



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE ET PRODUCTIQUE –DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

UFR : GENIE INDUSTRIEL

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie Industriel

N° d'ordre : 30/37

Date de soutenance : 03 Mai 2008

# MICROCENTRALE HYDROELECTRIQUE FLOTTANTE

(Régulation et électrotechnique de production)

Présenté par : RAKOTONINDRINA Tahiry Fanantenana

Directeurs de mémoire :

- Monsieur RASOLDIER Olivier, Maître de conférences à l'ESPA
- Monsieur RABENARIVO Michel, Enseignant à l'ESPA

Promotion 2007



DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE ET PRODUCTIQUE –DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

UFR : GENIE INDUSTRIEL

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie Industriel  
N° d'ordre : 30/37

Date de soutenance : 03 Mai 2008

# MICROCENTRALE HYDROELECTRIQUE FLOTTANTE

(Régulation et électrotechnique de production)

Présenté par : RAKOTONINDRINA Tahiry Fanantenana

Directeurs de mémoire :

- Monsieur RASOLDIER Olivier, Maître de conférences à l'ESPA
- Monsieur RABENARIVO Michel, Enseignant à l'ESPA

Président : Monsieur RAKOTOMANANA Charles Rodin, Maître de conférences à l'ESPA

Membres du jury :

- Monsieur JOELIHARITAHAKA Rabeatoandro, Enseignant à l'ESPA
- Monsieur RAVELOJAONA Johnson, Enseignant à l'ESPA

Promotion 2007

## **REMERCIEMENTS**

L’élaboration de ce document a nécessité la contribution de grand nombre de personnes, que ce soit de près ou de loin.

Tout d’abord, je remercie le SEIGNEUR pour sa bonté.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers :

- Monsieur RAMANANTSIZEHENNA Pascal, Directeur de l’Ecole Supérieur polytechnique d’Antananarivo.
- Monsieur JOELIHARITAHAKA Rabeatoandro, Chef de Département du Génie Mécanique et Productique, et Monsieur ANDRIANAHAHARISON Yvon, Chef de Département Génie Electrique, pour leur grande responsabilité envers la filière Génie Industriel
- Monsieur RASOLDIER Olivier, Maître de conférences à l’ESPA, et Monsieur RABENARIVO Michel, Enseignant à l’ESPA, qui ont bien voulu partager leurs connaissances et m’encadrer durant la réalisation de ce mémoire.
- Monsieur RAKOTOMANANA Charles Rodin, Maître de conférences à l’ESPA qui a eu la bienveillance de présider cette soutenance.
- Monsieur RAVELOJAONA Johnson pour son accord à examiner ce mémoire.
- Mes parents, ma famille ainsi que mes amis pour leur soutien moral, financier, affectif

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION:..... **11**

PRESENTATION DU PROJET :..... **12**

PARTIE 1 : ETUDE HYDRAULIQUE..... **14**

<b>I. Description du site : .....</b>	<b>14</b>
<b>II. Etude Hydraulique : .....</b>	<b>14</b>
1. Résultats de mesures : .....	15
2. Calcul de la vitesse moyenne : .....	15
3. Puissance hydraulique : .....	16
i. Le diamètre de la roue $D[m]$ :.....	16
ii. Caractéristiques de l'aube : .....	16
• <b>La hauteur <math>l[m]</math>:</b> .....	16
• <b>Le nombre d'aubes (<math>np</math>) :</b> .....	17
• <b>La largeur <math>L[m]</math> :</b> .....	17
iii. La puissance hydraulique $Phyd[W]$ :.....	18

PARTIE 2 :L'ELECTROTECHNIQUE DE PRODUCTION ..... **20**

<b>I. Choix de l'alternateur : .....</b>	<b>20</b>
1. Description de la machine :.....	20
2. Choix de l'alternateur: .....	21
i. Vitesse de rotation et nombre de pôles : .....	21
ii. Principe de fonctionnement de l'alternateur : .....	21
iii. Détermination de la fem induite : .....	22
• <b>Tension induite de mouvement (dans un conducteur) :</b> .....	22
• <b>Tensions induites fondamentale et harmoniques :</b> .....	24
• <b>Tension induite dans une spire :</b> .....	25
✓ <b>Facteur de distribution (<math>KZ</math>):</b> .....	25
✓ <b>Facteur de raccorciissement des pas(<math>KS</math>) :</b> .....	26
✓ <b>Facteur d'enroulement (<math>Kw</math>):</b> .....	27
• <b>Tension induite dans une phase :</b> .....	27
iv. Détermination des courants induits:.....	28

## PARTIE 3 : LA REGULATION ..... 33

<b>I. Les principaux constituants de la régulation : .....</b>	<b>33</b>
1. Le redresseur: .....	34
2. Le filtre .....	36
3. Le régulateur:.....	37
i. L'alimentation stabilisée :.....	37
ii. Le convertisseur à découpage : .....	38
4. L'onduleur :.....	41
i. Le circuit de puissance de l'onduleur : .....	42
ii. Le circuit de commande des cellules du convertisseur : .....	42
5. Le filtre : .....	43
<b>II. Dimensionnement de chaque dispositif : .....</b>	<b>43</b>
1. Dimensionnement du redresseur : .....	43
i. La tension moyenne : .....	43
ii. Le courant moyen :.....	44
iii. Tension inverse dans les diodes ( $Vdi$ ): .....	45
iv. Les courants caractéristiques des diodes : .....	45
2. Dimensionnement du condensateur de filtrage:.....	45
3. Dimensionnement des composants de l'alimentation stabilisée : .....	46
4. Dimensionnement du filtre :.....	47
5. Dimensionnement de l'onduleur : .....	48
i. Choix des transistors de puissance de l'onduleur: .....	48
ii. Dimensionnement du circuit d'aide à la commutation : .....	48
iii. Dimensionnement du circuit de commande : .....	49
6. Dimensionnement de l'alimentation à découpage : .....	53
i. Détermination des paramètres de l'alimentation : .....	53
ii. Choix de L :.....	54
iii. Choix de C : .....	55

## PARTIE 4 : ETUDE DE FLOTTAISON ..... 57

<b>I. Le volume de la carène : .....</b>	<b>57</b>
<b>II. Dimensions du flotteur : .....</b>	<b>59</b>
<b>III. Le système de fixation : .....</b>	<b>60</b>
1. Les efforts mis en jeu : .....	60
2. Dimensionnement des câbles : .....	61

## PARTIE 5 : EVALUATION ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE ..... 63

<b>I. Etude économique : .....</b>	<b>63</b>
<b>1. Devis estimatifs des matériels :.....</b>	<b>63</b>

2. Etude comparative : .....	64
3. Le flux net de trésorerie (FNT) ou CASH FLOW : .....	64
4. Calcul de la valeur actuelle nette (VAN):.....	65
5. Calcul du taux de rentabilité interne (TRI):.....	65
6. Calcul du délai de récupération du capital investi (DRCI) : .....	66
Interprétation : .....	66
<b>II. Etude d'impact environnemental:.....</b>	<b>67</b>
1. Le projet face à l'environnement : .....	67
2. Les principaux impacts susceptibles d'être causés par le projet : .....	68
i. Identification des impacts : .....	68
• Phase préparatoire : .....	68
• Phase de construction : .....	68
• Phase d'exploitation : .....	69
ii. Evaluation de l'importance des impacts : .....	69
3. Proposition de solutions pour atténuer les impacts négatifs : .....	70
4. Conclusion :.....	70
<b>CONCLUSION GENERALE : .....</b>	<b>71</b>
<b>ANNEXE : .....</b>	<b>72</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE – WEBOGRAPHIE .....</b>	<b>75</b>

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau 1** : Comparaison des différents moyens de production d'électricité.

**Tableau 2** : Résultats des mesures hydrauliques

**Tableau 3** : caractéristiques d'une plaque rectangulaire

**Tableau 4** : Valeurs de la puissance suivant la surface de la partie immergée

**Tableau 5** : Nombre de paires de pôles en fonction de la vitesse de rotation

**Tableau 6** : Valeurs des différents paramètres en fonction de la vitesse de rotation de la machine

**Tableau 7** : Types d'appareils avec leur facteur de puissance respectif

**Tableau 8** : Ordre de conduction des diodes

**Tableau 9** : valeurs des paramètres du convertisseur à découpage (type élévateur)

**Tableau 10** : Valeurs efficaces de tous les paramètres

**Tableau 11** : Ondulation du courant dans l'inductance

**Tableau 12** : Taux d'ondulation de la tension redressée

**Tableau 13** : paramètres du filtre

**Tableau 14** : les composants du circuit d'aide à la commutation

**Tableau 15** : résultats des paramètres du circuit ICL 8038

**Tableau 16** : paramètres de la commande des transistors de puissance

**Tableau 17** : résultats des paramètres du convertisseur

**Tableau 18** : contraintes sur l'interrupteur et la diode

**Tableau 19** : valeur des contraintes pour Q et D

**Tableau 20** : référence de Q et D

**Tableau 21** : masse des différents éléments de la centrale

**Tableau 22** : les caractéristiques du câble

**Tableau 23** : devis des matériels pour l'ensemble alternateur-régulateur

**Tableau 24** : Evaluation du flux net de trésorerie

## **LISTE DES FIGURES**

**Figure 1** : Schéma de principe de l'ensemble

**Figure 2** : Principe de la méthode de bouchon

**Figure 3** : Présentation de la roue avec les aubes décalées

**Figure 4** : Courbe représentative de la puissance hydraulique en fonction de la surface immergée

**Figure 5** : Répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer

**Figure 6** : Schéma montrant la longueur utile du conducteur

**Figure 7** : Schéma montrant la disposition des pas

**Figure 8** : Modèle équivalent d'un enroulement dans une phase

**Figure 9** : Diagramme synchrone d'une phase

**Figure 10** : Bilan de puissance d'un alternateur

**Figure 11** : Principe de la régulation

**Figure 12** : Schéma d'un redresseur triphasé en pont de Graetz

**Figure 13** : Allures des tensions d'entrée et de la tension de sortie

**Figure 14** : Comportement du courant dans une diode

**Figure 15** : Schéma montrant la disposition du filtre

**Figure 16** : Allure de la tension redressée et filtrée

**Figure 17** : Schéma de principe de l'alimentation stabilisée utilisant un transistor ballast

**Figure 18** : Schéma de principe d'une alimentation élévatrice de tension

**Figure 19** : Allures des paramètres entrant en jeu dans le convertisseur

**Figure 20** : Circuit de puissance d'un onduleur monophasé

**Figure 21** : Les signaux pour la commande des interrupteurs

**Figure 22** : représentation du filtre

**Figure 23** : Circuit d'aide à la commutation des interrupteurs

**Figure 24** : Représentation du ICL 8038

**Figure 25** : Représentation des signaux de sortie

**Figure 26** : Amplificateur non-inverseur

**Figure 27** : Circuit anti-chevauchement

**Figure 28** : Circuit de commande des transistors de puissance

**Figure 29** : Abaque pour le choix de L en fonction de la fréquence de découpage

**Figure 30** : Les efforts agissant sur le flotteur

**Figure 31** : Les dimensions caractéristiques du flotteur

**Figure 32** : Représentation simplifiée de la centrale

**Figure 33** : Le système de fixation de l'ensemble

**Figure 34** : Bilan des forces extérieures

**Figure 35** : Les efforts sur le câble

**Figure 36** : Tube de PITOT

**Figure 37** : Moulinet hydrométrique

**Figure 38** : Allures du courant et de la tension dans le condensateur

## **ABBREVIATIONS:**

Ar : Ariary

C : Condensateur

Centrale PV : centrale PhotoVoltaïque

D : diode

DRCI : Délai de Récupération du Capital Investi

EIE : Etude d'Impact Environnemental

$F_p$  : Fréquence de découpage

Fem : Force électromotrice

GELOSE : GEstion LOcale SEcurisée

IBS : Impôt sur les Bénéfices des Sociétés

IGBT : Insulate Gate Bipolar Transistor

JIRAMA : JIro sy RAno MALagasy

L : self

MAP : Madagasikara Am-Perinasa

MECIE : Mise En Conformité de l'Impact Environnemental

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

ONE : Office National pour l'Environnement

PGEP : Plan de Gestion Environnemental du Projet

PWM : Pulse Width Modulation

Q : interrupteur statique

R : Résistance

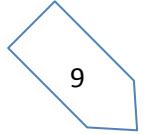
RCD : Résistance, Condensateur, Diode

Ré : nombre de Reynolds

RN2 : Route Nationale N°2

(S) : représentation de l'ensemble de la centrale

$t_{cc}$  : temps de charge du condensateur de filtrage



$t_d$  : Temps de déclenchement de l'interrupteur (temps d'ouverture)

$t_{dc}$  : temps de décharge du condensateur de filtrage

$t_e$  : Temps d'enclenchement de l'interrupteur (temps de fermeture)

$T_p$  : Période de découpage

TRI : Taux de Rentabilité Interne

VAN : Valeur Actuelle Nette

$\nu$  : Rang des harmoniques

$\Delta\theta$  : Période de conduction d'une diode

$\sigma_e$  : limite d'élasticité de l'acier Z6C13

## **INTRODUCTION:**

Actuellement, comme tout autre pays en voie de développement, Madagascar se lance dans la lutte contre la pauvreté en se basant sur un programme de développement qui est le MAP (ou Madagasikara Am-Perinasa), récemment mis en œuvre par le gouvernement Malagasy. Un des défis mentionnés dans ce plan vise à assurer un approvisionnement en énergie à coût abordable, notamment en servant des ressources renouvelables. Le problème de l'énergie est loin d'être résolu, même si l'accès à l'électricité est une base importante du développement et du bien-être. La société nationale de production et de distribution d'électricité n'arrive plus à satisfaire les besoins toujours croissants de tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. C'est une des raisons de l'émergence de nouvelles sociétés de production électrique.

C'est la raison pour laquelle ce présent ouvrage a été élaboré pour apporter une solution. L'étude contiendra plus particulièrement la régulation et l'électrotechnique de production d'une microcentrale hydroélectrique flottante destinée à un parc privé qui porte le nom de « MANDRAKA PARK ». Comme éléments principaux de la centrale, on peut citer : une turbine, suivie d'une boîte multiplicatrice, au bout de laquelle s'accouplera un alternateur accompagné d'un système de régulation. Le travail fera en sorte que l'énergie ainsi produite tiendra compte du cahier de charges imposé par le propriétaire. On tient à signaler que le sujet concernant la turbine et le multiplicateur ne sera pas abordé dans cette étude. Néanmoins, quelques valeurs seront reprises des travaux effectués par les deux autres étudiants de l'équipe qui conçoit toute la centrale.

Pour une bonne compréhension du contenu de cet ouvrage, on va détailler l'étude suivant le plan ci-après. Tout d'abord, on parlera d'une brève description du site, suivie de l'étude hydraulique ; puis on montrera l'étude de la production d'énergie et de la régulation ; ensuite on poursuivra avec l'étude de flottabilité de l'ensemble ; enfin on terminera avec l'évaluation économique et les études d'impacts environnementales.

## Présentation du projet :

Les microcentrales hydroélectriques connaissent un intérêt croissant parmi les technologies utilisant les énergies renouvelables. Elles pourraient constituer le moyen le plus fiable en électrification de puissance des localités isolées du réseau, et situées à proximité d'un cours d'eau ou d'un fleuve. Les statistiques montrent que les centrales hydroélectriques occupent actuellement la première place et tout porte à croire qu'elles la détiennent encore pendant plusieurs années.

Centrales	Fiabilité	Ratio
<b>Grandes centrales hydroélectrique</b>	86%	100-200
<b>Petites centrales hydroélectrique</b>	83%	80-100
<b>Centrale éolienne</b>	0,6%	10-30
<b>Centrale PV</b>	0,6%	20-50 (solaire thermique)

Tableau 1: comparaison des différents moyens de production d'électricité

Notre projet en question consiste à mettre en place une microcentrale hydroélectrique flottante pour l'approvisionnement du parc en électricité. Le terme « flottante » a été choisi pour éviter les grands travaux de génie civil, ainsi que pour une facilité de montage et de démontage éventuel de l'ensemble. D'ailleurs, la rivière exploitée ne possède que d'une faible énergie cinétique.

Les principaux constituants de la centrale sont :

- **Une turbine** : c'est le premier organe entrant en jeu dans le système. Elle reçoit l'énergie cinétique du cours d'eau, la convertit ensuite en énergie mécanique. Elle est fabriquée en acier inoxydable et est conçue pour obtenir le meilleur rendement.
- **Une boite multiplicatrice** qui sert à adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle imposée par l'alternateur, à son aval. Elle est composée de plusieurs organes de liaison mécanique (système poulies-courroies, transmission par chaîne). Elle est munie d'un système d'embrayage et de débrayage en cas de nécessité.
- **Un alternateur** convertissant l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. Il est accouplé directement au multiplicateur et délivre de l'électricité qui est traité par un régulateur pour être adapté à la consommation.
- **Un régulateur** ayant pour fonction d'améliorer la tension et le courant à livrer au client. Cet élément n'est pas sur le flotteur pour des raisons de sécurité et de facilité de maintenance.
- **Un organe de flottaison** assure la flottabilité et le support de la centrale. Ses dimensions sont fonction de la masse totale de l'ensemble. Un système d'amarrage à ses deux extrémités transversales est prévu pour assurer la fixation sur les rives.

Voici un schéma bloc de l'ensemble :

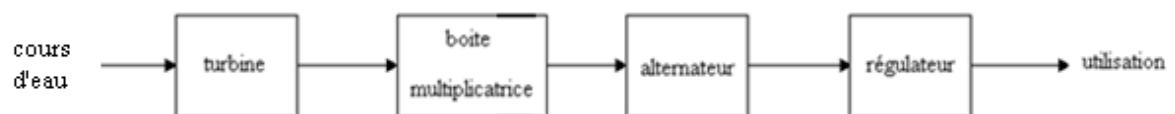


Figure 1: schéma de principe de l'ensemble

# Partie 1 : ETUDE HYDRAULIQUE

Avant toute chose, il est indispensable de préciser qu'une production d'énergie électrique nécessite la connaissance du site d'implantation avec ses caractéristiques, ainsi que les besoins des consommateurs. Ces informations sont nécessaires pour la recherche de la puissance utile disponible fournie par la centrale. Pour ce faire, il est primordial de cueillir des renseignements concernant la localité.

## I. Description du site :

L'endroit destiné à l'installation de la centrale se trouve à Ambatolaona, à peu près à 60 kilomètres de la capitale, sur la RN2, plus exactement dans un parc connu sous le nom de « MANDRAKA PARK ».

Depuis sa création, ce parc utilise un groupe électrogène comme source d'énergie électrique. Vue la brusque hausse du prix du carburant récemment rencontrée et le coût d'exploitation de l'énergie de la JIRAMA, le propriétaire a opté pour la recherche d'autres moyens de production d'électricité. Une centrale hydroélectrique flottante est une solution, comme le parc est situé à proximité d'un cours d'eau. Ce dernier provient du lac de Mantasoa et alimente la centrale de Mandraka. Il se peut que la vitesse de l'eau rencontre de légères variations suivant le débit fixé par la JIRAMA. On est donc censé à prendre en compte ce phénomène dans notre étude. La production risque d'être interrompue pendant un temps indéterminé, au cas où la vitesse de l'eau n'arrive pratiquement plus à faire fonctionner l'installation.

## II. Etude Hydraulique :

On dispose donc d'une rivière pour fournir de l'énergie hydraulique à la centrale. Cette dernière sera montée sur un flotteur, d'où le nom de « centrale flottante » ou « Hydraulienne ».

L'étude commence par la recherche de toutes les caractéristiques du cours d'eau, à savoir : la largeur exploitable, la profondeur, la vitesse moyenne, le débit moyen, etc.

Pour la recherche de la vitesse de l'eau, il existe plusieurs méthodes de mesure, telle que :

- Les flotteurs
- Le tube de PITOT
- Le moulinet hydrométrique

La première reste la plus intéressante parmi ces trois méthodes car la réalisation est très simple et très commode. Un petit schéma pourrait bien expliciter cette méthode.

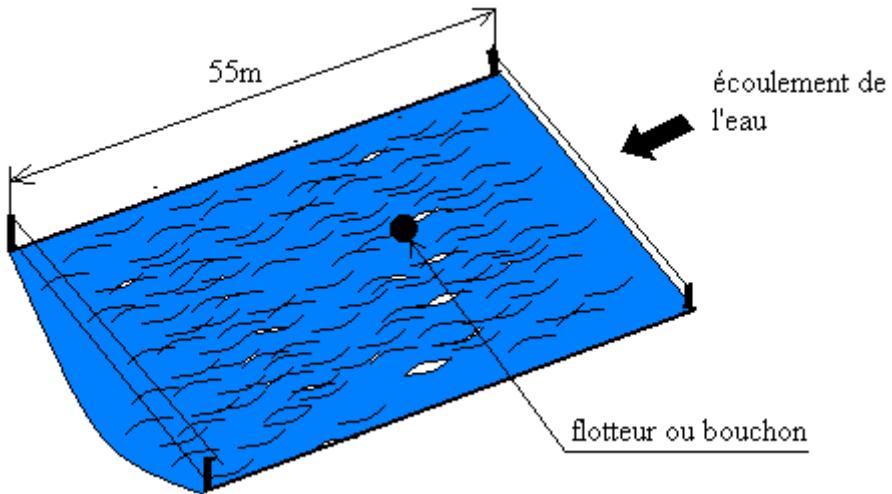


Figure 2: principe de la méthode de bouchon

Son principe se présente comme suit : le flotteur, souvent nommé « bouchon », est l'objet pour mesurer la vitesse d'écoulement de l'eau. On mesure le temps de passage du bouchon pour une longueur d'eau au moins égale à 50 mètres. Les extrémités étant marquées, on lance le flotteur à une vingtaine de mètres en amont et on chronomètre exactement l'instant où il passe sur le premier repère jusqu'au second. Il faut faire en sorte que cette pièce suive le trajet normal de l'eau (éviter autant que possible les obstacles). Pour plus de précision, cette opération devra être renouvelée plusieurs fois et on prendra la valeur moyenne de tous les résultats.

### 1. Résultats de mesures :

Dans la journée du 15 septembre 2007, on a pu effectuer une descente sur terrain pour relever toutes les caractéristiques de l'eau. On a pris une longueur de 55m pour mesurer la vitesse du cours d'eau, avec une largeur exploitable de 6m. Les détails des résultats sont mentionnés dans le tableau ci-après :

Mesures	Longueur [m]	Temps [s]	Vitesses [m/s]
1	55	41,36	1,329
2	55	41,14	1,337
3	55	44,11	1,246
4	55	44,33	1,241

Tableau 2: Résultats des mesures hydrauliques

### 2. Calcul de la vitesse moyenne :

La vitesse moyenne des valeurs du tableau 2 est déterminée par :

$$v_{moy} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i \quad (1-1)$$

$$= \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}{4} = \frac{1,329 + 1,337 + 1,246 + 1,241}{4} = 1,29$$

D'où,

$$v_{moy} = 1,29 \text{ m/s} \quad (1-2)$$

### 3. Puissance hydraulique :

La puissance hydraulique disponible dépend de plusieurs paramètres en dehors de la vitesse d'écoulement de l'eau.

#### i. Le diamètre de la roue D[m]:

La vitesse de la roue est inversement proportionnelle au carré de son diamètre, à un coefficient près. Les expériences sur les roues au fil de l'eau ont pu mettre en œuvre cette approche et ont abouti à la formule empirique suivante :

$$D = 1,13 \sqrt{\frac{1}{v_r}} \quad (1-3)$$

Où  $v_r$  [m/s] : vitesse dans la roue telle que :

$$\begin{aligned} v_r &= \frac{2}{3} v_{moy} \\ &= \frac{2}{3} (1,29) = 0,86 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (1-4)$$

$$\text{D'où : } D = 1,13 \sqrt{\frac{1}{0,86}} = 1,21 \text{ m}$$

On prend :

$$D = 1,2 \text{ m} \quad (1-5)$$

#### ii. Caractéristiques de l'aube :

- La hauteur l[m]:

Généralement, le diamètre de la roue ne dépasse pas 5 mètres, d'ailleurs c'est convenable dans notre cas, et la largeur inférieure à 5 mètres. Les aubes possèdent une hauteur de 1/5 à 1/4 du rayon de la roue. Lorsque le support de l'aube occupe une position

perpendiculairement au plan du cours d'eau, la partie immergée est comprise, normalement, entre 5 et 20 centimètres.

Ainsi, on peut choisir la hauteur  $l[m]$  des aubes :

$$l = \frac{1}{4} R \quad (1-6)$$

Où  $R = \frac{D}{2} = 0,6m$

$$l = 0,15m \quad (1-7)$$

- Le nombre d'aubes ( $n_p$ ) :

Le nombre  $n_p$  est en relation avec l'angle  $\alpha$  compris entre deux aubes adjacentes.

$$n_p = \frac{2\pi}{\alpha} \quad (1-8)$$

Avec  $\cos\alpha = \frac{R-h}{R}$  où  $h[m]$  est la hauteur de la partie immergée.

$$\cos\alpha = \frac{60-7,5}{60} = 0,875$$

$$\text{D'où } n_p = \frac{2\pi}{0,16\pi} = 12,43$$

On prend :

$$n_p = 12 \text{ aubes} \quad (1-9)$$

- La largeur  $L[m]$  :

On va se référer à une plaque rectangulaire pour le dimensionnement des aubes, suivant le tableau ci-après :

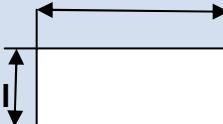
Plaque rectangulaire	L/I	Re	Cx
	1		1,16
	5	$> 10^3$	1,20
	20		1,50

Tableau 3: Caractéristiques d'une plaque rectangulaire

La hauteur des aubes étant déjà définie dans la relation (1-7), on choisira ainsi la largeur convenable pour obtenir une puissance élevée, c'est-à-dire prendre la largeur la plus élevée.

On va donc prendre :  $\frac{L}{l} = 20$

D'où :

$$L = 3 \text{ m}$$

(1- 10)

**iii. La puissance hydraulique  $P_{hyd}$ [W]:**

Cette grandeur peut être déterminée par la formule :

$$P_{hyd} = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p$$

(1- 11)

A chaque immersion de l'aube correspond une valeur de la puissance hydraulique. Pour atténuer la variation en puissance, on va subdiviser la largeur de la turbine en six parties égales tout en décalant les deux aubes consécutives appartenant à deux roues mises côte-à-côte d'un angle de  $5^\circ$ .

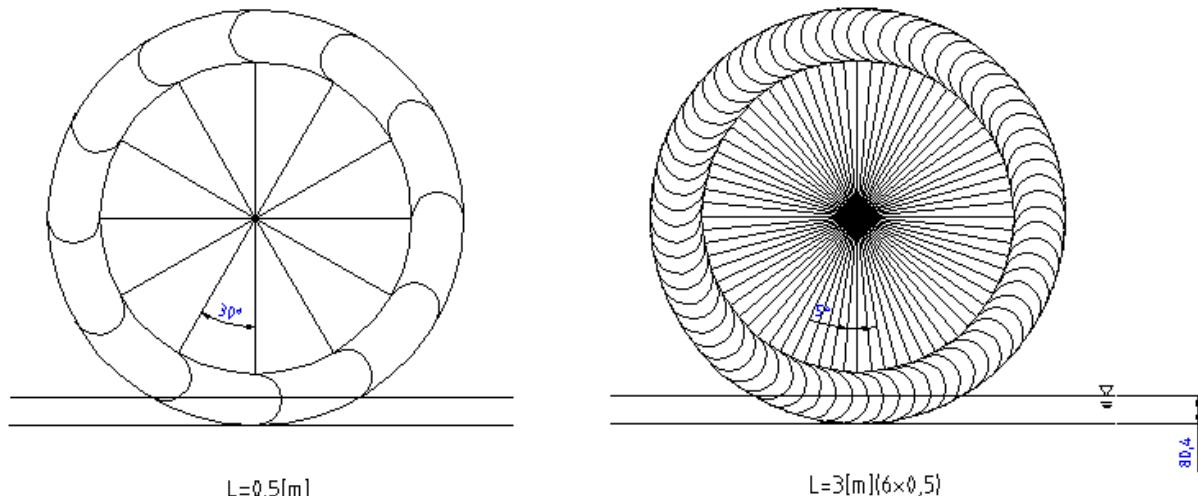


Figure 3: Présentation de la roue avec les aubes décalées

Le tableau 4 indique les valeurs des puissances hydrauliques en fonction de la surface de la partie immergée.

A[m]	circonférences de la partie immergée [m]												S[m <sup>2</sup> ]	P hy[w]
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12		
0	0	0,1038	0,1168	0,1246	0,128	0,1277	0,123	0,1145	0,1016	0,085	0,064	0,0375	0,5633	604,561
1	0,087	0,1077	0,1192	0,1258	0,1283	0,1269	0,1212	0,1116	0,0978	0,0802	0,058	0,0294	0,5966	640,304
2	0,0936	0,1112	0,1213	0,1268	0,1283	0,1258	0,1192	0,1085	0,0938	0,0751	0,0516	0,0205	0,5879	630,966
3	0,0991	0,1142	0,1231	0,1275	0,1281	0,1245	0,117	0,1052	0,0895	0,0697	0,0448	0,0103	0,5765	618,783
4	0,1038	0,1168	0,1246	0,128	0,1277	0,123	0,1154	0,1016	0,085	0,064	0,0375	0	0,5637	605,044

Tableau 4: Valeurs de la puissance suivant la surface de la partie immergée

La courbe suivante, représentant la puissance en fonction de la surface immergée, se déduit des valeurs précédentes.

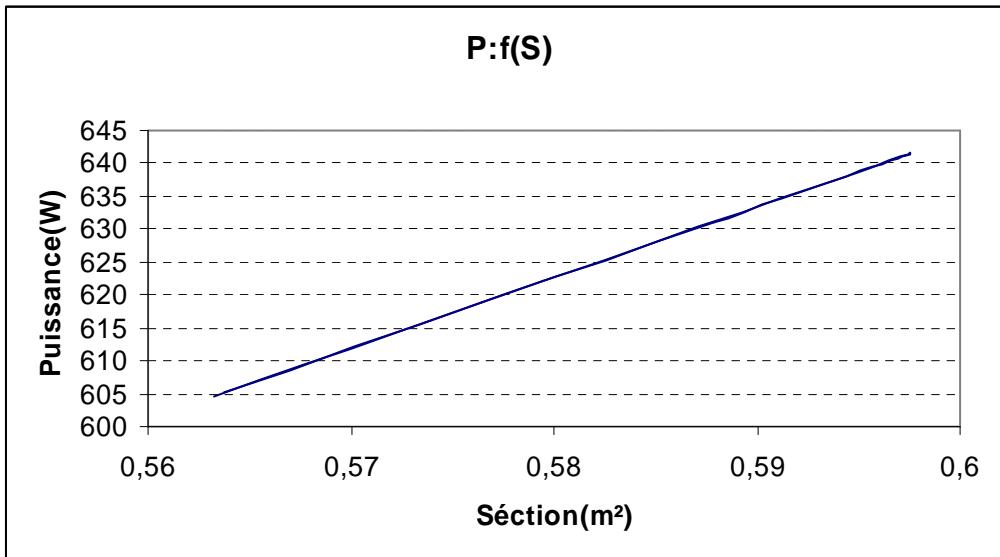


Figure 4 : Courbe représentative de la puissance hydraulique en fonction de la surface immergée

Ainsi, on peut affirmer les résultats suivants :

$$\begin{cases} S_{\min} = 0,56325m^2 \\ S_{\max} = 0,59655m^2 \\ P_{hyd_{\min}} = 604,561W \\ P_{hyd_{\max}} = 640,304W \end{cases} \quad (1-12)$$

D'où  $\Delta P_{hyd} = 35,742W$

# Partie 2 : L'ELECTROTECHNIQUE

## de PRODUCTION

Cette partie de l'étude concerne le mode de production d'énergie utilisant des appareils performants et présentant le maximum de rendement. Il existe différentes machines de production d'électricité : soit des machines à courant continu, soit des machines à courant alternatif. Ces dernières sont utilisées dans la plupart des centrales hydroélectriques.

Les générateurs à courant alternatif sont catégorisés en :

- **machine asynchrone**, souvent raccordée au réseau, dans lequel la tension et la fréquence sont imposées par ce dernier.
- **machine synchrone** fonctionnant en îlot dans la plupart des cas. L'installation alimente une seule localité, ce qui est le cas de la présente étude.

### I. Choix de l'alternateur :

Selon le type de réseau à approvisionner, il y a :

- l'alternateur monophasé, et
- l'alternateur triphasé

Le réseau sera monophasé à cause de la faible puissance de l'installation tout en signalant qu'un alternateur triphasé est plus simple à réguler.

#### 1. Description de la machine :

Comme toute machine électrique, une génératrice synchrone est principalement constituée par :

- Un induit fixe porté par le « stator ». Il comporte généralement plusieurs enroulements dans lesquels circulent les courants induits. Le choix se porte sur une machine possédant trois enroulements distincts au bout desquels, on mesure trois forces électromotrices (fem), égales en valeur efficace mais déphasées chacune d'un angle de  $2\pi/3$  radians.
- Un inducteur mobile ou « rotor ». Il se compose de deux ou plusieurs pôles suivant la vitesse de rotation. C'est l'organe qui donne naissance à un champ magnétique induisant les forces électromotrices.
- Un entrefer, l'espace séparant le rotor et le stator, dans lequel règne un champ magnétique créé par la rotation de la roue polaire. Sa forme dépend de la géométrie de la roue polaire.

Pour le choix du rotor, on distingue également deux grandes familles: les rotors bobinés (à pôles lisses et à pôles saillants) parcourus par un courant continu d'excitation; et les rotors à aimant permanent. Ce dernier convient bien au cas présent car il ne nécessite aucune génératrice d'excitation et exclu également l'acquisition d'un alternateur auto-excité.

On tient à préciser que le choix d'un puissant aimant impliquera une production importante d'énergie.

## 2. Choix de l'alternateur:

Le choix du type de générateur dépend de plusieurs critères, à savoir : la vitesse de rotation du rotor, le nombre de pôles, la valeur de la tension induite et celle de courant induit.

### i. Vitesse de rotation et nombre de pôles :

La plupart des appareils industriels et domestiques exigent une fréquence constante de 50Hz.

La vitesse de rotation de la machine est fixée à 1500tr/mn pour des raisons pratiques et de disponibilité.

A chaque vitesse de rotation correspond un nombre de pôle, et la relation est régie par la formule suivante :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{p \cdot N}{60} \quad (2-1)$$

Où :  $f = 50\text{Hz}$  : fréquence de rotation

$\omega$  : pulsation de rotation en [rd/s]

$p$  : nombre de paires de pôles

$N = 1500\text{tr/mn}$  : vitesse de rotation de l'alternateur

Pour 50Hz, on obtient :

$p$	$n$ [tr/s]	$N$ [tr/min]
1	50	3000
2	25	1500
3	16,67	1000
4	12,5	750

Tableau 5: nombre de paires de pôles en fonction de la vitesse de rotation

D'où, on tire le nombre de paire de pôles :  $p = 2$ , soit on a 4 pôles.

### ii. Principe de fonctionnement de l'alternateur :

Le rotor, avec quatre (4) pôles aimantés sur sa périphérie, en rotation, entraîne avec lui son champ magnétique. L'entrefer est ainsi le siège d'un champ magnétique tournant à la vitesse du rotor, comme si ce dernier était immobile et que chaque point de l'entrefer tournait

à sa place. Les lignes de champ traversent l'entrefer entre la pièce polaire et le stator. Alors, une force électromotrice (fem) est créée dans chaque portion active de l'enroulement. Si la machine débite sur une charge supposée équilibrée alors dans les spires circule un système équilibré de courants induits. A son tour, ces courants créent un champ magnétique tournant à la même vitesse que celui de la roue polaire mais ayant tendance à s'opposer à ce champ qui lui a donné naissance. C'est le phénomène de la « réaction magnétique d'induit ». Techniquement, ce phénomène signifie l'existence d'un couple résistant au niveau de la machine.

*iii. Détermination de la fem induite :*

- Tension induite de mouvement (dans un conducteur) :

Dans l'entrefer règne un champ d'induction  $\vec{B}$  dont la répartition est représentée par la figure ci-après.

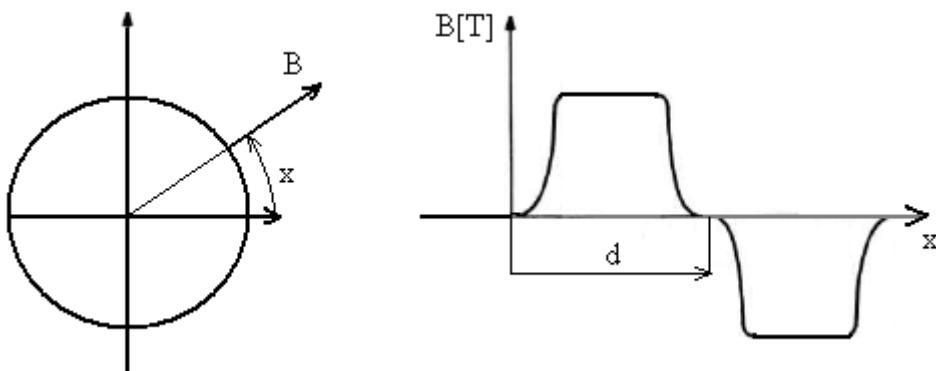


Figure 5: Répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer

Le champ dans l'entrefer donne naissance à un flux  $\Phi$ , qui induit à son tour des tensions triphasées au niveau du stator.

Le flux  $\Phi$  ainsi créé est proportionnel à l'induction  $\vec{B}$  dans l'entrefer ainsi qu'à la surface balayée par ce champ. On tire ainsi la relation :

$$\begin{aligned}\Phi &= \mathbf{B}(x) \cdot \mathbf{S}(x) \\ &= B(x) \cdot l \cdot x\end{aligned}\tag{2- 2}$$

Avec  $x = v \cdot t$

$$\Phi = B(x) \cdot l \cdot v \cdot t$$

La loi de Lenz permet d'établir la relation entre le flux et la tension induite :

$$u_i = |e| = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-3)$$

D'où :

$$u_i = e = B \cdot l \cdot v \quad (2-4)$$

Avec :

$v$  : vitesse de déplacement du champ dans les conducteurs (ou vitesse de  $\vec{B}$ )

$l$  : longueur utile du conducteur (voir sur la figure suivante) :

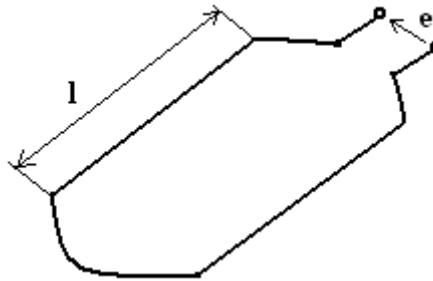


Figure 6: Schéma montrant la longueur utile du conducteur

La fem a pour valeur efficace :

$$\begin{aligned} U_i &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_i^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} u_i^2 \cdot dt} \\ &= l \cdot v \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} B^2 \cdot dt} \end{aligned} \quad (2-5)$$

En posant :

$$B_{eff} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} B^2 \cdot dt} \quad (2-6)$$

Alors pour un déplacement  $d$  du flux dans le conducteur ( $d$  est pris comme étant le pas polaire), on obtient la relation (2-7) :

$$B_{eff} = \sqrt{\frac{1}{d} \int_0^d B^2 \cdot dx} \quad (2-7)$$

Dans les caractéristiques d'un alternateur, dans l'expression de la fem intervient le facteur de forme qui est le suivant :

$$K_f = \frac{B_{eff}}{B_{moy}} = \frac{B_{eff}}{\bar{B}} \quad (2-8)$$

Pour une répartition sinusoïdale de l'induction  $\vec{B}$ , ce qui serait d'ailleurs souhaitable, la relation (2-8) devient:

$$K_f = \frac{\frac{\hat{B}}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi} \hat{B}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2} \quad (2-9)$$

Où :  $B = \hat{B} \cos \omega t$

D'où, l'expression de la tension induite :

$$\underline{U_i = \frac{\pi}{4} \sqrt{2} \cdot l \cdot v \cdot \bar{B}} \quad (2-10)$$

$\bar{B}$  passe par sa valeur maximale (positive ou négative) dans l'axe d'un pôle de la roue polaire. Donc, pour un déplacement  $d$ ,  $\vec{B}$  prendra une fois sa valeur maximale en valeur absolue.

Donc :  $d = \frac{\pi D}{2p}$

Et  $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \bar{B} \cdot d \cdot l$  (encore pour un déplacement  $d$ )

Et  $v = \pi D n = 2p \cdot d \cdot n$

Où  $n$  : vitesse de rotation du rotor en [tr/s], ( $n = \frac{N}{60}$ )

Et la formule (2-10) devient :

$$\begin{aligned} U_i &= K_f \cdot l \cdot 2p \cdot d \cdot n \cdot \bar{B} \\ &= K_f \cdot 2p \cdot n \cdot \Phi \end{aligned}$$

Avec :  $f = p \cdot n$

Finalement, la tension induite s'écrit comme suit :

$$\boxed{U_i = 2K_f \cdot f \cdot \Phi = \frac{\pi}{2} \sqrt{2} \cdot f \cdot \Phi} \quad (2-11)$$

- Tensions induites fondamentale et harmoniques :

Pratiquement, il est quasi-impossible d'obtenir une fem parfaitement sinusoïdale, il apparaît toujours des ondes indésirables appelées « ondes harmoniques ».

On a alors :

$$\begin{cases} \Phi_1 = d \cdot l \cdot \bar{B}_1 = \frac{2}{\pi} \cdot d \cdot l \cdot \hat{B}_1 \\ \Phi_v = \frac{d}{v} \cdot l \cdot \bar{B}_v = \frac{2}{\pi v} \cdot d \cdot l \cdot \hat{B}_v \end{cases} \quad (2-12)$$

$\nu$  désigne le rang des harmoniques.

Ces flux induisent des tensions de fréquence  $\nu f$  qui s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} U_i = U_{i_1} (1 + b_3^2 + \dots + b_\nu^2)^{1/2} \\ U_i = \frac{\pi}{2} \sqrt{2} \Phi_1 (1 + b_3^2 + \dots + b_\nu^2)^{1/2} \end{cases} \quad (2-13)$$

Où le coefficient  $b_\nu = \frac{\widehat{B_\nu}}{\widehat{B_1}}$  représente le rapport de l'onde harmonique de rang  $\nu$  avec celle de la fondamentale.

- **Tension induite dans une spire :**

Dans le bobinage du stator, une spire est équivalente à deux conducteurs en série, d'où la relation :

$$U_{i_{sp}} = 2U_{i_{cond}} \quad (2-14)$$

$$U_{i_{sp}} = \pi \sqrt{2} \cdot f \cdot \Phi$$

Pour  $N_s$  spires total dans l'induit :

$$U_{i_{sp}} = \pi \sqrt{2} \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (2-15)$$

Pour la conception d'un alternateur, afin d'obtenir une forme de la fem se rapprochant de celle d'une sinusoïde, avec très peu d'effets indésirables des harmoniques, quelques facteurs interviennent encore dans son expression, à part le facteur de forme précédemment énoncé. Ces différents facteurs sont les suivants.

- ✓ **Facteur de distribution ( $K_Z$ ):**

Les caractéristiques des encoches de l'induit :

- Le nombre d'encoches par pôle et par phase  $q$ , c'est-à-dire le nombre d'encoches qu'occupe un pôle pour une phase est donné par:

$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (2-16)$$

Dans laquelle :

$Z$  : nombre total d'encoches

$m$  : nombre de phases

- Le pas d'encoches  $\tau_Z$ :

$$\tau_Z = \frac{\pi D}{Z} = \frac{d}{mq} \quad (2-17)$$

Le facteur de distribution est le suivant :

$$\begin{cases} K_{Z_1} = \left| \frac{\sin q(\alpha/2)}{q \cdot \sin(\alpha/2)} \right| \\ K_{Z_v} = \left| \frac{\sin vq(\alpha/2)}{q \cdot \sin(v\alpha/2)} \right| \end{cases} \quad (2-18)$$

Avec  $\alpha$  : angle électrique correspondant au pas d'encoche

$$\alpha = \frac{2\pi}{Z} = \frac{2\pi}{q \cdot 2pm} = \frac{\pi}{mqp}$$

D'où, pour un enroulement triphasé:

$$\begin{cases} K_{Z_1} = \left| \frac{\sin (\pi/6)}{q \cdot \sin (\pi/6q)} \right| \\ K_{Z_v} = \left| \frac{\sin (v\pi/6)}{q \cdot \sin (v\pi/6q)} \right| \end{cases} \quad (2-19)$$

✓ Facteur de raccourcissement des pas ( $K_s$ ):

L'intervention de ce facteur a pour but de réduire les harmoniques de rang 5 et 7.

Pratiquement, on connecte en série les conducteurs distants d'un arc inférieur à  $d$ .

Il existe deux manières de disposer le pas des encoches dans le stator : les pas diamétraux et les pas raccourcis. Les figures suivantes illustrent ces deux modèles.

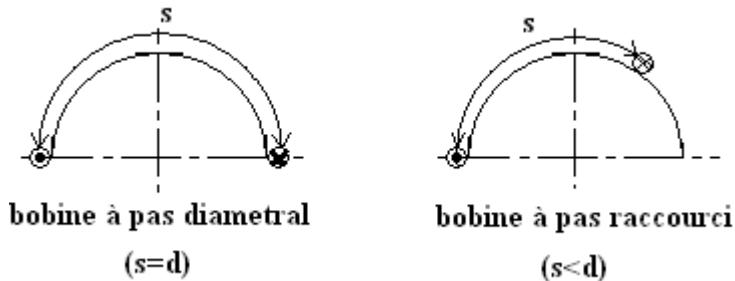


Figure 7: Schéma montrant la disposition des pas

La formule permettant de trouver ce facteur est la suivante :

$$\begin{cases} K_{s_1} = \left| \sin \left( \frac{s}{d} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right| \\ K_{s_v} = \left| \sin \left( \frac{vs}{d} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right| \end{cases} \quad (2-20)$$

✓ Facteur d'enroulement ( $K_w$ ):

En fait, ce facteur est le produit du facteur de distribution avec celui du raccourcissement des pas. Il est donc défini par :

$$\begin{cases} K_{w_1} = K_{z_1} \cdot K_{s_1} \\ K_{w_v} = K_{z_v} \cdot K_{s_v} \end{cases} \quad (2-21)$$

• Tension induite dans une phase :

La connaissance de tous ces facteurs est nécessaire à la détermination de la fem induite.

Finalement, on aboutit à la formule finale de la tension induite de l'alternateur :

$$U_{isp} = \pi\sqrt{2} \cdot K_{w_1} \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (2-22)$$

Pour obtenir la fem induite par phase, on doit introduire le nombre de spires par phase  $N_{s_i}$ , avec :  $N_{s_i} = \frac{N_s}{3}$

D'où :

$$U_{isp} = E = \frac{\pi}{3} \sqrt{2} \cdot K_{w_1} \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi$$

$$\text{Avec : } \Phi = d \cdot l \cdot \bar{B} = \frac{\pi D}{4} \cdot l \cdot \frac{\hat{B}^2}{\pi} = \frac{D \cdot l \cdot \hat{B}}{2}$$

On a alors :

$$U_{isp} = E = \frac{\pi}{6} \sqrt{2} \cdot K_{w_1} \cdot f \cdot N_s \cdot D \cdot l \cdot \hat{B} \quad (2-23)$$

Où :

- $l$  [m]: longueur utile des conducteurs
- $D$  [m]: diamètre de l'entrefer
- $N_s$  : nombre total de spires

La grandeur  $E$  [V] représente la fem efficace à vide de la machine.

En supposant que le système formé par les trois fem est équilibré, et que la phase 1 soit prise comme origine des phases, on aura le système suivant :

$$\begin{cases} e_1 = E\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t) \\ e_2 = E\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_3 = E\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2-24)$$

Avec:  $\omega = p\Omega = p \cdot 2\pi \frac{n}{60} = 100\pi = 314[\text{rd/s}]$

#### iv. Détermination des courants induits:

Le modèle équivalent d'un enroulement d'une phase de l'alternateur est représenté par la figure suivante :

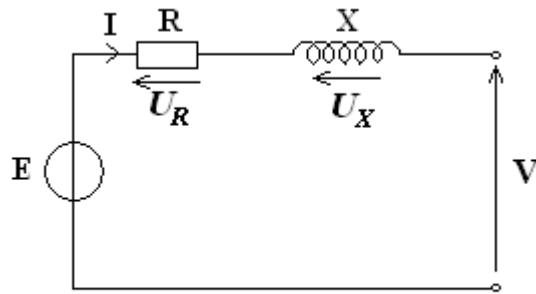


Figure 8: Modèle équivalent d'un enroulement dans une phase

- $E[V]$  : fem à vide
- $R[\Omega]$  : résistance de l'enroulement
- $X[\Omega]$  : réactance synchrone
- $V[V]$  : tension simple pour une phase (tension entre phase et neutre)

L'équation de fonctionnement en convention générateur est la suivante :

$$\vec{E} = \vec{U}_R + \vec{U}_X + \vec{V} \quad (2-25)$$

Avec :

$$\vec{U}_R \begin{cases} U_R = R \cdot I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_R) = 0 \end{cases} \text{ et } \vec{U}_X \begin{cases} U_X = X \cdot I = L \cdot \omega I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_X) = 90^\circ \end{cases} \quad (2-26)$$

En notation complexe, on a :

$$U_R = R \cdot I \text{ et } U_X = jL\omega I$$

A partir de la figure 8, on peut construire le diagramme de Fresnel suivant, dans lequel,  $\vec{I}$  est pris comme référence de phase :

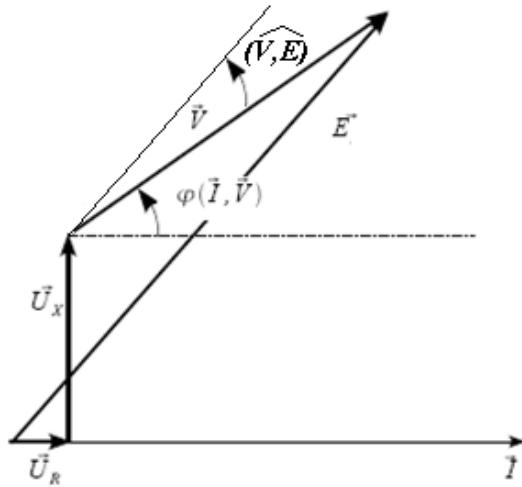


Figure 9 : diagramme synchrone d'une phase

Avec :

$\varphi(\vec{I}, \vec{V})$  : angle de déphasage de  $\vec{I}$  par rapport à  $\vec{V}$  ;

$\delta(\vec{V}, \vec{E})$  : angle interne

De la relation (2-24), on peut donc tirer le système de tensions simples :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \cos(\omega t) \\ V_2 = V_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_3 = V_m \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (2-27)$$

➤ **Bilan de puissance :**

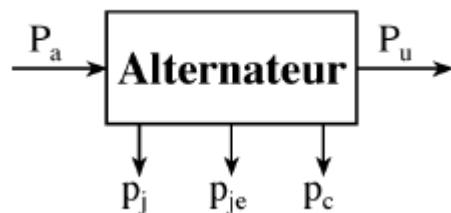


Figure 10 : bilan de puissance d'un alternateur

Lors du fonctionnement normal de l'alternateur, des pertes sous différentes formes seront engendrées, dans lesquelles :

- $P_{je} = U_e \cdot I_e = r_e \cdot I_e^2$  : pertes par effet joule dans l'inducteur ;
- $P_j = \frac{3}{2} R \cdot I^2$  : pertes par effet joule dans l'induit ;
- $P_c$  : pertes dites « collectives » : pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge.
- $r_e$  : résistance interne de l'enroulement de l'inducteur ;

- $I_e$  : intensité d'excitation ;
- $R$  : résistance vue entre deux bornes de l'alternateur.

Comme on dispose d'une machine à aimant permanent, le système d'excitation sera exclu de l'étude. Aussi les pertes par effet joule dans l'inducteur n'interviennent-elles pas dans l'expression de la puissance utile.

Ainsi, la puissance mécanique ne serait plus utilisable totalement, elle serait réduite suivant la relation suivante :

$$\boxed{\eta_g = \frac{P_u}{P_a}} \quad (2- 28)$$

Où :

- $\eta_g$  : rendement global de l'alternateur ( $>98\%$ )
- $P_u$  [W] : puissance utile
- $P_a$  [W] : puissance mécanique

Les études ultérieures sur la turbine et le multiplicateur ont aboutie à une puissance mécanique de 450W.

Si on considère la valeur minimale du rendement globale, on peut déduire la puissance utile de la machine, d'après la formule :

$$P_u = \eta_g \cdot P_a$$

$$= 0,98 \cdot 450$$

$$\boxed{P_u = 441W} \quad (2- 29)$$

#### ➤ Le courant nominal :

On est en présence d'une machine triphasée, donc l'expression de la puissance serait :

$$\boxed{P_u = P = \sqrt{3} \cdot U I \cos \varphi} \quad (2- 30)$$

Avec :

- $U$  [V] : tension efficace entre phase
- $I$  [A] : courant efficace dans les lignes
- $\cos \varphi$  : facteur de puissance de l'installation

La tension imposée par l'utilisateur est de 220 V entre phase. La détermination du courant nominal nous permet de choisir l'alternateur à utiliser.

Si on considère maintenant la puissance absorbée par l'installation qui tient compte du facteur de puissance global.

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad (2-31)$$

Le courant maximal de l'installation peut être obtenu pour  $\cos\varphi$  voisin de l'unité, c'est-à-dire pour  $S = P$  (en cas de charge purement résistive).

$$S = P = \sqrt{3}UI \quad (2-32)$$

D'où :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U} \quad (2-33)$$

Pour un fonctionnement normal, c'est-à-dire à une vitesse constante de 1500tr/min, la relation (2-33) nous donne la valeur de  $I[A]$  :

$$I = 1,15A \quad (2-34)$$

Cette valeur représente le courant nominal maximal que la charge pourrait absorber.

Etant donné les variations éventuelles de vitesse au niveau de la turbine, et par conséquent au niveau de l'alternateur (autrement dit, une variation de la fréquence), on doit fixer la plage de vitesses pour simplifier l'étude.

Supposons donc que la machine peut tourner de 1000 à 2000tr/min, une variation encore tolérée par l'alternateur.

De plus, d'une part, la fem de la machine évolue proportionnellement avec la fréquence, d'autre part, la fem est proportionnelle à la tension aux bornes, donc il existe une relation qui lie la fréquence en fonction de la tension aux bornes de la machine (les caractéristiques internes du générateur étant supposées constantes).

Supposons maintenant que cette tension varie linéairement avec la fréquence. D'où, on peut introduire le coefficient de proportionnalité  $k$ , défini par :

$$k = \frac{U}{f} \quad (2-35)$$

En cas de fonctionnement normal (220V/50Hz), on obtient  $k = 4,4$ .

En considérant les valeurs extrémiales de la vitesse de rotation de la machine, on peut dresser le tableau suivant :

$N[tr/mn]$	1000	1500	2000
$P_m[W]$	300	450	600
$P_u[W]$	294	441	588
$f[Hz]$	32	50	66
$U_{eff}[V]$	140	220	290
$V_{eff}[V]$	89	127	167
$I_{eff,max}[A]$	1,2	1,15	1,17

Tableau 6: valeurs des différents paramètres en fonction de la vitesse de rotation de la machine

Sur le marché local, on peut trouver des alternateurs 1500tr/mn avec une puissance de 550W, 750W, 1kW,....

Cependant, on choisira une machine conformément au tableau 6 ainsi qu'aux gammes de produit sur le marché. Voici donc les caractéristiques de l'alternateur disponible :

- Puissance apparente  $S = 937 \text{ VA}$  ;
- tensions triphasées  $220/380V$  ;
- facteur de puissance  $\cos\varphi = 0,8$

**Remarque :**

Le facteur de puissance est donné par le constructeur de la machine. C'est un facteur indicatif du rendement de l'installation. L'idéal pour une installation est que le  $\cos\varphi$  soit voisin de l'unité.

Voici quelques exemples d'appareils avec leur facteur de puissance respectif.

RECEPTEUR	$\cos \varphi$	$\text{TG } \varphi$
Lampes à incandescence	env. 1	env. 0
Lampes à Fluorescence	env. 0,5	env. 1,73
Lampes à décharge	0,4 à 0,6	env. 2,29 à 1,33
Fours à résistances	env. 1	env. 0
Fours à induction compensée	env. 0,85	env. 0,62
Fours à chauffage diélectrique	env. 0,85	env. 0,62
Machines à souder à résistance	0,8 à 0,9	0,75 à 0,48
Postes statiques monophasés de soudage à l'arc	env. 0,5	env. 1,73
Transformateurs-redresseurs de soudage à l'arc	0,7 à 0,9 0,7 à 0,8	1,02 à 0,48 1,02 à 0,75
Fours à arc	0,8	0,75
Redresseurs de puissance à thyristors	0,4 à 0,8	2,25 à 0,75

Tableau 7: types d'appareils avec leur facteur de puissance respectif

# Partie 3 : LA REGULATION

Dans la plupart des cas, l'utilisation de l'énergie électrique exige une fréquence et une tension constantes pour assurer la protection des appareils (industriels et domestiques).

Etant donné que la centrale ne dispose pas d'un réglage de débit, comme dans le cas des centrales hydroélectriques habituelles, alors la vitesse de rotation de la turbine serait variable, ce qui entraîne, par conséquent, une variation de la fréquence des tensions à la sortie de l'alternateur. Le but de cette étude est alors de concevoir un dispositif permettant de maintenir quasi-constantes la tension et la fréquence à l'entrée de la charge. Ce dispositif est connu sous le nom de « régulateur de tension ».

## I. Les principaux constituants de la régulation :

Les éléments principaux du régulateur sont :

- **Un redresseur** qui permet de convertir les grandeurs sinusoïdales (tensions et courants) à la sortie de l'alternateur en grandeurs continues. Il est choisi de façon à ce que le redressement soit parfait.
- **Un filtre** ayant pour rôle de lisser les tensions et courants à la sortie du redresseur. L'intervention de cet élément nous permet d'obtenir des grandeurs parfaitement lisses.
- **Un régulateur de tension** : on utilise le principe d'une alimentation stabilisée pour la régulation de la tension, accompagnée d'une alimentation à découpage du type élévateur.
- **Un onduleur autonome** permettant de rétablir des grandeurs sinusoïdales.

Le principe global de la régulation est illustré dans la figure suivante :

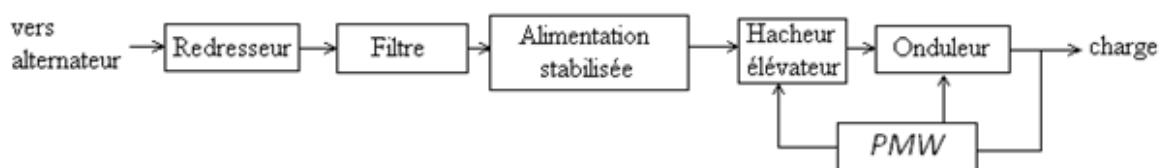


Figure 11: Principe de la régulation

L'objectif est de fixer la tension et la fréquence à valeurs constantes dans la charge. La régulation de la première variable serait traitée avec une alimentation stabilisée associée à un élévateur de tension, tandis que la seconde se fera avec un onduleur. La commande de l'ensemble alimentation à découpage-onduleur sera effectué avec une commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou, en anglais Pulse Width Modulation (PMW).

## 1. Le redresseur:

A la sortie de l'alternateur, la plupart du temps, l'énergie électrique est fournie par l'intermédiaire d'un système triphasé de tensions sinusoïdales variables, à fréquence variable également. Or, on s'est déjà fixé l'objectif de fournir de l'énergie à tension et fréquence constantes quelle que soit leur variation à l'entrée, alors, on doit faire appel à des dispositifs pouvant accomplir ces tâches. Dans la plupart des cas, ces derniers nécessitent des signaux continus à leur entrée. Ainsi, il est évident d'effectuer une conversion du signal alternatif en continu. Pour ce faire, on a recours au « redresseur ».

On peut rencontrer plusieurs types de redresseur suivant son utilisation, mais dans notre cas, un redressement parfait est assuré par un pont à diodes type PD3 dont voici le schéma de montage.

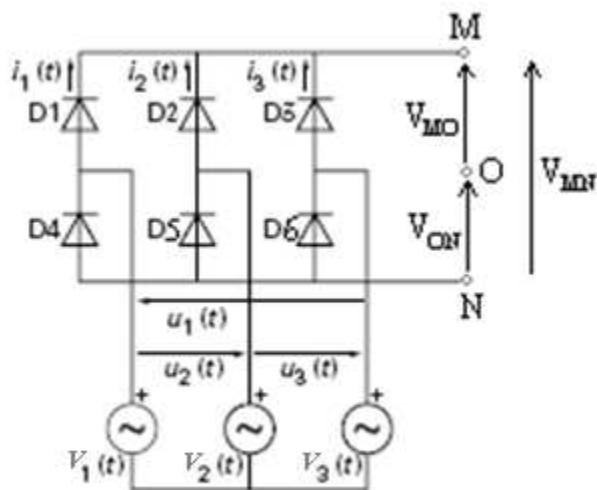


Figure 12: Schéma d'un redresseur triphasé en pont de Graetz

Les tensions simples d'alimentation dans chaque phase de l'alternateur sont respectivement :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \cos(\omega t) \\ V_2 = V_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_3 = V_m \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (3-1)$$

Avec :  $\theta = \omega t$

La phase 1 étant prise comme origine des phases. La figure 12 nous permet d'écrire :

$$u_c = u_{do} = V_{MN} = V_{MO} + V_{ON} \quad (3-2)$$

Où  $V_{MO}$  correspond à la tension au potentiel le plus élevé (plus positif) entre les tensions d'alimentation, tandis que  $V_{ON}$  correspond à celle au potentiel le plus bas (plus négatif).

Les chronogrammes des tensions instantanées ainsi que la tension au niveau d'une diode sont représentées par la figure suivante :

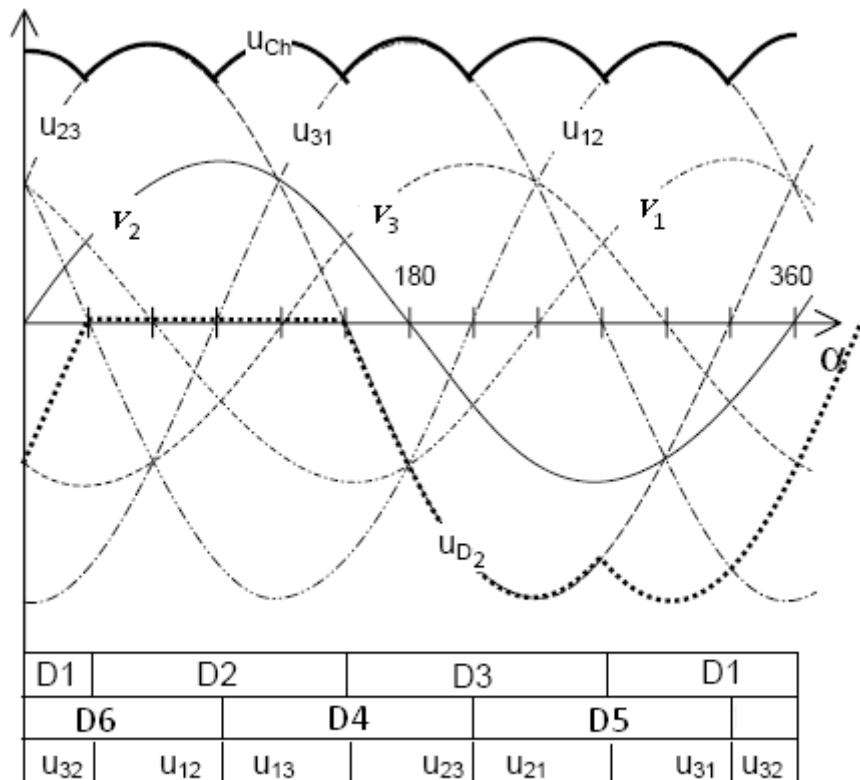


Figure 13: Allures des tensions d'entrée et de la tension de sortie

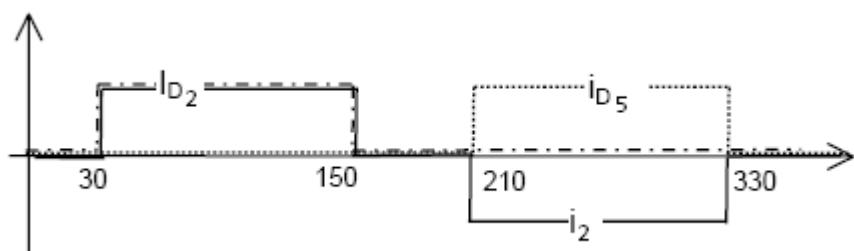


Figure 14: Comportement du courant dans une diode

Une paire des diodes conduit à tour de rôle pendant un temps correspondant à  $\Delta\theta = 2\pi/6$ . Donc, deux diodes sont toujours en conduction dont l'une est portée au potentiel le plus élevé et l'autre au potentiel le plus bas, selon respectivement la loi du groupement de diodes à cathodes communes et celle du groupement à anodes communes.

Le tableau 8 montrera l'ordre de conduction de chaque paire de diodes.

Pour une période  $T = 2\pi$ , l'ordre de conduction pour  $\Delta\theta = 2\pi/6$  sera :

Periode de conduction	Diodes portées au plus positif	Diodes portées au plus négatif
$0 \leq \theta \leq 2\pi/6$	$D_1$	$D_6$
$2\pi/6 \leq \theta \leq 4\pi/6$	$D_2$	$D_6$
$4\pi/6 \leq \theta \leq \pi$	$D_2$	$D_4$
$\pi \leq \theta \leq 8\pi/6$	$D_3$	$D_4$
$8\pi/6 \leq \theta \leq 10\pi/6$	$D_3$	$D_5$
$10\pi/6 \leq \theta \leq 2\pi$	$D_1$	$D_5$

Tableau 8: Ordre de conduction des diodes

## 2. Le filtre

La tension délivrée par le redresseur présente encore une ondulation non négligeable, ce qui nécessite l'ajout d'un filtre, afin d'obtenir un signal continu utilisable. Compte tenu des charges souvent inductives, l'ondulation de tension en sortie conduit à une ondulation de courant très faible dans la charge. Ce courant sera donc fréquemment supposé constant dans l'utilisation en aval.

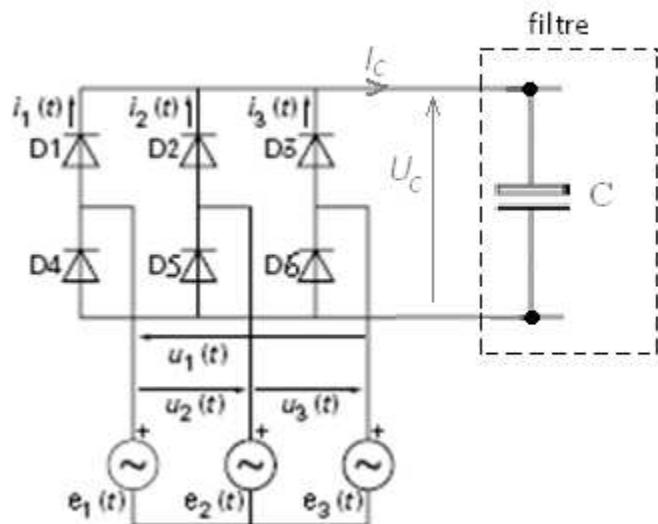


Figure 15: Schéma montrant la disposition du filtre

On considère dans le cas présent que le redresseur débite sur une charge capacitive. Elle a pour but d'ajuster la valeur moyenne de la tension redressée, c'est-à-dire de la rendre continue.

Le condensateur joue le rôle d'un réservoir d'énergie qui la restitue en partie durant la période pendant laquelle le redresseur ne conduit pas.

Après filtrage, la tension redressée prend l'allure représentée sur la figure ci-après :

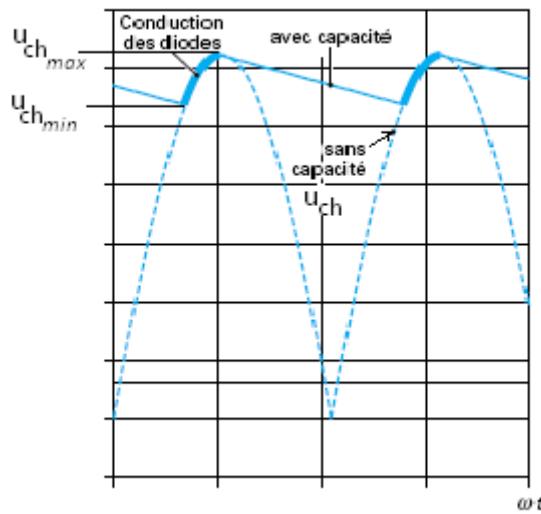


Figure 16: Allure de la tension redressée et filtrée

Lorsque le redresseur conduit, le condensateur se charge durant un temps  $t_{cc}$  ou temps de charge, tandis que dans le cas contraire, il se décharge durant  $t_{dc}$  (temps de décharge) à travers la charge.

### 3. Le régulateur:

Cette partie est consacrée à l'étude de la correction de la tension redressée pour l'obtention de la valeur cible. Pour cela, on appliquera une des méthodes classiques de régulation de tension utilisant le principe d'une alimentation stabilisée à transistor ballast. Le système débitera sur un élévateur de tension pour obtenir la valeur efficace de la tension voulue.

#### i. L'alimentation stabilisée :

La stabilisation est assurée par une diode zener, dimensionnée de façon à ce que la variation des paramètres à l'entrée n'ait pas d'influence sur le fonctionnement.

Le schéma de montage de ce dispositif est la suivante :

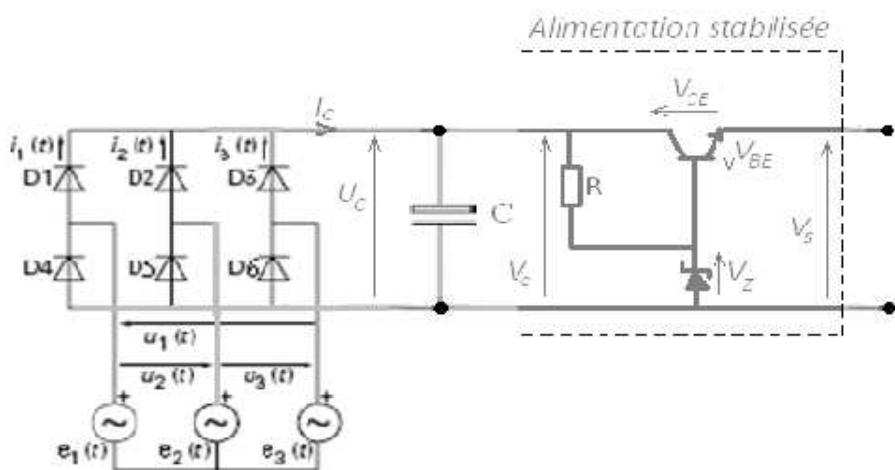


Figure 17: Schéma de principe de l'alimentation stabilisée utilisant un transistor ballast

- **Principe de fonctionnement :**

On dispose de la tension parfaitement continue  $V_e$  à l'entrée de notre système. On veut obtenir une tension  $V_s$  stabilisée et constante.

Le mécanisme de l'ensemble est le suivant : le transistor reproduit sur son émetteur la tension présente sur sa base, empruntant pour ce faire le courant nécessaire au condensateur C.

Le courant traversant sa base vient lui aussi de C, via la résistance R. Au repos, lorsqu'aucune charge n'est connectée en sortie, aucun courant ne circule dans le transistor, son émetteur étant non connecté. Lorsque l'on consomme du courant au niveau de la charge, le transistor se met à conduire grâce au courant traversant sa base (largement inférieur à celui dans son collecteur), avec  $I_c = \beta \cdot I_B$ . Ainsi donc, pour une demande en courant de sortie considérée, on n'aura besoin que d'une valeur moins élevée de courant de base pour permettre au transistor de conduire. La régulation (autrement dit la stabilisation de la tension) est assurée par la diode zener. Ce composant exige une plage de variation de courant acceptable, en dehors de laquelle, il ne pourra plus accomplir son rôle. De plus, la tension d'entrée doit être supérieure à celle de la sortie.

La tension  $V_z$  est choisie en fonction de la tension de sortie voulue qui prendra approximativement sa valeur.

- ii. **Le convertisseur à découpage :**

Ce dispositif sera nécessaire pour éléver la tension stabilisée pour l'adapter avec celle imposée par l'onduleur.

Le schéma de principe est donné par la figure qui suit :

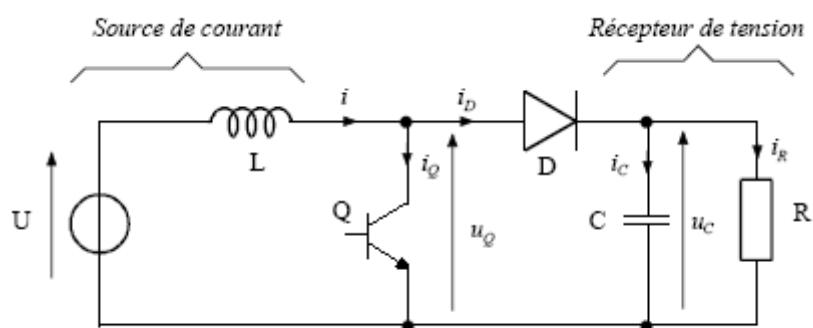


Figure 18: schéma de principe d'une alimentation élévatrice de tension

Cette alimentation (BOOST converter en anglais) utilise un contacteur statique parallèle, représenté par le transistor Q, qui doit être alimenté par une source de courant et débite dans une source de tension. Le récepteur proprement dit, constitué par la résistance R et le condensateur de filtrage C monté en parallèle à ses bornes, a le comportement d'une source de

tension exigée par l'alimentation à découpage. Par contre, il faut placer une inductance  $L$  en série avec la source d'alimentation de tension  $U_c$  pour la transformer en source de courant.

On va résumer dans le tableau suivant, toutes les grandeurs entrant en jeu dans le fonctionnement de ce convertisseur.

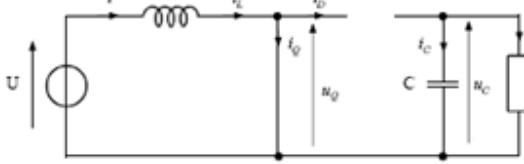
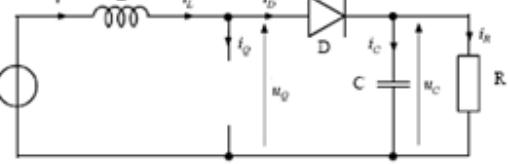
$0 \leq t < t_e = D \cdot T_p$	$D \cdot T_p = t_e \leq t < T_p$
Q conduit, D ouvert	Q ouvert, D conduit
	
<i>Hypothèse : <math>u_c = U_c \Rightarrow \Delta u_c = 0</math>, l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur est nulle</i>	
Tension aux bornes de l'inductance	Courant moyen dans le condensateur
$U_L^{[t_e]} = U = L \cdot \frac{\Delta i_L^{[t_e]}}{t_e}$	$U_L^{[t_d]} = U - U_c = L \cdot \frac{\Delta i_L^{[t_d]}}{t_d}$
Courant moyen fournit par l'alimentation	Courant moyen dans la diode
$I_C^{[t_e]} = -I_R^{[t_e]} = -I_L = -\frac{U_c}{R}$	$I_C^{[t_d]} = -I_R^{[t_d]} + I_L^{[t_d]} = -I_R + I_L = -\frac{U_c}{R} + I_L$
$I_L^{[t_e]} = I_L^{[t_d]} = I_L$	$I_L^{[t_d]} = I_L = I_L$
$I_D^{[t_e]} = 0$	$I_D^{[t_d]} = I_L^{[t_d]} = I_L$

Tableau 9: valeurs des paramètres du convertisseur à découpage (type élévateur)

Dont :

- $t_e = D \cdot T_p$  : période de conduction du transistor
- $t_d$  : période de blocage du transistor
- $T_p = t_e + t_d$  : période de découpage
- $F_d = \frac{1}{T_d}$  : fréquence de découpage
- $D$  : rapport cyclique de la commande de l'interrupteur

En effectuant la valeur moyenne des paramètres correspondant à la période  $T_p$ , on obtient les résultats suivants :

$D \cdot U_L^{[t_e]} + (1-D) \cdot U_L^{[t_d]} = D \cdot (U) - (1-D) \cdot (U - U_C) = 0$	$\Rightarrow U_C = \frac{U}{1-D}$
$D \cdot I_C^{[t_e]} + (1-D) \cdot I_C^{[t_d]} = D \cdot (-I_R) + (1-D) \cdot (-I_R + I_L) = 0$	$\Rightarrow I_R = (1-D) \cdot I_L$
$I = D \cdot I_L^{[t_e]} + (1-D) \cdot I_L^{[t_d]} = D \cdot I_L + (1-D) \cdot I_L$	$\Rightarrow I = I_L$
$I_D = D \cdot I_D^{[t_e]} + (1-D) \cdot I_D^{[t_d]} = (1-D) \cdot I_L$	$\Rightarrow I_D = (1-D) \cdot I_L$

Tableau 10: valeurs efficaces de tous les paramètres

La présence de l'inductance induit une ondulation du courant y circulant dont la valeur est représentée dans le tableau suivant :

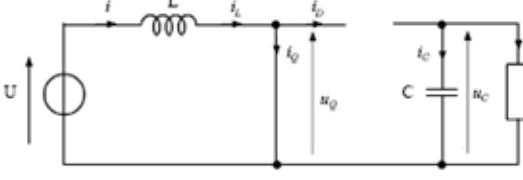
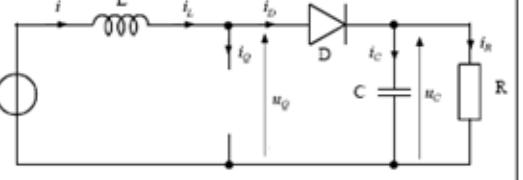
$0 \leq t < t_e = D \cdot T_p$	$D \cdot T_p \leq t < T_p$
Q conduit, D ouvert	Q ouvert, D conduit
	
<i>Ondulation de courant aux bornes de l'inductance</i>	
$\Delta i_L^{[t_e]} = \frac{U_L^{[t_e]}}{L} \cdot t_e = \frac{U}{L} \cdot t_e$	$\Delta i_L^{[t_d]} = \frac{U_L^{[t_d]}}{L} \cdot t_d = \frac{U - U_C}{L} \cdot t_d$
$U_L = 0 \Rightarrow \Delta i_L = \Delta i_L^{[t_e]} = -\Delta i_L^{[t_d]}$	
	
$\Delta i_L = i_{L_{MAX}} - i_{L_{MIN}} = \frac{U \cdot T_p}{L} \cdot D = \frac{U_C \cdot T_p}{L} \cdot (1-D) \cdot D$	

Tableau 11:ondulation de courant dans l'inductance

On va essayer de représenter les allures des principales grandeurs dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire quand on est en conduction continue.

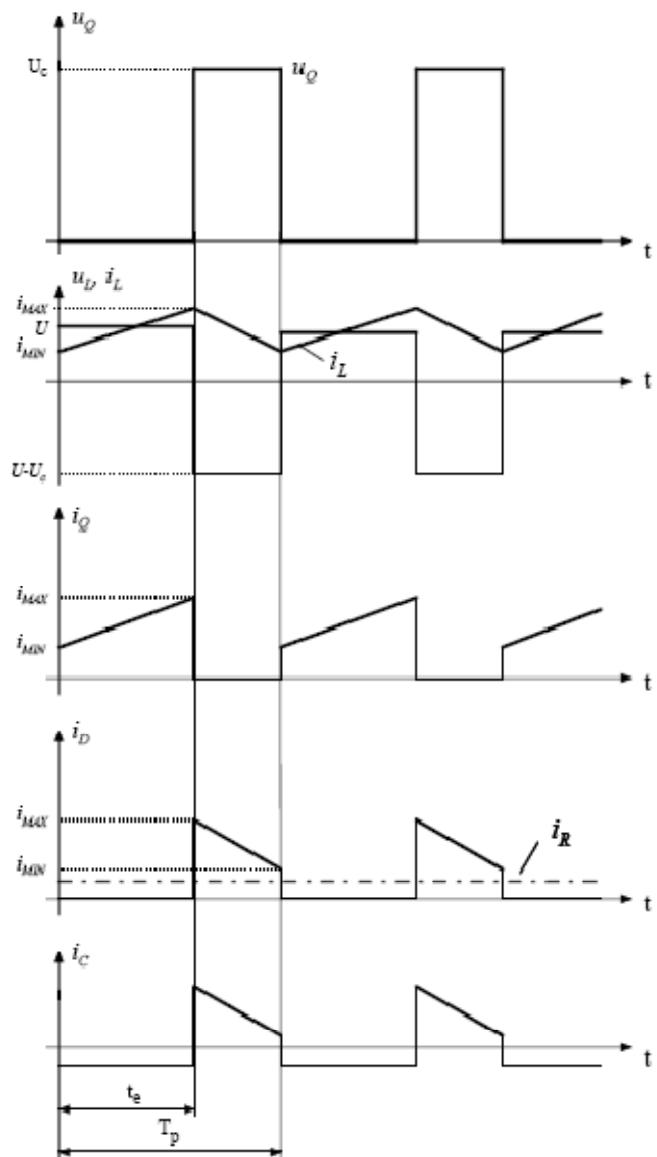


Figure 19: allures des paramètres entrant en jeu dans le convertisseur

On peut remarquer que pour un rapport cyclique donné, la tension de sortie est indépendante de la charge.

#### 4. L'onduleur :

Le rôle de l'onduleur est de reproduire une tension alternative à fréquence constante de 50Hz à partir du courant continu venant du redresseur. C'est un convertisseur de signal continu en signal alternatif.

Pour l'étude, on utilise un onduleur de tension à amplitude et fréquence fixe. Pour ce faire, on emprunte le principe de la commande MLI.

### i. Le circuit de puissance de l'onduleur :

Le schéma de puissance d'un onduleur monophasé est le suivant :

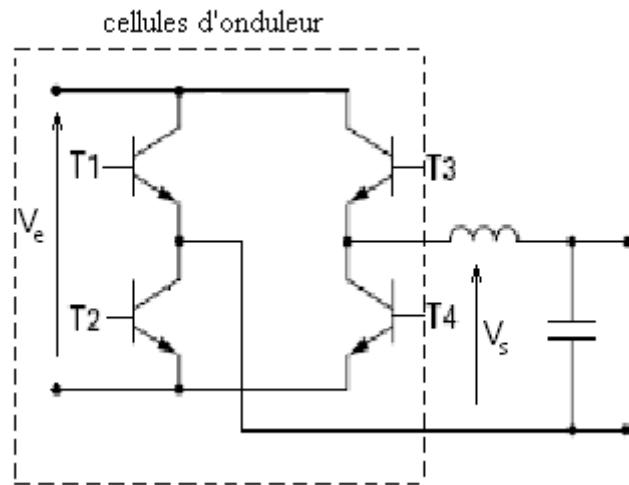


Figure 20: circuit de puissance d'un onduleur monophasé

Les cellules de l'onduleur sont constituées par des éléments commandés qui fonctionnent comme des interrupteurs entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des thyristors ayant son propre circuit de blocage, soit des transistors bipolaires, soit des IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor), etc. Ils sont chacun munis d'un circuit d'aide à la commutation.

### ii. Le circuit de commande des cellules du convertisseur :

Voici le schéma de principe de la commande MLI :

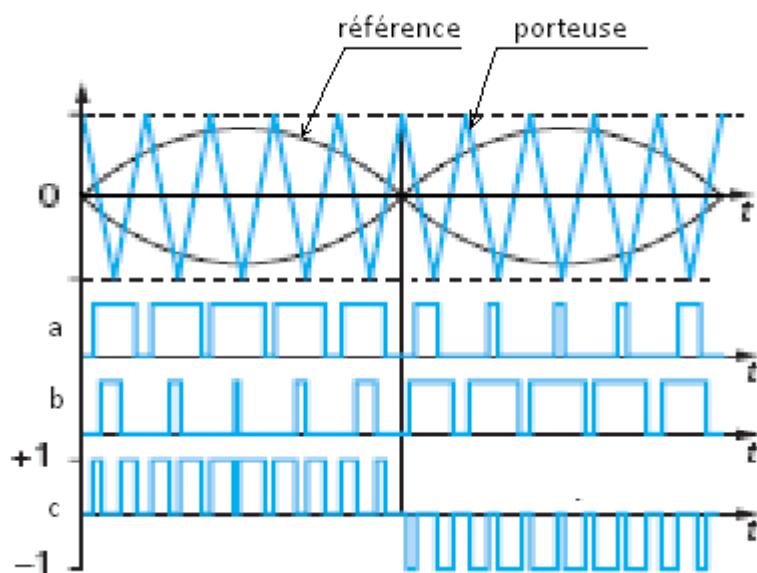


Figure 21: Les signaux pour la commande des interrupteurs

La stratégie de commande consiste à créer deux signaux :

- Un signal sinusoïdal d'amplitude et de fréquence variable appelé « référence »  $V_{ref}$ .  
Dans notre cas, la fréquence est fixée à 50Hz (fréquence imposée par la charge).
- Un signal triangulaire de fréquence très élevée appelé « porteuse »  $V_{tri}$  (fréquence pouvant atteindre les 10kHz).

Pour ce faire, on va utiliser deux circuits intégrés **ICL 8038** dont l'un fournira le signal de référence et l'autre la porteuse. Leur amplitude sera réglée à partir d'un amplificateur non-inverseur.

Ces deux signaux sont comparés instantanément à l'aide d'un comparateur. Le résultat sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Lorsque  $V_{ref}$  dépasse  $V_{tri}$ , alors l'état de la commande « a » et « b » prend la valeur 1, tandis que dans le cas contraire, l'état devient 0. La différence instantanée des états dans ces deux chronogrammes conduit à la figure « c ».

### 5. Le filtre :

Généralement, le filtre de sortie permet à la charge d'avoir une tension sensiblement sinusoïdale à partir du signal en crête délivré par l'onduleur. Pour cela, un filtre passe-bas suffira pour réaliser cette fonction. Il est représenté par la figure 22.

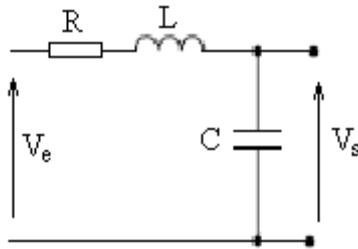


Figure 22: représentation du filtre

## II. Dimensionnement de chaque dispositif :

### 1. Dimensionnement du redresseur :

Notre objectif, dans cette partie, est de trouver la tension moyenne et le courant moyen à la sortie du redresseur.

#### i. La tension moyenne :

La tension redressée est obtenue de la manière suivante (figure11):

$$u_{cmoy} = (V_M - V_O)_{moy} + (V_O - V_N)_{moy} \quad (3-3)$$

La tension moyenne se calcule par intervalle dont la période respective est de  $2\pi/6$ , suivant l'ordre de conduction des diodes.

Après calcul, on aboutit à la formule générale :

$$\boxed{\mathbf{u}_{cmoy} = \frac{2q}{\pi} \cdot V_m \sin(\pi/q)} \quad (3-4)$$

$$= \frac{6}{\pi} \cdot V_m \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{3}{\pi} \cdot V_m \sqrt{3}$$

Or :

$$\begin{cases} V_m = V\sqrt{2} \\ V = \frac{U}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (3-5)$$

D'où :

$$\boxed{\mathbf{u}_{cmoy} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U = 1,35U} \quad (3-6)$$

Où  $U=220V$  est la tension de lignes dans les enroulements, en fonctionnement normal.

La tension redressée sera donc :

$$\boxed{\mathbf{u}_{c,moy} = 297V} \quad (3-7)$$

On a également représenté (figure 12) l'allure de la tension de charge  $U_{Ch}$  à la sortie du redresseur ainsi que celle de la tension  $U_{D_2}$  au niveau de la diode ( D2 dans notre cas).

On peut observer que la fréquence de la tension de charge est 6 fois la fréquence nominale, soit 300Hz.

On peut également calculer le facteur d'ondulation K défini par :

$$K = \frac{U\sqrt{2} - U\sqrt{2}\cos(\pi/m)}{2(m/\pi) \cdot U\sqrt{2} \cdot \sin(\pi/m)} = \frac{\pi}{2m} \cdot \frac{(1 - \cos(\pi/m))}{\sin(\pi/m)} \quad (3-8)$$

Les valeurs de ce coefficient sont données dans le tableau suivant en fonction de l'architecture du redresseur, c'est-à-dire le nombre de diodes  $m$  utilisées ( $m=6$  dans notre cas).

$m$	2	3	4	6
$K$	0,79	0,3	0,16	0,07

Tableau 12: Taux d'ondulation de la tension redressée

On peut remarquer que l'utilisation d'un nombre important de diodes entraîne la réduction de l'ondulation.

### ii. Le courant moyen :

$$\boxed{I_1 = I_c \sqrt{\frac{2}{3}}} \quad (3-9)$$

$$I_C = I_1 \sqrt{\frac{3}{2}} = 1,2 \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$\boxed{I_C = 1,5A} \quad (3-10)$$

Où  $I_C$  représente l'intensité efficace du courant à la sortie du pont de redresseur.

**iii. Tension inverse dans les diodes ( $V_{d_i}$ ):**

Le calcul de cette paramètre peut être obtenu à partir des conditions suivantes :

$$\begin{cases} V_{d_{i,max}} = 2V_m \\ V_{d_{i,max}} = 2V_m \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right) \text{ , pour } q \text{ relativement pair et impair.} \end{cases}$$

Puisqu'on est en régime triphasé ( $q = 3$ ), on utilisera la deuxième condition.

D'où :

$$\boxed{V_{d_{i,max}} = 2V_m \cdot \cos(\pi/6)} \quad (3-8)$$

Pour déterminer la tension inverse dans les diodes, on doit, pour une raison de sécurité, prendre la valeur maximale correspondant à  $U = 290V$ , soit  $V_m = 167.\sqrt{2}$ .

D'où :

$$\boxed{V_{d_{i,max}} \approx 410V} \quad (3-12)$$

**iv. Les courants caractéristiques des diodes :**

L'allure du courant dans la diode est visible sur le chronogramme de la figure 13.

Si on considère que le courant dans la charge est parfaitement continu de valeur  $I_C$ , alors, le courant dans chaque diode aura une allure en crête et reprend la valeur de  $I_C$ . Dans notre figure, on a pris la deuxième branche du pont, dans lequel D2 conduit lors de l'alternance positive tandis que D5 conduira dans l'alternance négative.

Les courants nécessaires pour caractériser les diodes sont :

- $i_{D,max} = I_C = 1,5A$
- $i_{D,moy} = \frac{I_C}{3} = 0,5A$
- $i_{D,eff} = \frac{I_C}{\sqrt{3}} = 0,86A$

Toutes ces caractéristiques obligent à utiliser une diode **KBPC106** pour le redressement.

## 2. Dimensionnement du condensateur de filtrage:

La relation permettant le dimensionnement de ce dispositif est suivant la formule :

$$I = C \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3-93)$$

Pour  $\Delta t = T = \frac{1}{300}$  ( $f = 300Hz$  pour la tension redressée), on a :

$$C = \frac{I}{300 \cdot U_c} \quad (3-14)$$

La capacité du condensateur est inversement proportionnelle à la tension redressée, donc pour le dimensionnement de  $C$ , on prendra la valeur la plus basse de  $U_c$ , correspondant à la valeur minimale de la plage de tension.

Pour  $U = 140V$ , la valeur moyenne de la tension redressée sera  $U_c = 190V$ .

Alors :

$$C = 26\mu F \quad (3-15)$$

## 3. Dimensionnement des composants de l'alimentation stabilisée :

Pour que la stabilisation soit possible, il faut que la tension d'entrée soit supérieure à celle de la sortie. On serait donc obligé de prendre la tension minimale (on parle ici de tension redressée) accordée par la plage de variation de cette grandeur. Soit donc  $V_e = 190V$ .

La tension stabilisée possèdera donc une valeur inférieure à celle-ci. Suivant la figure 16 :

$$V_s = V_z - V_{BE} \quad (3-16)$$

Supposons que la diode est en silicium, donc on peut prendre  $V_{BE} = 0,6V$ . On va utiliser une diode zener **1N5386B** à laquelle correspond une tension  $V_z = 180V$ . Or  $V_{BE}$  est négligeable devant  $V_z$ , donc :

$$V_s = 180V \quad (3-17)$$

De la figure 16 encore, on peut écrire :

$$V_e = V_{CE} + V_s \quad (3-18)$$

Pour le choix du transistor, on est obligé de considérer la tension maximale que peut débiter le pont de diode. Autrement dit,  $U_c = V_e = 392V$ . Ce qui nous amène à prendre un transistor **TN3440A**.

Pour ce qui est de la résistance de polarisation  $R$ , on a la relation suivante :

$$V_e = V_Z + RI$$

(3- 19)

Le gain de ce transistor est  $\beta = \frac{I_{C,max}}{I_B} = 20$ .

En se référant du tableau 6, on peut tirer la valeur  $I_B = 84mA$ .

Comme énoncé auparavant, la diode zener assure bien son rôle de stabilisatrice de tension à condition que le courant lui traversant soit compris dans une variation acceptable. Soit  $10mA \leq I_Z \leq 40mA$ .

Pour bien dimensionner la résistance, prenons  $I_Z = 40mA$ . On peut donc connaître la valeur de R.

$$R \approx 2,2k\Omega$$

(3- 20)

#### 4. Dimensionnement du filtre :

Le filtre est composé d'une inductance L accompagnée de la résistance R du cuivre mises en série avec la charge, ainsi que d'un condensateur C disposé en parallèle. On obtient alors la fonction de transfert suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1+jRC\omega+(j\omega)^2LC} \quad (3-21)$$

Cette expression désigne le gain du filtre, et la forme généralisée est la suivante :

$$G(j\omega) = \frac{1}{1+2m\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)+\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (3-22)$$

Avec :

- $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  : pulsation de coupure
- $m = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$  : coefficient d'amortissement

Or la fréquence de coupure est :

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3-23)$$

Généralement, on prend  $m=0,7$ . Ainsi, on peut appliquer la relation :

$$G(j\omega) = \frac{1}{2m\sqrt{1-m^2}} = \frac{V_s}{V_e} \quad (3-24)$$

D'où :

$$V_e = V_s \cdot 2m\sqrt{1-m^2} \quad (3-25)$$

Pour  $V_s = 220V$  (tension de charge), la tension de sortie de l'onduleur (ou tension d'entrée du filtre) sera  $V_e = 218,6V$ .

Ainsi, on a :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + jRC\omega + (j\omega)^2 LC} = 1,006$$

$$(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2 = 0,99$$

Avec :  $m = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = 0,7$ , on tire  $(RC)^2 = 1,96LC$

Donc :

$$\omega^4(LC)^2 - 0,04\omega^2 \cdot LC + 0,01 = 0$$

On a une équation du second degré en  $LC$ , d'où, on obtient :

$$LC = \frac{0,015}{\omega^2}$$

Pour  $\omega = 100\pi$ , et si on pose  $C = 3000\mu F$ , on a les caractéristiques du filtre :

<b>Résistance R[Ω]</b>	0,2
<b>Inductance L[H]</b>	0,05
<b>Condensateur C[μF]</b>	3000
<b>Tension d'entrée <math>V_e[V]</math></b>	218,6
<b>Tension de sortie <math>V_s[V]</math></b>	220

Tableau 13: paramètres du filtre

## 5. Dimensionnement de l'onduleur :

### i. Choix des transistors de puissance de l'onduleur:

L'onduleur est dimensionné en fonction des paramètres du filtre. La tension efficace de sortie est  $U = 218,6V$ , ce qui implique une tension d'entrée  $U_e = 309V$ . Le choix se porte sur un transistor **2N6517**.

### ii. Dimensionnement du circuit d'aide à la commutation :

Pour la protection des interrupteurs lors des commutations, il serait nécessaire de mettre en place un circuit d'aide à la commutation en parallèle avec le composant de puissance. On utilise souvent le circuit RCD.

Voici une figure montrant le montage de ce dispositif :

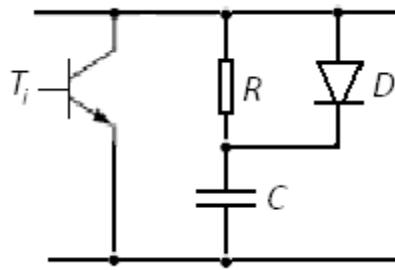


Figure 23: circuit d'aide à la commutation des interrupteurs

Dans ce circuit, la diode sert à assurer la continuité du courant dans la charge inductive lors de l'ouverture de l'interrupteur. Le condensateur C servira d'accumulateur d'énergie provenant des intensités parasites (toujours à l'ouverture du transistor), tandis que la résistance R serait disposée de façon à ce qu'elle puisse dissiper toute l'énergie dégagée par le condensateur.

Pour la détermination des paramètres de ce dispositif, on utilise les relations :

$$\begin{cases} I_T = C \frac{dV}{dt} = C \frac{\Delta V}{t_d} \\ P_{R.\max} = f \left( \frac{1}{2} C U^2 \right) \end{cases} \quad (3-106)$$

D'où :

$$C = \frac{I_T \cdot t_d}{V_{CEO}} \quad (3-2711)$$

Et

$$R = \frac{2}{fC} \quad (3-28)$$

La résistance est dimensionnée en fonction de la puissance du condensateur.

Après calcul, on peut résumer les résultats dans le tableau suivant :

Condensateur $C [\mu F]$	<b>36</b>
Résistance $R [\Omega]$	277
Diode	1N5404

Tableau 14: les composants du circuit d'aide à la commutation

### iii. Dimensionnement du circuit de commande :

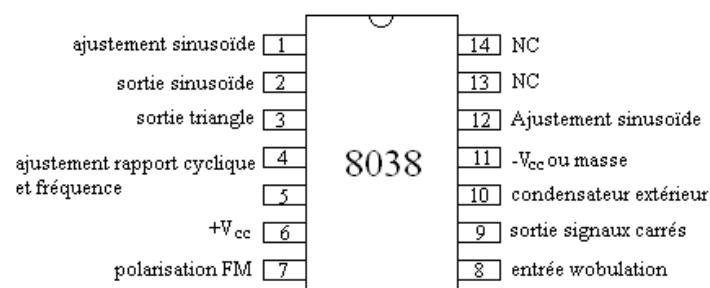
Comme on l'a dit auparavant, on dispose de deux composants pour la génération des deux signaux à comparer.

➤ Le générateur ICL 8038 :

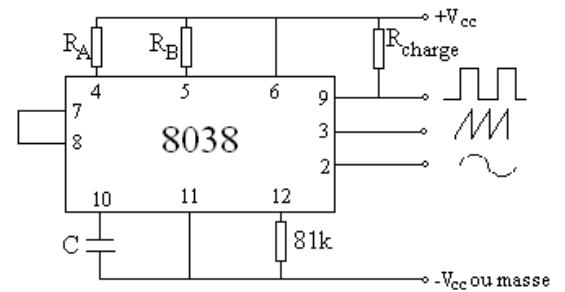
- Présentation :

Ce circuit peut délivrer simultanément des signaux carrés, triangulaires et sinusoïdaux à la même fréquence. C'est pour cela qu'on en utilisera deux : l'un générant le signal triangulaire à une fréquence  $f_{tri} = 10\text{kHz}$ , et l'autre fournissant le signal sinusoïdal à  $f_{ref} = 50\text{Hz}$  (c'est ce que l'on veut fixer).

Voici la représentation du ICL 8038 :



Brochage du 8038



Montage de base

Figure 24: représentation du ICL 8038

- Dimensionnement :

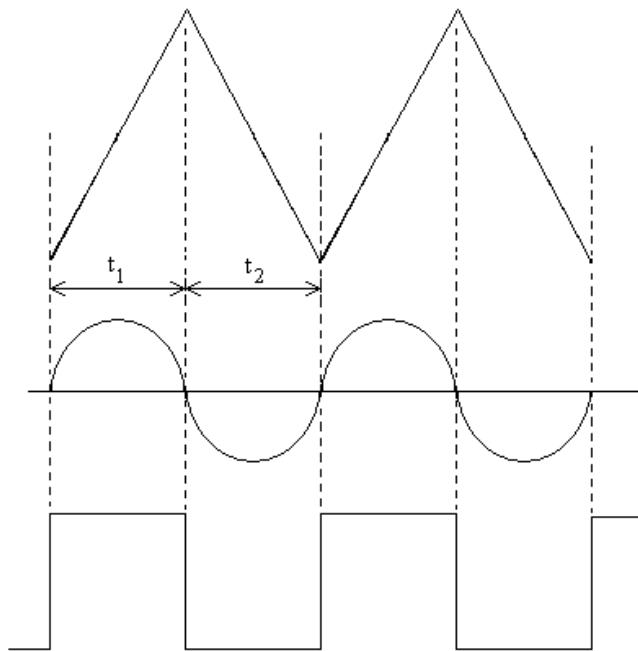


Figure 25: représentation des signaux de sortie

Ce circuit présente comme fréquence :

$$f = \frac{1}{t_1+t_2} = \frac{0,3}{RC}$$

(3-29)

Pour un rapport cyclique de 50%, on peut écrire :  $R_A = R_B = R$

Fixons la valeur de la capacité à  $C = 470 \text{ nF}$ , et  $+V_{cc} = 18V$ , d'où on a les résultats suivants pour les deux signaux :

	Triangulaire	Sinusoidal
Fréquence [Hz]	10000	50
Résistance [ $\Omega$ ]	63	10
Condensateur [ $\text{nF}$ ]	470	470

Tableau 13: résultats des paramètres du circuit ICL 8038

➤ L'amplificateur non-inverseur :

Ce dispositif est nécessaire pour ajuster l'amplitude des signaux. Pour ce faire, l'une des résistances doit être variable ( $R_b$  dans notre cas).

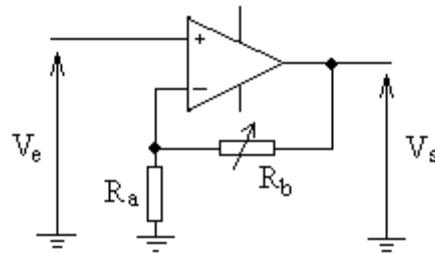


Figure 26: amplificateur non-inverseur

A la sortie de l'oscillateur, c'est-à-dire à l'entrée de l'amplificateur, on doit avoir la tension :

$$V_e = \frac{3}{5} V_{cc} = 10,8V \quad (3-30)$$

Dans la figure 26, on a la relation :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \cdot V_e \quad (3-31)$$

Le dispositif présente un gain supérieur à l'unité, donc  $10,8 \leq V_s \leq 18V$ .

Si on fixe  $R_b = 47k\Omega$  et  $V_s = 18V$ , on obtient :  $R_a = 82k\Omega$ .

**Remarque :** ces résultats sont valables pour les deux signaux.

➤ Le comparateur :

Comme son nom l'indique, le comparateur sert à comparer les signaux de la porteuse et de la référence. Il ordonne, avec l'aide de deux portes ET, la commande cyclique respective des

cellules de l'onduleur. Un autre amplificateur inverseur permet la commande dans les deux sens de l'alternance de la référence.

➤ **Le circuit anti-chevauchement :**

Lors de la commutation, les interrupteurs dans une même branche ne doivent pas être fermés simultanément pour éviter le court circuit au niveau de la cellule, ce qui entraînera une détérioration des composants, et ainsi de l'onduleur. On utilise alors un circuit anti-chevauchement qui consiste à retarder la conduction de  $T_1$  jusqu'à ce que  $T_2$  soit complètement bloqué. Cette opération se fera en réglant les potentiomètres.

Voici le schéma du circuit :

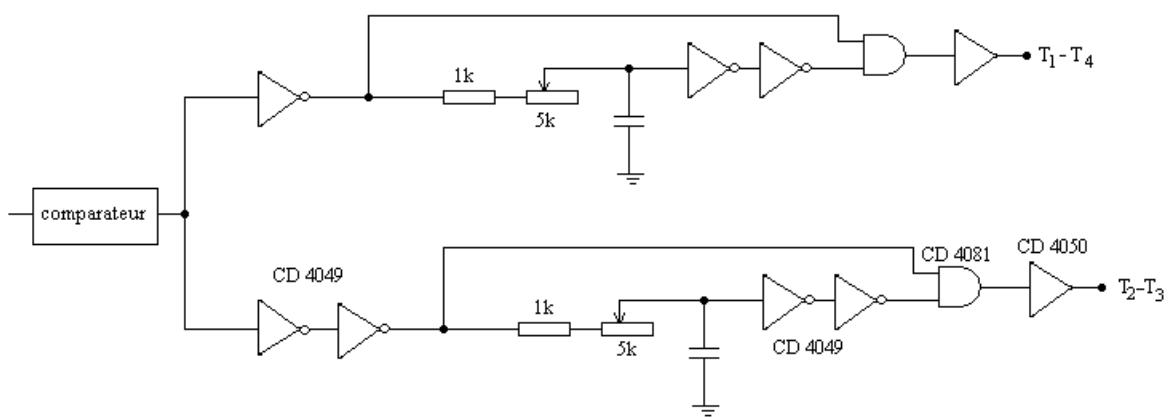


Figure 27: circuit anti-chevauchement

Les circuits inverseurs CD 4049 permettent d'inverser le signal délivré par le comparateur pour obtenir les deux signaux complémentaires. Les CD 4050 servent de source de courant pour l'étage en aval.

➤ **Dimensionnement du circuit de commande des transistors :**

Pour les couples d'interrupteurs ( $T_1, T_4$ ) et ( $T_2, T_3$ ), on réalise une pré-amplification à l'aide d'un transistor pour assurer la protection des composants. On adopte ainsi le montage Darlington.

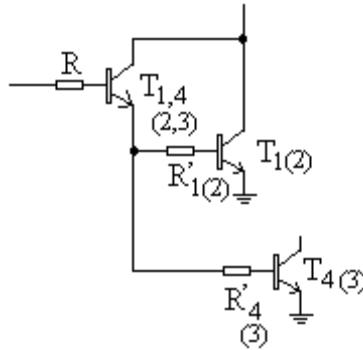


Figure 28: circuit de commande des transistors de puissance

Le tableau suivant récapitulera les paramètres de la commande des transistors de puissance.

Résistances $R [k\Omega]$	82
Résistances $R' [k\Omega]$	10
Transistors T	2N6517
Transistors $T_i$	2N6517

Tableau 14: paramètres de la commande des transistors de puissance

## 6. Dimensionnement de l'alimentation à découpage :

### i. Détermination des paramètres de l'alimentation :

Dans cette partie, on est obligé de se référer des paramètres exigés par l'onduleur.

Le courant  $I_L = I_E$  (où  $I_E$  est le courant sortant de l'alimentation stabilisée).

$$\text{Or : } I_E = \frac{\beta}{\beta+1} I_C$$

Pour  $\beta = 20$  (caractéristique du transistor), on obtient  $I_E = I_L = 1,42A$ .

La recherche de ce courant est indispensable au choix de la diode. Par ailleurs, cette dernière doit être choisie en fonction des paramètres à l'entrée de l'onduleur.

On devra respecter la tension de sortie  $U = 220V$  au niveau de la charge, soit une tension continue maximale  $U_c = 309V$  à la sortie du hacheur. Etant donnée la tension stabilisée  $U = V_s = 180V$ , alors on peut tirer le rapport cyclique défini dans le tableau 8.

Le tableau suivant montre les résultats des calculs issus du tableau 8 :

Désignations	symbole	valeur
Rapport cyclique	$D$	0,41
Tension de sortie	$U_c [V]$	309

Courant dans l'inductance	$I_L[A]$	1,42
Courant de charge	$I_R[A]$	0,84
Courant dans la diode	$I_D[A]$	0,84

Tableau 15: résultats des paramètres du convertisseur

*ii. Choix de L:*

Le dimensionnement de L doit prendre en compte l'ondulation du courant. Soit la relation :

$$\Delta I_L = i_{L.max} - i_{L.min} = \frac{U.T_p}{L} \cdot D \quad (3-32)$$

L'ondulation du courant est maximale pour  $D = 1$ , donc on peut écrire :

$$L \geq \frac{U.T_p}{\Delta I_{L.max}} \quad (3-33)$$

**Remarques :**

- Pour  $\Delta I_L$  trop faible, on aura une valeur excessive de L.
- Pour  $\Delta I_L$  trop élevée, la valeur maximale du courant que Q et D doivent supporter augmente. Il peut y avoir également une augmentation de la largeur de la zone de la conduction discontinue dans laquelle la tension de sortie de l'alimentation varie en fonction du courant débité.

L'abaque ci-après, paramétré par  $\Delta I$ , nous permet de choisir l'inductance  $L$  en fonction de la fréquence de découpage.

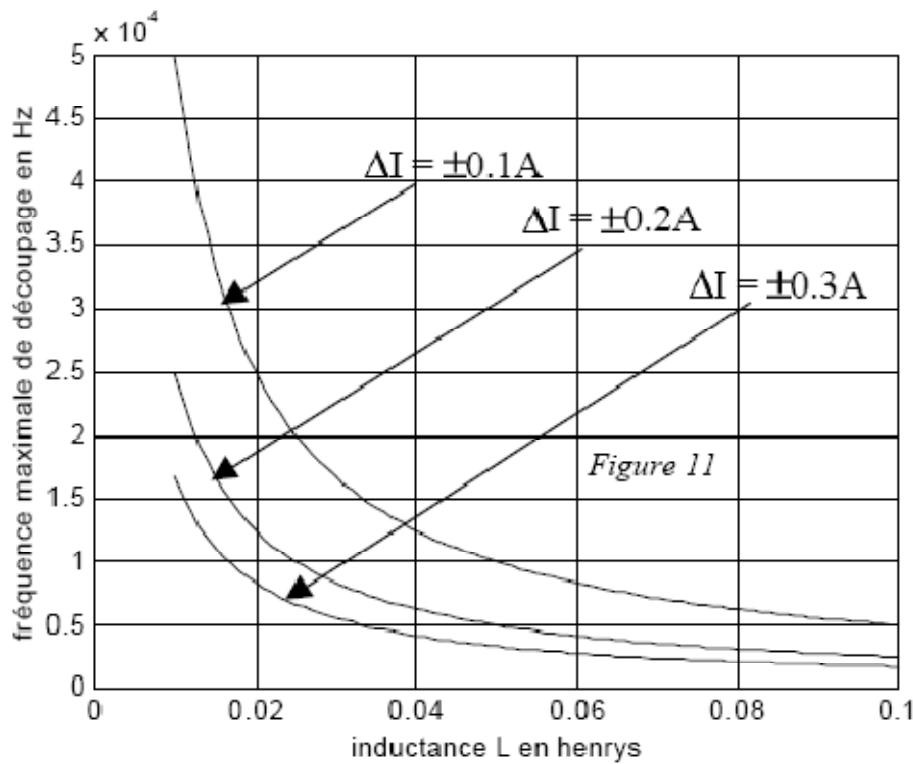


Figure 29: abaque pour le choix de L en fonction de la fréquence de découpage

Compte tenue les remarques citées précédemment, on va supposer  $\Delta I = \pm 0,2A$ .

Si on fixe une fréquence de découpage  $F_d = 10kHz$ , on aura :

$$L \approx 25mH \quad (3-34)$$

### iii. Choix de C :

L'ondulation de la tension de sortie (aux bornes du condensateur) peut être calculée en considérant que le courant  $I_R$  dans la charge est constant et égal au courant moyen  $I_D$ .

La relation suivante nous permet d'écrire l'ondulation de tension aux bornes du condensateur :

$$\Delta U_C = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_R \cdot t_e}{C} = \frac{U_C}{R} \cdot \frac{D \cdot T_p}{C} \quad (3-35)$$

Or on obtient une ondulation maximale pour  $D = 1$ , en plus, pour une alimentation de qualité, on prend souvent une ondulation relative égale à 0,01.

D'où :

$$C \geq \frac{I_R \cdot T_p}{0,01 \cdot U_C} \quad (3-36)$$

Pour une fréquence de découpage de 10kHz, on aura :

$$C \geq 36\mu F$$

Prenons donc :

$C = 47\mu F$	(3- 37)
---------------	---------

Voici les contraintes nécessaires pour la détermination de la diode  $D$  et de l'interrupteur  $Q$ .

<b><math>Q</math></b>	<b><math>D</math></b>
$V_{max} = U_C$	$V_{D,max} = U_C$
$I_{max} = \frac{I_R}{1 - D} + \frac{D \cdot U}{2L \cdot f_d}$	$I_{D,max} = \frac{I_R}{1 - D} + \frac{D \cdot U}{2L \cdot f_d}$
	$I_{D,moy} = I_R$
$f_d = \frac{1}{1 - D}$	$f_d = 1$

Tableau 16: contraintes sur l'interrupteur et la diode

Dans ce tableau, le terme  $f_d$  représente le facteur de dimensionnement. A l'appui du tableau 11, on aboutit à :

<b><math>Q</math></b>	<b><math>D</math></b>
$V_{max} = 309 V$	$V_{D,max} = 309V$
$I_{max} = 2,29A$	$I_{D,max} = 2,92A$
	$I_{D,moy} = 0,84A$
$f_d = 1,72$	$f_d = 1$

Tableau 17: valeur des contraintes pour Q et D

D'où le choix des composants suivants :

Diode	1N5404
Transistor	ECG2530

Tableau 18: référence de Q et D

# Partie 4 : ETUDE de FLOTTAISON

Pour respecter le terme « centrale flottante », il est indispensable d'effectuer une étude sur la flottabilité de toute la centrale.

Quelques terminologies seront nécessaires à la compréhension, à savoir :

- **Flottabilité** : c'est la possibilité de l'organe de se maintenir en position d'équilibre verticale par rapport à la surface libre de l'eau.
- **Stabilité** : c'est la capacité de la centrale toute entière de revenir seule à la position d'équilibre après la disposition des forces extérieures.
- **Insubmersibilité** : c'est la capacité de l'organe flottant de rester en flottaison après l'envahissement par l'eau d'une partie du volume constituant la coque tout en gardant la stabilité.
- **Carène** : c'est la partie immergée de l'élément flottant.
- **Ligne de flottaison** : c'est le niveau de l'eau auquel le navire totalement chargé reste stable.

## I. Le volume de la carène :

Le volume de la carène dépend de la masse totale de tous les organes ainsi que les différentes forces qui agissent sur l'ensemble.

Supposant qu'on est en flottaison libre, les efforts mis en jeu sont :

- La force de pesanteur (poids)  $\vec{F}_g$  :

$$\vec{F}_g = M \cdot \vec{g} \quad (4-1)$$

avec  $M = \sum_i m_i$  (masse totale)

- Les forces de pression de l'eau  $\vec{F}_i$  : c'est la résultante des pressions élémentaires qui agissent sur la carène.

$$\vec{F}_i = \sum_i \vec{P}_i \quad (4-2)$$

$$\vec{F}_i = \gamma \cdot \nabla = \rho \cdot \nabla \cdot \vec{g}$$

Où :

- $\gamma$  : poids volumique
- $\nabla$  : volume d'eau déplacée, avec  $\nabla = V + V_{ap}$
- $\rho$  : masse volumique de l'eau ( $\rho = 1Kg/$  pour l'eau douce)
- $V$  : volume de la carène
- $V_{ap}$  : volume des appendices (nul dans notre cas).

En flottaison libre, la condition d'équilibre est établie pour :

$$\boxed{\vec{F}_g + \vec{F}_i = \vec{0}} \quad (4-3)$$

$$M \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$$

$$\text{D'où : } \boxed{V = \frac{M}{\rho}} \quad (4-4)$$

La masse totale de tous les éléments est résumée dans le tableau suivant :

Désignation	Masse [Kg]
<b>Turbine</b>	365
<b>Multiplicateur</b>	60
<b>Alternateur</b>	15
<b>Flotteur</b>	50
<b>Total</b>	<b>490</b>

Tableau 19: masse des différents éléments de la centrale

D'où la valeur du volume de la carène :

$$\boxed{V = 490 \text{ Kg/dm}^3} \quad (4-5)$$

Voici un schéma illustrant le flotteur :

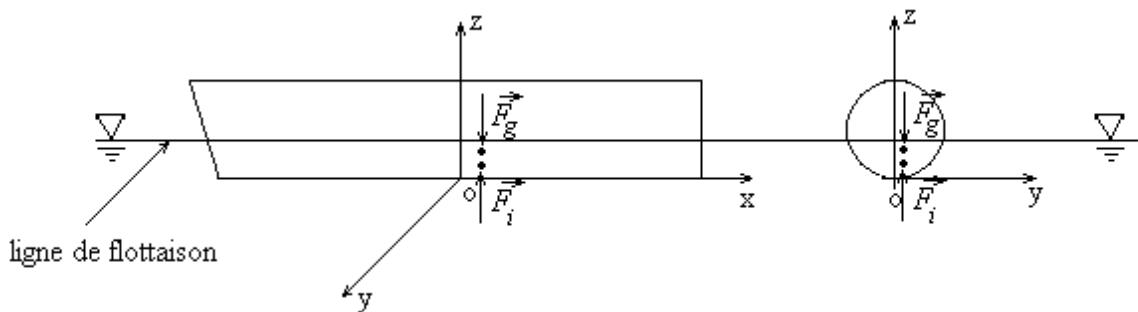


Figure 30: les efforts agissant sur le flotteur

La ligne confondue avec l'axe (ox) est la quille. La partie comprise entre la quille et la ligne de flottaison constitue la carène.

## II. Dimensions du flotteur :

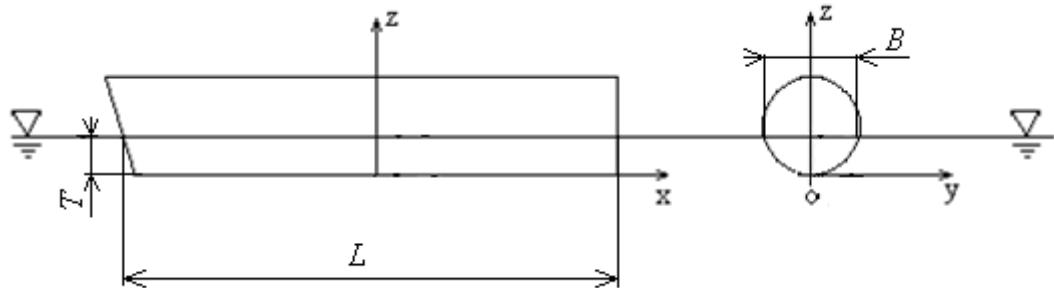


Figure 31: les dimensions caractéristiques du flotteur

Dans ce schéma :

- $L$  : indique la longueur entre deux perpendiculaires mesurées à la ligne de flottaison ;
- $B$  : c'est la largeur du flotteur à la ligne de flottaison ;
- $T$  : c'est le tirant d'eau.

Il existe des relations liant ces grandeurs, telles que :

- $\frac{L}{B} = 2,1$  à  $2,5$  (plus ce terme est faible, plus la stabilité est meilleure)
- $\frac{B}{T} = 7,7$  à  $10$

En prenant  $\frac{L}{B} = 2,1$  et  $\frac{B}{T} = 7,7$ , et en fixant  $L=2m$ , on obtient les dimensions caractéristiques de la carène.

$$\boxed{\begin{cases} L = 2m \\ B = 0,9m \\ T = 0,12m \end{cases}} \quad (4-6)$$

Pour la dimension du flotteur, seule celle de la carène est importante mais pour le reste, on doit penser à économiser de matière. Pour cela, on va considérer un flotteur en demi-cylindre de diamètre  $1m$ .

### Remarque :

En fait, le flotteur se divise en deux parties. Ainsi, le volume de la carène vu précédemment (4-5) n'est autre que celui de l'ensemble. Chacun possède donc respectivement  $245Kg/dm^3$ .

Voici un schéma simplifié permettant de voir la disposition des flotteurs.

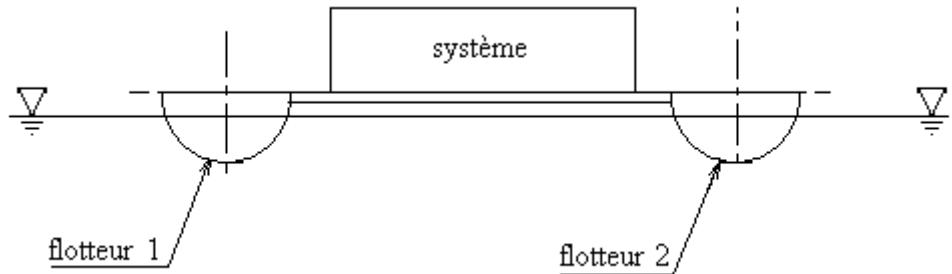


Figure 32: représentation simplifiée de la centrale

### III. Le système de fixation :

#### 1. Les efforts mis en jeu :

Pour assurer une bonne fixation de l'ensemble lors de son fonctionnement normal, on doit mettre en place un système d'amarrage sur les rives. Un dessin simplifié nous permet la compréhension du système, en vue de dessus.

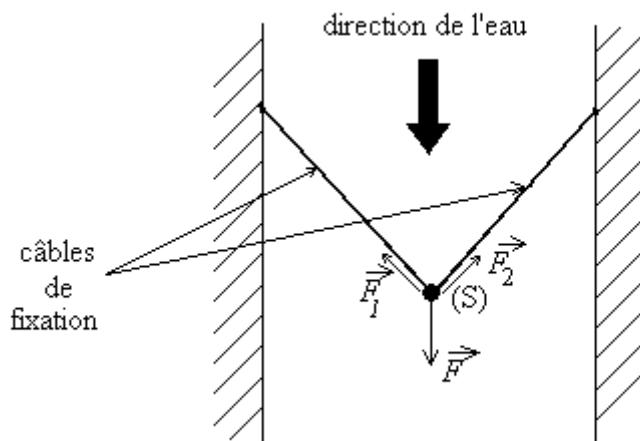


Figure 33: le système de fixation de l'ensemble

L'organe tout entier est assimilable à un point matériel (S), comme le montre la figure ci-dessus. Il est soumis à un effort dû à l'écoulement de l'eau, étant donné que le poids de l'ensemble s'annule avec les forces de pression qui s'exercent sur les flotteurs. Ainsi, au niveau des câbles apparaissent des réactions, modélisées par  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$ , permettant de rétablir l'équilibre du système.

Si le système est muni d'un repère orthogonal, à l'équilibre, on peut écrire la relation :

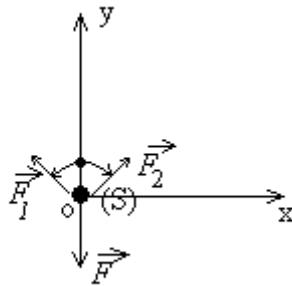


Figure 34: bilan des forces extérieures

- Suivant (o,x) :  $F_1 = F_2$
- Suivant (o,y) :  $F_1 = F_2 = \frac{F}{2 \cdot \cos \alpha}$

$\alpha$  étant l'écartement des câbles par rapport à (o,y).

L'intensité de  $\vec{F}$  dépend de la vitesse d'écoulement de l'eau. Cette force a été trouvée lors de l'étude de la partie turbine.

Si on suppose que l'équilibre est établi pour  $\alpha = 45^\circ$ , on obtient, pour une vitesse de  $1,29m/s$  :

$$\begin{cases} \mathbf{F = 48,98N} \\ \mathbf{F_1 = F_2 = 34,63N} \end{cases} \quad (4-7)$$

## 2. Dimensionnement des câbles :

Si on isole les câbles, on peut bien voir les sollicitations appliquées.

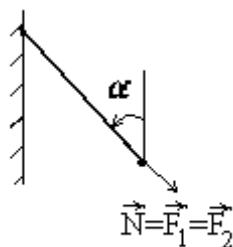


Figure 35: les efforts sur le câble

Les câbles sont soumis à une contrainte de traction. La formule relative à cette contrainte est donnée par la loi de HOOKE :

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad (4-8)$$

Où :  $S$  est la section de la pièce.

On peut encore ajouter à la relation précédente, la condition suivante :

$$\sigma = \frac{N}{S} \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{s} \quad (4-9)$$

Avec :  $\sigma_e$  représente la limite d'élasticité (caractéristique du matériau), et  $s$  le coefficient de sécurité ( $s > 1$ ).

Si on considère un câble en acier inoxydable **Z6C13** ( $\sigma_e = 230N/mm^2$ ), et si on adopte un coefficient de sécurité  $s = 3$ , on a :

$$S \geq \frac{N \cdot s}{\sigma_e}$$

Où

$$d \geq \sqrt{\frac{4N \cdot s}{\pi \cdot \sigma_e}}$$

$$d \geq 0,8mm \quad (4-70)$$

Pour assurer une rigidité de la fixation, on va prendre un diamètre normalisé  **$d = 5mm$** .

Sur une largeur de  $6m$  de la rivière, celle occupée par la centrale est de  $4m$ . D'où, on peut tirer la longueur des câbles qui se calcul comme suit :

$$l = \frac{6-4}{2 \cdot \sin 45^\circ} \quad (4-8)$$

Les caractéristiques des câbles sont donc :

<b>Longueur [mm]</b>	1414
<b>Diamètre [mm]</b>	5
<b>Désignation</b>	Z6C13

Tableau 20: les caractéristiques du câble

# Partie 5 : EVALUATION ECONOMIQUE et ENVIRONNEMENTALE

## I. Etude économique :

Après avoir mis en œuvre tous les dispositifs et matériels nécessaire au bon fonctionnement de la centrale, on doit effectuer une évaluation économique du projet entier afin de pouvoir étudier la rentabilité et la faisabilité.

### 1. Devis estimatifs des matériels :

Comme cette étude concerne tout le projet, alors on va montrer le coût ainsi que la quantité correspondant à tous les éléments de l'installation.

- Pour la turbine : le coût total (TTC) s'élève à **Ar 9584450**.
- Pour la boîte multiplicatrice : on a un coût total (TTC) de **Ar 1000000**.
- Pour l'ensemble alternateur-régulateur :

La liste de tous les matériels est résumée dans le tableau suivant :

matériels	Coût unitaire [Ar]	Quantité	Coût total [Ar]
alternateur	150000	1	150000
Pont de diodes	3000	1	3000
condensateurs	1400	9	12600
résistances	600	10	6000
diodes	1600	6	9600
transistors	3000	6	18000
self	1000	2	2000
ICL 8038	5000	2	10000
CD 4049	4000	4	16000
CD 4050	4000	2	8000
CD 4081	4000	2	8000
Fer à souder	5000	1	5000
Etain	200	5	1000
Main d'œuvre			30000
<b>TOTAL</b>			<b>291400</b>

Tableau 21: devis des matériels pour l'ensemble alternateur-régulateur

Au total donc, on aboutit à la somme de **Ar 11675850** TTC. Cette valeur représente le coût total de tous les principaux matériels de l'installation. Or, lors de la réalisation d'un projet, le choix de l'investissement tient compte également des imprévues, une somme qui est estimée à partir du coût total de l'installation. L'estimation de cette valeur s'élève à 30% de la principale, soit **Ar 3502755**.

On peut tirer à partir de ces valeurs, l'investissement total qui est de **Ar 15178605**.

## **2. Etude comparative :**

La rentabilité du projet est mesurée lors de son exploitation. Ainsi on va aligner un autre mode de production d'électricité avec notre installation et tirant ensuite le résultat. Pour cela, prenons référence au groupe électrogène.

Supposons que le prix du litre de carburant est de Ar 2400. Avec une consommation de 0,35l/kWh, on obtient Ar 840 pour 1 KWh, soit Ar20160 pour une journée.

Contrairement à cela, avec notre installation, capable de fournir 450W en fonctionnement normal, on arrive à réduire le prix jusqu'à Ar 8100 par jour, si on considère le prix à Ar 750/kWh (largement supérieur à celui proposé par la JIRAMA).

Si on fait une estimation pour une année de fonctionnement normal, on arrive à économiser Ar 8100\*365= **Ar 2956500**.

## **3. Le flux net de trésorerie (FNT) ou CASH FLOW :**

Ce paramètre se définit par le bénéfice net du projet durant sa durée de vie, estimée à 50 ans dans notre cas. La connaissance de cette grandeur permet de tirer la valeur actuelle nette (VAN) ainsi que le taux de rentabilité interne (TRI), lesquels seront indispensables pour la mesure de la rentabilité.

Si on adopte un amortissement linéaire et un IBS (Impôt sur les Bénéfices des Sociétés) de 35%, on peut rédiger le bilan suivant, et en tirer le flux de trésorerie :

Unité monétaire : **Ariary**

Année	1 à 50
<b>(1) Recettes</b>	2956500
<b>(2) Charge</b> = (1).0,2	591300
<b>(3) Dotation aux amortissements</b> =(1).0,35	1034775
<b>(4) Résultat avant amortissement</b> =(1)-(2)	2365200
<b>(5) Résultat après amortissement</b> =(4)-(3)	1330425
<b>(6) IBS</b> =(5).0,35	465648.75
<b>(7) FNT</b> =(1)-[(2)+(6)]	1899551.3

Tableau 22: **Evaluation du flux net de trésorerie**

#### 4. Calcul de la valeur actuelle nette (VAN):

Le principe de la VAN est très simple. Il consiste à additionner les cash flow engendrés par l'investissement. Elle est donc un outil qui sert à mesurer la création de valeur du projet.

$$VAN = \sum_{p=1}^n FNT \cdot (1 + i)^p - I \quad (5-1)$$

Dans laquelle :

- FNT : flux de trésorerie de la période  $p$
- $n$ : durée de vie du projet
- $i$  : taux d'actualisation
- $X = (1 + i)^p$

Supposons qu'à chaque période, le prix du kWh subit une hausse de 2%, et puisque le FNT est le même durant toute la durée de vie du projet, alors on peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} VAN = 1899551(X^1 + X^2 + \dots + X^{50}) - 15178605 \\ X = \frac{1+0,02}{1+i} \end{array} \right. \quad (5-2)$$

Pour le calcul, on doit considérer deux résultats du VAN dont l'un est positif et l'autre négatif. Ceci est nécessaire pour la recherche du TRI.

- VAN pour  $i = 15\%$  :

$$X = \frac{1 + 0,02}{1 + 0,15} = 0,88$$

$$\underline{VAN = 624464 Ar} \quad (5-3)$$

- VAN pour  $i = 16\%$

$$X = 0,87$$

$$\underline{VAN = -580499 Ar} \quad (5-4)$$

#### 5. Calcul du taux de rentabilité interne (TRI):

Le taux de rentabilité interne d'un projet est le taux pour lesquels la dépense d'investissement est égale au total des CF positifs engendrés par l'investissement et actualisé au même taux. Autrement dit, le TRI est le taux qui annule le VAN. On a vu dernièrement que cette dernière doit s'annuler pour un taux compris entre 15% et 16%.

D'où :

$$\boxed{15\% \leq TRI \leq 16\%} \quad (5-5)$$

Par interpolation, on obtient un **TRI = 15,51% > 15%**. Ceci nous permet déjà de juger le projet rentable. Cependant, il faut introduire la notion du temps de remboursement.

## 6. Calcul du délai de récupération du capital investi (DRCI) :

Le DRCI ou PAY BACK période est une méthode complémentaire à celle de la VAN ou du TRI. Elle consiste à mesurer le temps que l'investissement met à récupérer sa mise de fonds. Il s'exprime par :

$$\boxed{\mathbf{PAY\ BACK} = \frac{I}{FNT}} \quad (5-6)$$

$$= \frac{15178605}{1899551} = 7,9\ ans$$

### Interprétation :

L'évaluation économique nous a permis d'affirmer la rentabilité de notre projet car on a pu dégager un **TRI = 15,51% > 15%** (et une VAN positive bien entendu). Le capital investi est totalement récupéré après 7,9 ans, soit environ 7 ans et 10 mois.

## **II. Etude d'impact environnemental:**

Il y a toujours confusion entre environnement, du point de vue générale, et environnement écologique. Or, selon la loi N° **90.033-97.012-2004.015** relative à la charte de l'environnement malagasy, l'article 2 définit l'environnement comme l'ensemble des milieux humains et les facteurs socioculturels qui intéressent le développement national.

L'environnement constitue une préoccupation prioritaire pour l'Etat ; et la protection et le respect de l'environnement sont d'intérêt général, d'après les énoncés relatifs aux articles **3** et **4** de la Charte de l'environnement Malagasy.

Il serait donc du devoir de chacun de veiller à ce que le respect de l'environnement soit bien mise en valeur.

Les objectifs essentiels pour aboutir à un développement durable serait de :

- Développer les ressources humaines,
- Promouvoir un développement durable en gérant mieux les ressources naturelles,
- Réhabiliter, conserver et gérer le patrimoine malagasy de biodiversité,
- Améliorer le cadre de vie des populations rurales et urbaines,
- Maintenir l'équilibre entre croissance de la population et développement des ressources,
- Améliorer les outils de gestion de l'environnement,
- Aider à la résolution des problèmes fonciers.

Concernant les projets industriels, conformément à l'article 10 de la loi N° **90-033** du 21 décembre 1990 portant Charte de l'Environnement Malagasy et ses modificatifs, les projets d'investissements publics ou privés susceptibles de porter atteinte à l'environnement doivent faire l'objet d'une étude d'impact environnemental (EIE).

### **1. Le projet face à l'environnement :**

Cette étude peut être classée comme projet d'investissement privé, cependant, on doit toujours prendre en compte la loi énoncée auparavant dans la Charte de l'Environnement Malagasy, accompagnée du septième engagement de Madagasikara Am-Perinasa (MAP) qui consiste à « **prendre soin de l'environnement** », et ce sera nos balises pour la mise en œuvre de l'étude environnementale.

Et si on se réfère au deuxième engagement de MAP encore, dans le quatrième défi qui précise « **d'assurer un approvisionnement d'énergie adéquat, à coût abordable et compétitif** », on se fixe comme objectif l'approvisionnement de manière fiable et durable, à un prix abordable, du milieu urbain et rural, en tenant compte de l'accroissement de l'accès à l'électricité en milieu urbain de 74% et en milieu rural de 10% en 2011.

En ce qui concerne l'étude, on serait obligé de formuler les dossiers ci-après, portant l'EIE, pour se procurer un permis ou agrément environnemental auprès de l'Office National pour

l’Environnement ou O.N.E ou du Ministère de tutelle de l’activité. Cette obligation est conforme à l’**article 11 (nouveau)** du décret MECIE stipulant qu’une directive générale précise le contenu d’une EIE :

L’EIE, telle visée aux articles **3** et **7**, est effectuée aux frais et sous la responsabilité du promoteur. Son contenu est en relation avec l’importance des travaux et aménagements projetés et avec leurs incidences possibles sur l’environnement.

Une directive générale précise le contenu d’une EIE qui doit au moins comprendre :

1. Un document certifiant la situation juridique du lieu d’implantation du projet;
2. Une description du projet d’investissement;
3. Une analyse du système environnemental affecté ou pouvant être affecté par le projet ; cette analyse doit aboutir à un modèle schématique faisant ressortir les principaux aspects (statique ou dynamique, local ou régional) du système environnemental, en particulier ceux susceptibles d’être mis en cause par l’investissement projeté ;
4. Une analyse prospective des effets possibles sur le système précédemment décrit, des interventions projetées ;
5. Un Plan de Gestion Environnemental du Projet (PGEP) ;

Un résumé non technique rédigé en malagasy et en français, afin de faciliter la prise de connaissance par le public des informations contenues dans l’étude ; ce résumé joint à l’étude et en fait partie intégrante, qui indiquera en substances en des termes accessibles au public, l’état initial du site et de son environnement, les modifications apportées par le projet et les mesures envisagées pour pallier aux conséquences dommageables de l’investissement à l’environnement.

## **2. Les principaux impacts susceptibles d’être causés par le projet :**

### ***i. Identification des impacts :***

#### ***• Phase préparatoire :***

Dans cette première phase, on pratique les descentes sur terrain et on recueille tous les renseignements utiles.

On informe le propriétaire du parc ainsi que les usagers de la valeur physique et économique du projet, c’est-à-dire expliquer tout les avantages que l’on peut tirer avec le projet. Cela peut avoir de l’impact immédiat sur les personnes locales ; que ce soit impact moral ou culturel. Dans cette phase encore, on doit apporter des formations pour les gens de la région, surtout concernant l’entretien et la maintenance de la centrale ainsi que sa surveillance. En terme technique environnementale, c’est ce qu’on appelle GELOSE (GEstion LOcale SÉcurisée). C’est plus pratique au lieu de recruter des agents venant d’ailleurs.

#### ***• Phase de construction :***

Pour ce qui est de la construction de la centrale, on n’opère directement pas sur le lieu car on l’effectuera ultérieurement. Ce qui signifie que cela n’apporte pas dans l’immédiat du profit pour les gens de la région en matière de création d’emploi. Par contre, on peut en tirer des avantages puisqu’on n’a pas besoin de modifier les caractéristiques écologiques du milieu (par exemple: couper les arbres, aménager le terrain, ...), et cela représente un des plus

importants impacts positifs de ce projet. Seule la mise en place du système d'amarrage ainsi que la boîte de régulation peut occuper un minimum d'espace sur les deux côtés de la rivière, ce qui entraîne un léger changement de la surface occupée.

- **Phase d'exploitation :**

Ce projet consiste à mettre en place une centrale hydroélectrique flottante alors cela sous-entend que l'eau sera notre principale ressource. Donc, on ne doit pas négliger non plus **la loi 99.021 du 21 Janvier 1999** portant **Code de l'eau**, et l'article 2 qui précise que « le texte est applicable à tout établissement privé, ce qui est notre cas, et à tous les secteurs d'activités économiques », s'ajoutant à l'article 5 qui énonce « la préservation des ressources en eau (objectif de qualité), les rejets d'eaux doivent être incolores, inodores ». Comme on l'a dit auparavant, la rivière qu'on exploite est celle qui alimente l'industrie de production d'énergie électrique de la JIRAMA.

Voici quelques points qu'on doit prendre en compte concernant les impacts éventuels :

**-pollution de l'eau :** Puisqu'on n'utilise que l'énergie au fil de l'eau comme ressource, alors le rejet d'eau provenant de la microcentrale s'adapte bien à l'article 5 dans la loi régissant la Code de l'eau.

En effet, on ne dispose pas de produits toxiques ou colorants susceptibles de s'opposer à cette loi. Cela exclut déjà le fait de dire que les eaux rejetées soient sales. On ne peut donc pas citer de conséquences néfastes dans ce cas de pollution.

**-pollution de l'air :** on rencontre souvent ce genre de pollution avec les grandes centrales habituelles à cause de l'usage d'énergies pétrolières, ce qui est totalement exclu dans notre cas.

**-impact sur le paysage :** dans ce cas, il se peut que cela apporte un impact tant positif que négatif selon le point de vue de chacun. Effectivement, il y en a qui pensent que la centrale améliore le côté esthétique du milieu, mais d'autres se trouvent gênés.

**-impact sur l'environnement social :** étant donné que le projet est localisé, seul le propriétaire et les gens qui fréquentent souvent cet endroit peuvent en tirer profit. Les avantages, économiquement que moralement, sont qu'ils n'auront plus à se soucier du problème de carburant, de plus l'eau est qu'on utilise est suffisamment abondant, c'est pourquoi c'est plus bénéfique pour eux.

*ii. **Evaluation de l'importance des impacts :***

Si on considère tous les impacts cités précédemment, on peut remarquer que dans la majeure partie des cas, on ne rencontre que des impacts positifs. A noter que les impacts négatifs sont minimes et ne présentent pas trop de dangers pour l'environnement, néanmoins, il faut toujours chercher à les supprimer. Le cas de la pollution de l'eau et de l'air semble être un atout pour ce type de projet grâce à l'absence totale des impacts négatifs. La création d'emploi n'est possible que pour quelques postes, à noter le responsable de la sécurité de la

centrale, un ou plusieurs agents pour son entretien et sa maintenance. Ce qu'il faut remédier c'est le problème de la pollution sonore causée par l'alternateur car il est fort possible que cela interrompt la réalisation du projet en question si les clients sont trop exigeants.

### **3. Proposition de solutions pour atténuer les impacts négatifs :**

En tenant compte de l'importance des impacts négatifs causés par le projet, et pour respecter la mise en conformité vis-à-vis de l'environnement, on doit trouver des solutions pour supprimer si possible les nuisances potentielles causés par le projet, sinon il faut chercher à minimiser ou atténuer, et en dernier recours, il faut payer le prix en compensant les pertes éventuelles causées.

La première préoccupation qui apparaît, sans qu'on ne trouve de solution sauf en négociant, ou à la limite en payant, est l'influence de la mise en place de la centrale sur la vitesse d'écoulement de l'eau arrivée à Mandraka.

Pour le cas de l'alternateur, on a recours au choix d'une machine performante, capable de fonctionner avec un minimum de bruit avec un coût relativement bas.

Et si on prend maintenant le problème de l'extension du projet, il faut, dans le futur concevoir une autre étude sous un angle plus large pour satisfaire tout une région et non seulement un petit territoire, tout en respectant les lois en vigueur.

### **4. Conclusion :**

L'élaboration de cette étude d'impact environnemental de ce projet permet de tirer comme conclusion que la majorité des impacts sont plus positifs que négatifs. Quand même, il faut tenir compte de quelques points qui peuvent nuire à l'environnement (sonore, paysage, ...) et en apporter des solutions pouvant les atténuer.

Ce projet peut être classé parmi les projets à long terme grâce à la principale ressource inépuisable qui est l'eau.

Ce projet est donc jugé rentable pour n'importe quelle région à Madagascar par où passe une rivière possédant une énergie cinétique assez importante.

Pour n'importe quel projet, on doit toujours suivre à la lettre l'idée générale des lois relatives à la Charte de l'Environnement Malagasy ainsi qu'au programme de développement du gouvernement présent, comme le MAP par exemple.

## **CONCLUSION GENERALE :**

Malgré la mise en œuvre des différents projets de développement à Madagascar, la production d'électricité est insuffisante vu le pourcentage des zones électrifiées. Par conséquent, beaucoup de localités s'orientent vers un moyen de production autonome, efficace et rentable. C'est le cas du propriétaire d'un parc à qui sera destinée la microcentrale hydroélectrique flottante, le sujet même de cette étude. Le but de ce présent ouvrage est d'essayer de fournir de l'énergie électrique à un prix compétitif, en s'appuyant sur l'énergie renouvelable.

On a commencé ce travail en exploitant au maximum l'énergie hydraulique d'un cours d'eau, une énergie qui serait convertie à l'aide de différents dispositifs présentant le meilleur rendement. Seulement, la majeure partie de ce document concerne surtout la production d'électricité proprement dite. Pour cela, on a fait le choix de la machine électrique ainsi que le moyen de régulation adopté. Celui-ci a permis, comme son nom l'indique, de maintenir constantes les grandeurs imposées par le réseau (220V/50Hz). L'étude concernant la flottabilité de l'ensemble est également belle et bien expliquée étant donné que c'est encore une technologie nouvelle dans la matière d'énergie renouvelable. L'évaluation économique du projet permet à l'utilisateur de tirer un large profit comparé à celui exploitant l'énergie de la JIRAMA, ou encore le recours à un groupe électrogène. En dehors de la théorie, on s'est basé surtout sur la mise en conformité du projet vis-à-vis de l'environnement.

Dans les activités futures, des améliorations seraient souhaitables, comme l'introduction d'un système de régulation de vitesse au niveau de la boîte multiplicatrice pour réduire les dispositifs de régulation électrique. De plus, on pourra développer d'autres centrales pour différents régimes de cours d'eau.

## Annexe :

### Annexe 1 :Les autres méthodes pour trouver la vitesse de l'eau

#### ➤ Principe du tube de PITOT pour la recherche de la vitesse de l'eau :

Le dispositif est composé de deux tubes concentriques T et T'. La vitesse du courant se détermine par le théorème de Bernoulli :

$$\frac{p_0}{\omega} = \frac{p_1}{\omega} + \frac{V^2}{2g}$$

D'où :

$$V = \sqrt{2gh}$$

- $p_0$  et  $p_1$  : pressions respectives en B et C
- $\omega$  : poids spécifique du fluide
- $h$  : dénivellation de l'eau dans les tubes T et T'.

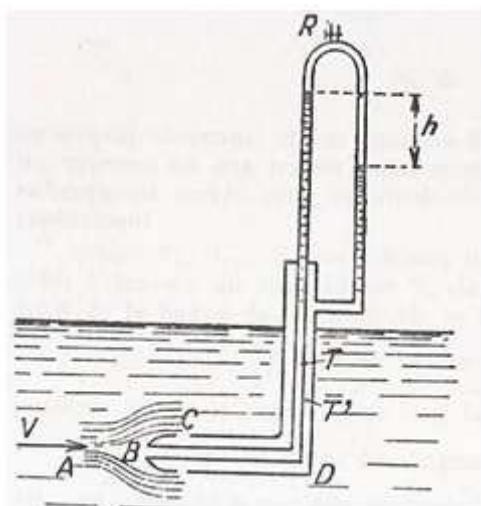


Figure 36: tube de PITOT

#### ➤ Principe du moulinet hydrométrique :

Le moulinet comporte principalement une hélice H fixée sur une arbre horizontale A. L'hélice est positionnée face à la direction de l'eau, avec laquelle, le contact entraîne sa rotation. Il

suffit donc de mesurer la vitesse angulaire de l'hélice, et d'en tirer ensuite la vitesse linéaire du courant. Le schéma du matériel est le suivant :

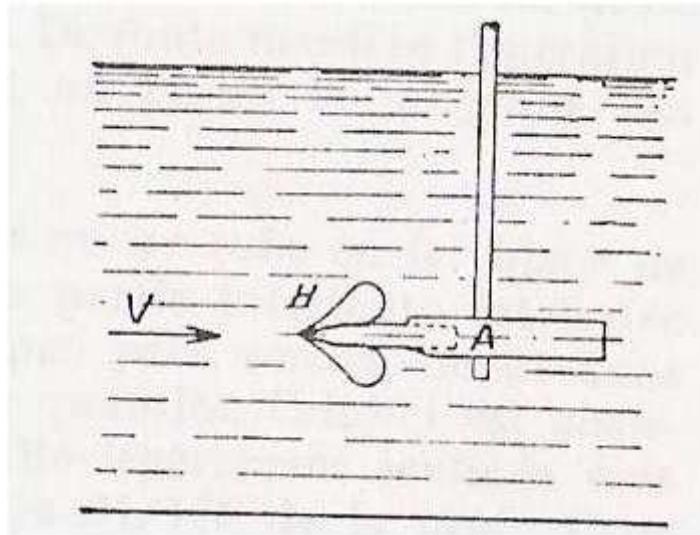


Figure 37: moulinet hydrométrique

## Annexe 2 :Détails au niveau de l'alimentation à découpage

### ➤ Choix de L :

Le dimensionnement de L doit prendre en compte l'ondulation du courant. Soit la relation :

$$\Delta I_L = i_{L,max} - i_{L,min} = \frac{U \cdot T_p}{L} \cdot D$$

L'ondulation du courant est maximale pour  $D = 1$ , donc on peut écrire :

$$L \geq \frac{U \cdot T_p}{\Delta I_{L,max}}$$

En effet, on peut observer l'allure de  $i_L$  sur la figure 18 et on tire donc les relations suivantes :

- Pour  $0 \leq t \leq D \cdot T_p$  :  $U_L = U = L \frac{di}{dt}$

$$i_L = \frac{U}{L} t + i_{L,min}$$

- Pour  $D \cdot T_p \leq t \leq T_p$  :  $U_L = U - U_C = L \frac{di}{dt}$

$$i_L = \frac{U - U_C}{L} (t - D \cdot T_p) + i_{L,max}$$

$i_L$  possède la même valeur pour  $t = D \cdot T_p$  donc on écrire :

$$i_{L,max} = \frac{U}{L} D \cdot T_p + i_{L,min}$$

pour  $t = 0, i_{L,min} = i_L$

d'où :

$$i_{L,max} = \frac{U}{L} D \cdot T_p + i_L$$

Ainsi, on aboutit à la formule (3-24).

➤ **Choix de C :**

La figure suivante illustre la forme du courant et de la tension aux bornes du condensateur :

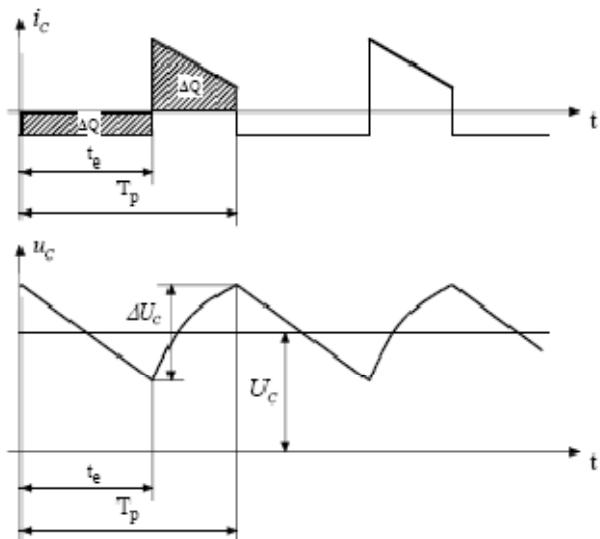


Figure 38: allures du courant et de la tension dans le condensateur

La relation (3-35) peut être déduite de cette figure pour le dimensionnement du condensateur.

## **BIBLIOGRAPHIE – WEBOGRAPHIE**

### **(1) André CAUVIN- Henri GUERREE**

« Elément d’hydraulique »

Edition EYROLLES, 1986

### **(2) A.CHEVALIER**

« GUIDE DE DESSINATEUR INDUSTRIEL »

Edition 1979

### **(3) A.GALICHON – M. BELLIER**

« ELECTRICITE INDUSTRIELLE – Machine électrique », 332 pages

### **(4) C.CIMELLI**

« Guide du technicien en électronique », 286 pages

### **(5) François BERNOT**

« Redresseur et onduleur assisté »

Technique de l’ingénieur, 24 pages

### **(6) H. FOCH**

« Commutation dans les convertisseurs statiques »

Technique de l’ingénieur, 19 pages

### **(7) Jean ENCINAS**

« Diodes et transistors bipolaires discrets »

Technique de l’ingénieur, 30 pages

**(8) L.MANITION – M.LENIR – J.ROUX**

« LES MICROCENTRALES HYDROELECTRIQUE »

Edition Masson, Paris, 1981

**(9) M. CORREVON**

« Régulateur de tension »

Technique de l'ingénieur, 47 pages

- (10)** **IC MASTER 2001**, 1073 pages
- (11)** The TTL Data Book for design engineers
- (12)** <http://www.clients.newel.net> /particulier/amader.
- (13)** <http://www.WPJ.TERM.0703> / Aspect technologie et environnementale
- (14)** <http://www.ADEME.com> / L'Energie micro hydraulique et l'environnement.  
pdf
- (15)** <http://recherche.technologie.wallonie.be>
- (16)** <http://www.w3.org/1999/html>
- (17)** [www.cibleclik.com](http://www.cibleclik.com)
- (18)** [www.pienergie.com](http://www.pienergie.com)
- (19)** [www.provenenergy.com](http://www.provenenergy.com)
- (20)** [www.datasheet.com](http://www.datasheet.com)
- (21)** [www.madagascar.gov.mg/MAP](http://www.madagascar.gov.mg/MAP)

**Titre :** Centrale hydroélectrique flottante (partie régulation)

**Directeurs de mémoire :**

- Mr RASOLDIER Olivier
- Mr RABENARIVO Michel

**Auteur :** RAKOTONINDRINA Tahiry Fanantenana

**Contact :** 033 11 392 54

**Adresse :** Lot II V 9 Ampandrana Besarety

---

**Résumé :**

Le taux de la zone électrifiée est un facteur qualificatif du développement d'un pays. Notamment, à Madagascar, plusieurs régions endurent encore ce problème d'accès à l'électricité. C'est l'objet de l'élaboration de ce document qui vise à fournir de l'énergie à une localité isolée et non encore recouvert par le réseau de la JIRAMA.

La solution adoptée pour cela, est la mise en place d'une microcentrale hydroélectrique flottante à proximité du lieu. Le principe de consommation est le même que pour les grandes centrales, sauf que dans notre cas, le système de réglage de débit n'intervient pas. Ainsi, on a recours à la régulation de tension utilisant des circuits électriques performants. L'étude technique a été effectuée parallèlement avec le respect de l'environnement et l'assurance d'une rentabilité du projet.

**Abstract:**

The rate of the electrified area is a qualificative factor of a country's development. Particularly, in Madagascar, several regions had to endure this problem. That's the object of this document which aims at providing energy to an isolated locality and not recovered by mains of JIRAMA.

That's why the adopted solution to take is putting floating microcentrale hydroelectric close to the site. The principle is the same for all the great centrals, except that in this case, the regulation system of delivery doesn't interfere. In this way, we have recourse to voltage regulation by using better electric circuits. Technical work was realized at the same time as the environment's law and the warranted rentability of the project.

**Mots clés:** Centrale hydroélectrique flottante, Réseau isolé, Alternateur, Electronique de puissance, Régulateur, Semi-conducteur, Flottabilité.

**Nombres de pages :** 76

**Nombres de tableau :** 24

**Nombres de figures :** 38