4	168,2	261,3	195,8	45,6	18,2	0,0	19,2	56,0	120,7	196,4	208,2	1450,0
1979	136,1	249,3	161,7	271,6	82,6	29,5	0,3	0,1	3,8	90,8	142,9	135,7	1354,4
1980	124,2	116,4	150,1	129,3	127,6	1,4	0	0,3	106,7	102,0	199,9	190	1248,83
1981	156,1	112,8	192,3	156,4	98,8	2,6	1,0	18,9	61,2	100,1	163,4	172,3	1235,9
Moyenne	154,9	157,7	175,3	202,2	102,5	10,4	4,0	11,6	58,8	102,4	147,1	179,1	1333,0

ANNEXE 5

DEBITS MOYENS JOURNALIERS (m^3/s)
1974

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1						26.84	22.71	16.48	13.99	11.72	11.72	18.44
2						27.15	22.42	16.48	13.35	11.92	11.72	15.78
3						27.15	22.99	16.48	13.35	12.72	12.32	13.99
4						26.84	22.99	16.01	13.56	14.65	13.14	14.65
5						26.23	26.23	16.01	14.65	15.55	14.21	16.72
6						25.92	25.02	15.55	14.65	14.87	14.65	19.72
7						25.02	23.85	15.55	13.77	13.56	13.56	15.55
8					14.21	24.14	23.85	15.10	13.35	13.56	12.72	15.78
9					39.99	23.84	21.87	15.10	12.93	13.35	13.14	15.10
10					40.77	23.56	21.05	15.10	13.35	12.32	13.35	16.72
11					48.08	23.27	38.99	14.65	15.10	11.72	13.99	18.69
12					45.15	23.56	39.99	14.65	23.56	11.72	13.99	16.96
13					44.75	24.14	19.98	14.43	27.46	12.72	14.65	14.87
14					41.94	27.78	19.72	14.43	22.15	15.10	13.35	13.77
15					43.93	26.84	19.20	14.43	18.94	17.69	15.32	13.56
16					39.61	25.02	18.94	14.21	17.20	15.55	15.55	14.65
17					36.62	25.92	18.94	14.21	17.44	15.55	18.94	13.99
18					37.36	23.85	18.94	13.99	15.78	15.32	16.25	13.35
19					36.99	23.56	18.69	13.99	16.25	16.96	14.87	13.35
20					39.61	22.71	18.44	13.77	14.87	15.10	13.56	12.52
21					33.76	21.59	18.44	13.77	13.77	13.14	13.99	12.72
22					31.69	21.32	17.94	13.77	13.56	12.32	13.56	14.65
23					38.85	21.05	17.69	13.77	13.35	11.92	14.87	19.20
24					43.13	21.05	17.44	13.77	13.14	11.72	17.69	15.55
25					37.36	20.78	17.20	13.77	12.93	11.92	25.02	13.99
26					33.76	20.78	16.72	13.77	12.52	15.32	23.56	15.32
27					32.72	20.78	16.48	13.77	12.32	16.01	22.71	17.69
28					30.36	20.78	16.48	13.35	12.11	14.43	19.46	15.78
29					29.70	20.78	16.48	13.35	11.72	13.35	18.44	17.44
30					29.05	20.78	16.01	13.35	11.72	13.14	19.72	16.96
31					27.46		16.01	13.14		12.52		17.69
MOYENNE						23.77	21.05	14.52	15.09	13.79	15.66	15.65
MAX						27.78	39.99	16.48	27.46	17.69	25.02	19.72
MIN						20.78	16.01	13.14	11.72	11.72	11.72	12.52

ANNEXE 6

DEBITS MOYENS JOURNALIERS (m^3/s)

1975

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1	17.44	12.93	22.15	25.32	17.94	1443	10.76	9.84	7.98	12.52	1020	12.11
2	16.01	15.10	18.19	24.14	18.69	13.77	10.57	9.84	7.98	12.11	10.76	11.92
3	14.21	16.48	17.20	25.92	19.46	13.77	10.57	9.66	7.98	14.43	10.02	11.72
4	13.35	16.72	30.03	33.76	19.20	13.56	10.57	9.49	7.98	12.93	9.49	12.93
5	13.14	15.10	36.99	38.10	22.42	13.35	10.57	9.49	7.98	10.57	9.66	11.92
6	16.96	15.55	32.37	33.76	19.72	13.35	10.20	9.31	9.14	9.66	10.20	13.14
7	19.98	27.15	31.02	31.36	17.69	13.35	10.20	9.31	11.33	9.31	9.49	15.32
8	23.85	27.46	26.53	26.23	16.72	12.93	10.20	9.31	11.14	8.80	9.31	21.59
9	20.51	22.42	30.36	22.99	16.01	12.93	10.20	9.3 1	10.95	9.31	8.80	23.85
10	18.69	24.73	31.36	20.51	16.48	1.52	9.84	9.14	10.39	13.35	8.47	21.59
11	19.98	26.23	25.62	24.14	16.25	12.52	10.20	8.97	9.66	13.35	8.14	16.96
12	22.15	21.87	24.14	21.87	15.55	12.52	10.02	8.80	9.14	19.52	8.97	13.99
13	19.72	17.69	21.05	19.72	15.10	12.52	9.84	8.80	8.80	10.39	14.43	13.56
14	22.71	20.24	18.69	18.94	15.10	12.52	9.84	8.80	8.47	9.49	15.10	16.25
15	22.99	19.20	20.51	20.24	.15.32	12.11	9.84	8.80	9.49	9.66	15.55	17.69
16	19.46	16.01	31.02	23.27	17.20	12.11	9.49	8.80	12.93	16.01	14.21	13.99
17	16.61	14.43	29.70	23.85	18.69	11.72	9.49	8.80	8.97	15.55	13.14	15.55
18	16.25	13.56	32.37	24.73	21.87	11.72	9.49	8.80	8.47	18.44	13.35	15.32
19	18.19	12.72	30.36	23.27	19.72	11.33	9.49	8.63	8.30	16.72	14.43	28.41
20	20.24	11.92	28.73	21.05	17.20	11.33	9.45	8.47	8.63	17.94	14.43	21.32
21	20.78	11.72	33.76	24.43	16.25	11.33	9.49	8.47	8.80	30.36	16.96	18.19
22	17.69	11.72	35.53	25.62	15.78	11.33	9.84	8.47	10.57	24.73	19.72	14.43
23	15.55	11.52	35.89	28.09	16.01	11.33	1.002	8.47	10.39	22.99	15.78	16.72
24	15.78	19.20	31.69	24.73	16.25	10.95	1.076	8.47	9.49	17.69	15.55	19.72
25	13.99	30.36	26.84	24.14	15.78	10.95	11.14	8.47	9.49	15.55	17.69	18.69
26	13.35	32.03	22.71	24.43	15.10	10.95	13.14	8.47	9.49	13.56	16.25	17.20
27	12.93	29.37	20.24	23.56	14.87	10.95	13.35	8.14	9.49	12.93	13.56	19.20
28	12.52	25.62	19.20	21.32	18.19	10.95	13.35	8.14	9.31	12.93	12.72	16.72
29	12.11		17.94	19.72	17.94	10.95	13.56	8.14	12.11	12.93	11.72	14.43
30	14.43		17.69	13.77	17.69	10.95	10.57	8.14	12.52	12.52	10.95	22.42
31	13.99		19.98		15.55		10.39	8.14		10.95	12.64	19.46
MOYENNE	17.26	19.25	26.45	24.43	17.28	12.17	10.53	8.84	9.52	14.17	19.72	16.97
MAX	23.85	32.03	36.99	38.10	22.42	14.43	13.56	9.84	12.93	30.36	8.14	28.41
MIN	12.11	11.52	17.20	1377	14.87	10.95	9.49	8.14	7.82	8.80		11.72

ANNEE : 1975 MOYENNE= 15.78 MAX= 38.10
MIN= 7.82

ANNEXE 7

DEBITS MOYENS JOURNALIERS (m^3/s)
1976

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1	22.15	11.72	21.32	18.94	30.03	21.59	12.32	10.02	8.80	8.47	8.47	29.37
2	21.32	14.87	23.85	17.69	25.92	19.72	12.11	9.84	9.49	10.95	9.31	34.46
3	20.51	13.77	31.02	18.69	24.14	18.94	11.72	9.84	10.20	11.72	10.39	24.73
4	20.78	14.65	26.23	23.27	29.05	17.69	11.72	9.84	11.14	11.33	8.97	19.72
5	28.73	15.78	24.43	33.41	28.41	17.44	11.72	9.66	13.14	13.35	9.31	23.85
6	33.41	15.32	20.24	29.37	27.46	16.96	11.72	9.84	12.93	16.48	9.49	20.24
7	35.17	19.72	21.32	2653	25.32	16.48	11.92	9.66	11.14	16.25	9.66	16.25
8	31.36	25.32	21.32	22.99	24.73	16.01	12.11	9.66	10.02	13.99	10.39	13.56
9	25.32	20.78	20.78	20.24	24.14	16.01	11.92	9.66	9.31	13.77	10.39	15.10
10	23.56	17.20	25.92	18.69	25.32	15.78	11.92	11.92	9.84	12.52	9.14	13.56
11	30.03	14.43	27.78	25.32	22.99	15.55	12.11	10.20	9.14	12.52	13.56	14.43
12	31.02	13.35	35.17	24.73	20.78	15.10	12.11	10.57	8.80	10.39	13.14	14.43
13	27.78	24.43	37.73	28.09	19.72	15.10	11.92	10.39	8.97	9.49	10.95	15.55
14	22.99	19.46	30.69	36.99	19.46	14.65	11.92	10.39	8.80	8.97	13.56	15.55
15	23.56	22.42	21.59	35.53	19.20	14.43	11.72	10.95	8.80	8.63	13.14	12.32
16	20.24	21.59	18.69	32.37	18.94	14.21	11.72	10.57	8.80	8.47	13.99	11.14
17	21.59	32.03	19.20	24.73	18.69	14.21	11.52	10.39	17.44	8.63	12.72	10.39
18	19.20	31.02	18.19	28.09	18.94	13.99	11.52	10.39	15.78	10.20	12.52	11.14
19	16.25	27.15	36.26	23.56	18.44	13.77	11.33	10.95	13.99	13.99	12.32	10.39
20	15.32	23.56	29.37	22.99	19.20	13.77	10.95	10.57	10.95	16.25	13.14	11.14
21	14.21	22.42	22.15	25.02	18.94	13.77	10.76	10.20	11.52	14.21	17.44	10.95
22	13.77	18.69	23.56	25.92	18.44	13.77	10.76	9.84	10.39	11.92	17.20	15.55
23	13.56	19.98	25.62	25.32	24.43	13.56	10.76	9.49	8.14	10.02	18.19	20.51
24	13.56	18.44	31.36	24.14	19.72	13.56	10.76	9.31	10.57	9.49	20.78	33.06
25	15.32	17.69	26.53	24.43	20.51	13.35	10.57	9.14	11.72	18.94	19.98	34.82
26	17.69	24.14	23.85	29.70	22.99	13.35	10.57	9.14	10.57	13.77	18.19	25.92
27	14.69	25.62	25.32	15.55	24.73	12.93	10.39	9.14	10.20	11.52	19.46	19.98
28	13.56	21.59	27.15	13.99	38.10	12.93	10.20	8.97	9.66	10.76	19.98	16.96
29	14.21	19.46	25.02	44.34	38.47	12.72	10.20	8.97	9.14	10.02	21.05	14.65
30	12.72		26.53	38.10	32.37	12.52	10.20	8.80	8.80	9.31	19.20	24.14
31	11.92		10.24		26.53		10.20	8.80		8.80		26.53
MOYENNE	20.82	20.23	25.43	25.96	24.07	15.13	11.33	9.91	10.61	11.78	13.87	18.72
MAX	35.17	32.03	37.73	44.34	38.47	21.59	12.32	11.92	17.44	18.94	21.05	34.82
MIN	11.92	11.72	18.19	13.99	18.44	12.52	10.20	8.80	8.14	8.47	8.47	10.39

ANNEE : 1976 MOYENNE= 17.32 MAX= 44.34
MIN= 8.14

ANNEXE 8

DEBITS MOYENS JOURNALIERS (m^3/s)
1977

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1	2809	30.69	28.41	38.10	60.76	24.73	17.44	13.77	17.94	12.72	10.76	32.03
2	3136	31.36	25.32	32.37	55.59	24.43	17.44	13.56	14.65	13.56	10.95	35.53
3	3237	31.02	26.53	38.10	53.77	25.32	16.96	13.56	13.56	13.14	19.46	42.73
4	2356	26.53	25.32	32.37	51.10	24.14	16.72	13.56	12.93	12.72	22.71	35.17
5	2187	22.99	27.46	14.65	51.10	22.99	16.48	13.35	12.52	10.76	18.19	31.02
6	1819	28.09	27.46	17.69	66.19	22.71	16.48	13.56	12.11	10.57	14.87	29.70
7	1794	33.06	25.32	15.10	62.22	22.15	16.48	13.56	11.72	10.39	12.93	20.24
8	1672	38.47	30.36	13.99	60.76	21.87	16.48	13.56	11.72	10.20	12.93	19.72
9	1946	37.73	32.37	42.73	59.33	21.59	16.01	13.55	11.72	10.20	12.93	18.94
10	2684	30.03	33.06	38.85	53.77	21.59	16.01	13.35	11.72	10.20	13.56	29.37
11	2051	42.33	38.10	39.99	51.98	21.05	16.01	13.35	11.52	9.84	15.78	28.09
12	1844	31.36	40.38	36.26	53.77	21.05	15.55	13.14	11.72	9.66	18.69	27.78
13	1578	24.73	38.85	33.76	45.15	21.05	15.55	12.93	11.52	9.84	15.78	28.09
14	2078	23.27	29.05	33.76	41.15	20.78	15.55	12.52	12.11	9.66	19.98	27.15
15	1625	21.32	25.92	39.61	38.85	20.78	15.55	12.32	11.72	10.20	16.25	25.02
16	1794	21.05	22.15	41.15	37.73	20.24	15.55	12.52	11.33	10.20	28.41	25.32
17	2562	18.69	20.78	45.15	36.99	19.98	15.10	12.32	10.95	9.84	25.92	22.99
18	2592	19.20	19.98	49.59	35.17	19.72	15.10	12.11	11.52	9.49	26.53	21.05
19	2715	27.46	20.51	45.97	32.37	19.46	15.10	12.11	13.99	9.49	32.03	19.98
20	3446	28.09	21.59	40.38	31.36	19.46	14.65	11.92	15.32	9.49	31.36	19.18
21	3169	27.15	20.24	36.62	30.36	18.94	14.65	11.92	17.20	9.84	31.02	17.20
22	2562	32.72	25.92	37.36	29.70	18.44	14.21	11.72	15.78	16.48	27.78	19.46
23	2778	34.11	22.99	38.85	28.73	18.19	14.21	11.72	13.56	13.99	24.43	24.73
24	2970	33.76	20.24	41.55	27.78	17.94	14.21	12.52	12.72	13.99	28.41	28.41
25	3036	43.53	18.19	47.65	29.70	17.94	13.99	12.93	11.52	15.55	23.56	25.92
26	3169	36.99	19.20	50.66	35.89	17.94	13.99	12.11	11.14	12.72	26.23	26.23
27	28.09	32.37	19.20	50.22	34.11	17.94	13.99	11.93	10.76	11.92	25.32	28.23
28	24.74	36.06	27.15	44.75	30.36	17.94	13.99	12.72	13.56	11.72	26.53	30.03
29	23.73		38.85	50.66	27.46	17.94	13.77	12.32	18.19	10.95	25.32	22.99
30	24.74		38.10	60.28	26.53	17.69	13.77	14.65	15.10	10.76	24.73	20.24.
31	33.73		33.41		25.92		13.77	18.69		10.57		20.24
Moyenne	24.87	30.04	27.17	38.28	42.12	20.53	15.31	13.05	13.09	11.31	21.44	25.88
Max	34.46	43.53	40.38	60.28	66.19	25.32	17.44	18.69	18.19	16.48	32.03	42.79
Min	15.78	18.69	18.19	13.99	25.92	17.69	13.77	11.72	10.76	9.49	10.76	17.20

ANNEE 1977 MOYENNE :23.54 MAX :66.19
MIN :9.49

ANNEXE 9

DEBIT MOYENS JOURNALIERS (m^3/s)
1978

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1	22.15	14.87	30.36	52.42	42.73	22.15	17.69	14.43	12.11	10.95	19.46	22.15
2	37.36	32.72	26.53	46.39	59.33	21.59	17.44	14.21	12.11	10.95	15.32	34.11
3	25.32	25.92	25.32	45.98	48.93	21.32	17.44	14.21	12.11	13.56	14.87	39.61
4	22.99	27.78	24.14	53.77	49.36	21.05	17.44	14.43	11.92	12.93	17.69	35.89
5	18.19	26.53	25.32	51.10	50.22	21.05	17.44	16.01	11.72	13.56	16.25	42.33
6	17.20	16.72	24.14	48.50	45.15	21.05	16.96	19.46	11.52	19.46	15.78	42.33
7	16.01	15.78	22.99	43.53	41.15	20.78	16.96	21.32	11.33	22.42	15.78	39.61
8	18.19	14.87	21.59	41.15	37.36	21.32	16.96	20.78	11.33	22.42	15.55	33.06
9	19.46	14.43	37.73	44.34	34.46	21.87	16.48	16.01	17.44	16.01	17.20	27.46
10	16.72	15.78	39.99	47.65	35.53	21.59	16.48	15.32	16.96	14.43	14.87	29.05
11	21.32	29.05	35.17	50.66	34.46	21.32	16.25	14.21	18.19	12.72	13.99	27.15
12	20.24	26.53	34.82	57.91	33.76	20.24	16.25	14.21	18.94	12.32	13.56	33.76
13	22.29	26.23	32.03	52.42	32.37	19.98	16.01	13.99	14.43	11.92	14.87	33.06
14	21.05	27.78	27.78	50.66	31.02	19.46	16.01	13.99	13.35	12.72	14.43	29.05
15	25.05	24.73	31.69	46.81	29.70	19.46	16.01	13.99	12.32	12.72	17.44	41.15
16	32.03	25.32	34.46	54.67	28.41	19.46	15.78	13.77	12.11	11.72	31.69	40.38
17	29.05	23.85	37.36	56.51	28.09	19.20	15.78	13.77	11.72	11.14	27.78	42.73
18	22.71	22.15	31.02	53.32	28.09	19.20	15.55	13.56	11.52	10.95	27.46	33.76
19	22.71	22.15	48.08	50.22	27.15	18.94	15.55	13.35	11.33	10.76	28.73	31.36
20	28.09	18.69	69.78	43.93	26.84	18.94	15.10	13.35	12.32	10.39	20.78	26.53
21	30.03	23.85	75.09	41.15	26.23	19.46	15.10	12.93	12.32	10.20	22.99	24.14
22	29.37	29.37	65.69	37.73	25.92	19.20	14.87	12.93	11.92	10.76	25.32	27.78
23	25.92	31.36	55.44	38.10	25.32	18.69	14.87	12.93	11.72	14.65	30.69	29.05
24	21.87	26.23	47.65	39.99	24.73	18.69	14.87	12.93	11.52	13.35	27.15	31.36
25	20.51	24.73	52.42	43.53	24.43	18.44	14.65	12.93	11.33	12.52	29.05	29.05
26	21.05	41.94	63.20	42.33	23.85	18.19	14.65	12.52	11.72	14.65	29.37	26.23
27	20.24	36.26	58.38	42.73	23.85	18.19	14.65	12.52	16.72	15.10	35.89	32.72
28	17.94	30.03	58.85	45.57	23.27	18.19	14.65	12.32	14.43	18.19	29.37	36.99
29	16.72		62.22	48.93	22.99	17.94	14.43	12.32	12.52	16.96	25.92	35.89
30	16.01		57.44	47.65	22.71	17.94	14.43	12.11	13.56	13.56	23.27	34.46
31	15.32		54.67		22.42		14.43	12.11		14.43		30.03
MOYENNE	22.38	24.84	42.37	47.32	32.58	19.83	15.84	14.29	13.08	13.82	21.75	32.98
MAX	37.36	41.94	75.09	57.91	59.33	22.15	17.69	21.32	18.94	22.42	35.89	42.73
MIN	15.32	14.43	21.59	37.73	22.42	17.94	14.43	12.11	11.33	10.20	13.56	22.15

ANNEE : 1978 MOYENNE= 25.09 MAX = 75.09
MIN = 10.20

ANNEXE10

DEBIT MOYENS JOURNALIERS (m^3/s)
1979

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1	26.73	40.77	35.89	33.06	70.30	32.03	22.71	17.69	14.21	11.72	15.10	16.72
2	25.92	43.53	32.72	36.26	80.61	32.03	22.42	17.44	13.99	11.72	13.56	17.69
3	24.14	43.13	30.36	31.69	71.88	32.03	22.42	17.69	14.43	11.52	14.87	20.24
4	22.42	43.93	29.70	29.37	63.20	31.69	22.15	17.44	14.65	11.52	26.53	16.48
5	25.32	35.17	28.73	33.06	58.38	30.69	22.15	17.44	14.21	11.52	20.78	15.55
6	22.71	33.76	27.78	40.38	58.38	30.36	22.15	17.44	13.77	11.33	17.20	15.55
7	22.99	32.03	26.53	46.39	56.51	29.70	22.15	17.44	13.77	11.33	16.25	15.55
8	20.78	30.69	29.70	52.42	63.70	29.37	21.87	17.44	13.56	11.72	14.87	15.32
9	28.41	39.99	35.17	57.44	59.33	28.73	21.87	17.44	13.77	12.11	15.10	16.48
10	27.15	45.98	33.06	74.01	57.44	28.41	21.59	16.96	13.99	12.32	17.69	17.20
11	31.69	45.98	38.85	88.69	56.51	28.09	21.05	16.96	13.77	11.72	20.51	21.32
12	28.73	42.73	40.38	77.27	59.33	32.03	20.78	16.72	13.77	11.52	21.05	20.78
13	24.73	38.85	41.15	71.88	54.22	35.53	20.24	16.48	13.77	11.52	20.24	19.98
14	25.92	41.94	38.85	70.30	50.66	33.06	19.98	16.48	13.56	11.33	17.20	18.44
15	22.15	45.57	38.85	63.20	46.39	31.02	19.98	16.25	13.35	13.14	16.25	20.24
16	23.56	42.73	33.06	65.69	44.34	29.70	19.98	16.25	13.35	14.87	15.32	22.15
17	23.56	41.15	35.53	50.22	43.53	28.41	19.98	16.25	13.14	18.69	21.05	25.92
18	20.51	38.47	34.82	45.57	41.94	17.15	19.46	16.01	12.93	17.69	21.87	34.46
19	19.72	34.46	41.55	43.53	41.15	26.53	19.20	16.01	12.93	13.56	23.27	30.36
20	18.94	34.08	43.93	50.66	39.61	26.23	18.94	16.01	12.93	13.14	25.02	25.62
21	18.69	56.51	36.26	49.79	38.10	25.92	18.94	16.01	12.72	12.93	22.71	21.32
22	18.94	59.33	43.13	52.87	37.36	25.32	18.94	16.01	12.72	12.93	21.87	19.20
23	23.27	64.69	48.08	48.50	36.62	25.32	18.69	16.01	12.72	12.93	28.41	20.78
24	40.38	66.19	42.33	45.15	36.26	25.02	18.69	15.55	12.32	14.43	25.02	26.84
25	32.37	63.70	46.81	40.77	36.26	25.02	18.44	15.32	12.11	14.43	24.73	30.69
26	29.70	53.32	32.72	37.73	35.53	24.43	18.44	15.10	12.11	16.25	23.27	32.72
27	32.37	43.93	29.70	50.22	35.17	23.85	18.44	14.87	12.11	18.19	19.20	30.36
28	33.76	36.61	33.06	58.85	35.17	23.56	18.44	14.65	11.92	21.59	17.20	31.36
29	38.47		31.02	72.94	35.17	23.27	18.44	14.65	11.92	18.19	14.65	39.61
30	43.53		35.17	72.41	33.76	22.71	18.19	14.65	11.92	19.46	14.65	32.03
31	39.61		33.06		33.06		18.19	14.21		19.20		-
MOYENNE	27.00		35.74	53.01	48.71	28.24	20.16	16.29	13.21	14.02	19.51	-
MAX	43.53		48.08	88.69	80.61	35.53	22.71	17.69	14.65	21.59	28.41	-
MIN	18.69		26.53	29.37	33.06	22.71	18.19	14.21	11.92	11.33	13.56	-

ANNEXE 11

DEBIT MOYENS JOURNALIERS (m^3/s)
1980

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1	33.06	26.53	32.03	21.32	17.44	18.69	13.35	10.57	9.14	12.93	11.33	14.87
2	26.53	27.78	37.36	20.78	16.96	18.94	13.35	10.57	9.14	11.33	10.76	13.99
3	27.78	20.51	38.85	19.72	18.69	17.94	13.35	10.57	8.97	10.02	9.84	13.35
4	21.59	22.71	41.94	17.69	21.87	17.44	13.35	10.39	8.80	9.49	10.39	12.93
5	20.24	22.15	45.57	16.72	19.72	16.96	12.93	10.39	8.80	9.14	19.98	14.21
6	17.69	20.24	43.53	16.01	22.15	16.48	12.93	10.39	8.63	8.97	21.59	15.32
7	16.72	20.24	43.13	17.69	28.73	16.01	12.93	10.39	8.47	8.47	17.69	20.78
8	16.96	21.32	42.73	19.46	25.02	15.78	12.52	10.39	8.47	8.47	16.25	32.37
9	17.20	20.78	31.69	23.85	23.56	15.55	12.52	10.39	10.57	8.47	15.55	24.43
10	17.44	20.24	30.36	23.85	28.41	15.55	12.52	10.39	10.76	8.14	16.48	27.46
11	17.44	17.20	28.41	22.15	36.26	15.10	12.32	10.39	11.52	8.14	21.87	23.27
12	18.94	16.25	32.03	18.94	38.47	15.10	12.32	10.57	11.72	8.14	27.15	27.15
13	22.42	16.01	39.99	21.32	41.15	14.87	12.11	10.20	12.32	8.47	21.59	28.41
14	21.31	16.72	43.53	27.78	39.61	14.65	12.11	10.20	13.35	9.14	17.20	20.78
15	26.84	16.96	46.39	31.36	36.26	14.65	11.92	10.20	12.93	9.49	16.48	19.20
16	27.78	18.19	46.81	31.69	25.32	14.21	11.72	9.84	12.52	12.32	16.01	19.46
17	33.06	17.44	42.73	29.05	21.59	13.99	11.72	9.84	12.32	13.56	24.73	20.24
18	32.37	16.72	28.41	32.37	24.43	13.77	11.52	9.84	9.84	13.56	30.36	19.20
19	21.59	15.55	27.15	31.02	21.59	13.77	11.52	9.84	9.66	21.05	22.15	19.72
20	34.82	15.55	25.92	29.70	20.78	13.56	11.33	9.49	9.49	17.94	30.03	25.02
21	29.05	15.55	23.85	26.23	20.24	13.56	11.33	9.49	9.14	17.94	30.03	27.78
22	20.24	16.48	19.98	21.59	19.98	13.56	11.33	9.49	9.14	20.51	28.41	24.14
23	19.20	16.96	19.46	21.05	19.20	13.56	11.33	9.31	9.14	18.44	25.02	25.92
24	19.46	18.69	19.46	31.36	18.94	13.56	11.14	9.31	9.14	14.87	25.62	22.71
25	38.10	19.20	18.94	28.41	18.44	13.56	10.95	9.31	9.14	12.32	31.36	22.42
26	36.62	15.78	18.19	23.56	18.19	13.35	10.95	9.31	8.97	13.35	21.32	22.99
27	28.73	27.46	19.72	21.87	17.94	13.35	10.95	9.31	8.97	12.72	17.94	29.05
28	28.09	33.06	20.24	19.46	17.44	13.35	10.95	9.14	9.66	11.33	16.72	26.84
29	28.41	28.41	16.96	18.69	17.44	13.35	10.95	9.14	13.99	11.92	22.42	25.92
30	21.32		18.19	17.94	17.94	13.35	10.57	9.14	13.35	12.93	16.48	20.78
31	23.85		22.42		18.44		10.57	9.14		11.72		16.72
MOYENNE	24.67	20.02	31.16	23.42	23.62	14.92	11.91	9.90	10.27	12.11	20.42	21.85
MAX	38.10	33.06	46.81	32.37	41.15	18.94	13.35	10.57	13.99	21.05	31.36	32.37
MIN	16.72	15.55	16.96	16.01	16.96	13.35	10.57	9.14	8.47	8.14	9.84	12.93

ANNEE : 1980 MOYENNE= 18.70 MAX = 46.81
MIN = 8.14

ANNEXE 12

DEBIT MOYENS JOURNALIERS (m^3/s)
1981

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1	21.87	25.32	20.78	33.41	25.02	27.15	1377	11.92	17.69	14.43	13.56	10.76
2	28.09	28.41	19.46	30.69	24.43	25.92	13.35	11.92	20.24	14.21	12.72	12.11
3	30.36	29.05	20.78	24.73	25.02	20.24	13.35	11.92	20.78	13.77	11.52	11.52
4	25.62	26.53	21.05	24.43	24.73	18.69	13.35	11.72	16.72	14.43	10.76	9.66
5	20.24	17.69	20.24	24.14	28.73	18.19	13.35	11.33	15.78	15.10	9.49	15.55
6	22.15	21.87	21.87	23.85	45.57	18.19	13.35	10.95	14.43	14.65	9.49	18.94
7	28.73	19.98	25.32	22.99	43.93	17.94	13.35	10.95	11.72	14.21	9.84	17.94
8	26.53	22.15	24.73	25.32	43.53	17.44	12.93	10.95	11.33	13.35	14.43	18.94
9	24.14	28.73	28.09	26.53	35.17	16.96	12.93	10.95	11.52	11.52	13.99	15.55
10	21.59	24.14	24.14	30.69	33.76	16.96	12.93	10.95	13.35	10.95	14.65	14.21
11	21.05	25.62	22.42	34.82	32.72	16.48	12.93	10.95	15.55	11.72	17.44	13.14
12	20.78	22.42	21.32	40.77	31.36	16.25	12.93	10.95	17.20	12.72	18.44	19.98
13	19.46	21.32	20.24	41.94	31.36	16.01	12.93	10.76	20.51	11.14	17.44	21.05
14	19.98	19.98	18.19	41.94	31.36	16.01	12.93	10.57	18.19	10.57	16.01	26.84
15	20.78	19.46	17.44	40.77	32.37	15.78	12.52	10.57	13.77	10.20	11.33	24.43
16	24.43	18.94	20.51	39.61	30.36	15.55	12.52	10.57	13.56	9.84	10.57	22.42
17	30.69	21.32	18.69	35.89	29.05	15.55	12.52	10.57	11.72	9.49	9.84	21.32
18	32.37	22.71	19.72	33.06	27.78	15.10	12.52	11.72	10.76	9.14	9.66	21.05
19	26.84	27.15	25.92	31.36	26.53	15.10	12.52	14.21	10.76	9.66	9.66	20.78
20	43.13	29.05	39.23	32.37	26.23	14.65	12.11	14.43	10.20	11.52	9.49	20.51
21	33.76	24.73	38.10	37.73	21.87	14.21	12.11	13.99	9.84	11.72	9.49	19.98
22	35.53	22.99	35.17	35.89	21.05	14.21	12.11	13.56	9.84	10.95	9.49	20.24
23	25.32	21.32	36.99	34.46	20.51	14.21	12.11	11.92	9.84	10.57	10.20	21.59
24	24.43	19.72	32.37	32.37	19.72	14.21	12.11	1192	9.84	9.84	12.93	20.24
25	23.85	19.46	43.93	30.36	18.69	13.99	12.11	11.14	9.49	9.84	13.77	19.20
26	17.20	18.69	44.34	29.05	17.94	13.77	12.11	10.57	9.49	10.39	13.35	17.94
27	16.25	21.32	42.33	27.78	17.44	13.77	12.11	10.57	9.14	10.95	12.72	21.87
28	15.55	20.24	42.33	31.02	17.20	13.77	12.11	9.84	9.14	10.57	11.92	25.32
29	15.10		34.82	29.70	16.25	13.77	12.11	9.84	11.14	11.14	10.76	28.09
30	15.10		33.41	28.41	20.51	13.77	11.92	9.84	15.78	14.87	11.72	26.23
31	28.09		31.02		29.05		11.92	14.87		17.20		25.62
MOYENNE	24.48	22.84	27.90	31.87	27.39	16.46	1102.64	11.51	13.31	11.96	12.22	19.45
MAX	48.13	29.05	44.34	41.91	45.57	27.15	13.77	14.87	20.78	17.20	18.44	28.09
MIN	15.10	17.69.	17.44	.22.99	16.25	13.77	11.92	9.84	9.14	9.14	9.49	9.66

ANNEE : 1981 MOYENNE= 19.32 MAX = 45.57
MIN = 9.14