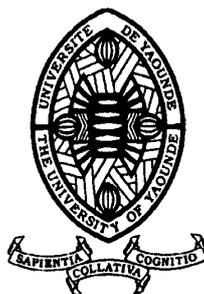


REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
ECOLE NORMALE SUPERIEURE
DEPARTEMENT DE DEPARTEMENT DE
PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
HIGHER TEACHER TRAINING COLLEGE
DEPARTMENT OF DEPARTMENT OF PHYSICS

CONTRIBUTION À LA REALISATION D'UNE MICRO-CENTRALE HYDROELECTRIQUE DANS L'ARRONDISSEMENT DE YAOUNDE PREMIER

Mémoire présenté et soutenu en exigences des conditions requises pour l'obtention du Diplôme de Professeur de l'Enseignement Secondaire 2ème Grade(DI.P.E.S.II)

Par :

MOUNKAPEGNA MBANCHOUT Jean-Roland
Licencié en physique

Sous la direction
Professeur BEGUIDE BONAMA
Maître de conférences



Année Académique
2015-2016



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire de Yaoundé I. Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : biblio.centrale.uyi@gmail.com

WARNING

This document is the fruit of an intense hard work defended and accepted before a jury and made available to the entire University of Yaounde I community. All intellectual property rights are reserved to the author. This implies proper citation and referencing when using this document.

On the other hand, any unlawful act, plagiarism, unauthorized duplication will lead to Penal pursuits.

Contact: biblio.centrale.uyi@gmail.com

Dédicace

À

- Ma feu grande sœur et mère adoptive, Mme **POUENPENE** née **VOM Madeleine** ;
- Ma feu nièce et petite sœur, **YIAGNI MFOPA Marlise**.

Seigneur, fais-leur, à toutes deux miséricorde pour qu'elles puissent reposer en paix !

Remerciements

Le présent travail n'aurait été possible sans un ensemble d'aides et des conseils précieux. C'est pourquoi je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance infinie à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements vont :

- Au Pr. **BEGUIDE BONOMA** mon Directeur de mémoire et chef du département de physique qui s'est montré à l'écoute et a suivi mon travail tout au long de la réalisation de ce mémoire ;
- À tous les enseignants des Départements de Physique, Chimie, mathématiques et Sciences de l'Éducation de l'École Normale Supérieure de Yaoundé pour les enseignements qu'ils nous ont offert durant notre formation. Je pense particulièrement aux : **Pr OWONO, Pr ATANGANA, Dr OWONA ANGUE Marie Louise Clotilde, Mme NGOMSI, M. MBALLA** et **Mme MBALLA**, celle pour qui j'ai une pensée pieuse. ;
- Aux membres du jury qui, en dépit de leurs multiples occupations, ont accepté d'évaluer ce travail ;
- Aux aînés du laboratoire de physique appliquée de l'École Normale Supérieure de Yaoundé ; **Dr. NSOUANDELE J. L., Dr. TAMBA J. G., M. SEUTCHE J. C., M. FANMOE W. et M. EBAINGAI L.** ;

Nos remerciements vont aussi à l'endroit de :

- Toute ma famille, Papa **MBANCHOUT joseph** et maman **NGUEGNI Orpa Julienne** pour leur amour, leurs précieux conseils et leur attention à mon égard ;
- Mon père adoptif, papa **POUENPENE Joseph** qui m'a élevé tout petit et m'encadre jusqu'à ce jour, pour le sens de la responsabilité, de rigueur et de patience qu'il m'a inculqué ;
- Mon oncle, Papa **PEMGOUBA Josué** ;
- **M. GNAMSIE Paul** et **Mme, M. WAKOU Roger** et **Mme, M. MFOPA Roger** et **Mme, M. MOUNBANA Abel** et **Mme, M. FIFEN Lazare** et **Mme, M.**

- MEVONO Ivan et Mme, M. FOTSEU William et Mme et, M. MOMGBET OUSSENI et Mme** pour tout le soutien et l'attention qu'ils ne cessent de m'accorder ;
- Mes neveux et nièces **Armand, Arlette, Amandine, Eugénie, Christian, Sandrine, Alvine, Jouvenca, Abel, Olivia et Grace** qui ont toujours été disponible pour m'accompagner à chacune de mes descentes sur le terrain ;
 - Mes amis, frères et sœurs, **Michelle NGONO, Alexis NSANGOU, Aristide KOP-NANG, Jules NCHARE ,Parfait DTISSEBE, Hussein KADIROU et Blanche MBASSI** qui ont toujours su m'encourager et me reconforter pendant les moments difficiles ;
 - Mes camarades et amis de promotion pour les échanges édifiants que nous avons eus tout au long de notre formation. Des remerciements particuliers vont à l'endroit de **Ledoux DJOMO, Dieudonné ABISSI** pour leurs lectures et leurs qualités humaines ;
 - Tous ceux et celles qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail et dont mention n'a pas été faite ici.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Table des matières	vi
Table des Figures	viii
Liste des tableaux	ix
Abréviations	x
Resumé	xii
Abstract	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 GÉNÉRALITÉS SUR L'HYDROÉLECTRICITÉ	4
1.1 Introduction	4
1.2 Historique de l'hydroélectricité	5
1.3 Les types de centrales hydroélectriques	7
1.3.1 Les centrales gravitaires	7
1.3.2 Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)	10
1.3.3 Les centrales marémotrices	11
1.4 Les éléments constituant une petite centrale hydroélectrique	12
1.4.1 Les ouvrages de génie civil	12
1.4.2 Équipements électriques et mécaniques	16
1.5 Principe de production de l'énergie électrique dans les centrales hydroélectriques	19
1.6 Les étapes d'un projet d'aménagement d'une petite centrale hydroélectrique	21
1.7 Le contexte réglementaire	22
1.7.1 Les procédures environnementales	23
1.7.2 Réglementation du secteur de l'hydroélectricité au Cameroun	23
1.8 Position du problème	24

1.8.1	Cartographie énergétique du Cameroun	24
1.8.2	Problématique	25
2	MATÉRIELS ET MÉTHODES	27
2.1	Introduction	27
2.2	Présentation de la section d'étude	27
2.2.1	Historique institutionnel de la commune	27
2.2.2	Milieu humain	29
2.2.3	Milieu physique et naturel	29
2.3	Hydrographie et choix du cours d'eau	33
2.3.1	Hydrographie	33
2.3.2	Choix du site d'implantation	36
2.4	Évaluation de la demande d'électricité de la localité de NYOM II	36
2.4.1	Estimation des besoins des ménages	37
2.4.2	Estimation des besoins des PME	37
2.4.3	Estimation des besoins des structures publiques et d'utilités publiques et autres	38
2.4.4	Puissance totale demandée :	38
2.4.5	Prévision de la consommation	38
2.5	Typologie et techniques de mesure du débit	38
2.5.1	Typologie de débit	38
2.5.2	Techniques de mesure des débits d'un cours d'eau	42
2.6	Typologie et techniques de calcul des hauteurs de chute	46
2.6.1	Évaluation de la dénivellation (chute brute)	46
2.6.2	Hauteur de chute nette	46
2.7	Estimation de la puissance	47
2.8	Perte de charge	48
2.9	Dimensionnement des principaux éléments de l'installation	50
2.9.1	Les transformateurs	50
2.9.2	L'alternateur	50
2.9.3	Choix de la turbine	51
2.9.4	Analyse économique	52
2.9.5	Les canalisations	53
2.9.6	Le Barrage de dérivation	54
2.10	Conclusion	54
3	RÉSULTATS ET DISCUSSION	55
3.1	Introduction	55
3.2	Hydrométrie de la rivière NSAS	55
3.3	Présentation des résultats	59
3.3.1	Évaluation de la demande d'électricité de la population de NYOM II	59
3.3.2	Puissance électrique de l'installation	59

3.4	Choix des principaux éléments de la centrale	60
3.4.1	La turbine	60
3.4.2	Le générateur	61
3.4.3	Conduite d'amenée	61
3.4.4	Barrage de dérivation	61
3.5	Étude de rentabilité économique	62
3.5.1	Coût d'investissement initial	62
3.5.2	Recettes annuelles	62
3.5.3	Temps de retour sur investissement (TRI)	63
3.5.4	L'actif sur la durée de vie du projet	63
3.5.5	Le passif sur la durée de vie du projet	63
3.5.6	La valeur résiduelle	63
3.5.7	La V.A.N.	64
3.6	Discussion	64
3.7	Conclusion	65
4	IMPLICATIONS PEDAGOGIQUES	66
4.1	Introduction	66
4.2	Adéquation avec les thèmes d'enseignements du secondaire	66
4.3	Intérêt didactique	66
4.3.1	Connaissances et capacités	66
4.3.2	Fiche pédagogique	67
4.4	Conclusion	67
	CONCLUSION GÉNÉRALE	69
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71

Table des figures

1.1	Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire (D'après Ackers et al.1996).	8
1.2	petite centrale hydroélectrique "au fil de l'eau" : l'eau est détournée par une conduite forcée [16]	9
1.3	Diagramme d'une petite centrale hydraulique au pied d'un barrage [2]	9
1.4	Principe de fonctionnement d'une STEP (D'après Ackers et al. 1996).	11
1.5	Barrage voûte [14]	13
1.6	Barrage à contreforts [14]	13
1.7	Barrage poids [14]	14
1.8	Barrage en remblais [14]	14
1.9	Barrage mobile à clapets [14]	15
1.10	Turbine FRANCIS [7]	17
1.11	Turbine KAPLAN [7]	17
1.12	Turbine PELTON [7]	18
1.13	Turbine Banki-Mitchell (cross-flow) [2]	18
1.14	Schéma d'une centrale hydroélectrique [2]	20
2.1	Limite et localisation de l'arrondissement de Yaoundé 1 ^{er} [19]	28
2.2	Diagramme des précipitations mensuelles moyennes de l'arrondissement de Yaoundé 1 ^{er}	31
2.3	Évolution des précipitations mensuelles moyennes de l'arrondissement de Yaoundé 1 ^{er}	31
2.4	Carte hydrographique de l'arrondissement de Yaoundé 1 ^{er} [26]	33
2.5	zone rurale de l'arrondissement de Yaoundé 1 ^{er}	34
2.6	Site de NKOLONDOM I	34
2.7	Site de NYOM II	35
2.8	Plan d'eau amont du site retenue	36
2.9	Position géographique du site probable (NYOM II)	36
2.10	Exemple de courbe chronologique des débits mesurés [28]	39
2.11	Exemple de Courbe des débits classés calculée à partir de la courbe chronologique [28]	40
2.12	Illustration de la définition des débits de restitution et de dotation [29]	42
2.13	Matériels de mise en œuvre de l'effet de Venturi	43
2.14	Dessin de définition	44

2.15	Mise en œuvre de l'effet Venturi	44
2.16	Méthode Float ou méthode de section du cours d'eau [32]	45
2.17	Mise en œuvre de la méthode Float	45
2.18	Illustration de la Hauteur de chute brute et nette d'une petite centrale à conduite forcée.	46
2.19	Dénivellations du NSAS à NYOM II	47
2.20	Rugosité des canalisations [33]	49
2.21	Coefficient de pertes de charges linéaires [33]	50
2.22	Choix des turbines hydrauliques pour les microcentrales hydroélectriques [3]	52
2.23	Rendements relatifs des turbines hydrauliques pour débits variables [3]	52
2.24	Conditions de fonctionnement des canalisations [9]	53
3.1	Variation annuelle des débits	57
3.2	Courbe des débits classés	58
3.3	Détermination du débit d'équipement ou de turbinage	58

Liste des tableaux

1.1	Cartographique énergétique du Cameroun [18]	25
2.1	Répartition géopolitique de CAY 1 [19]	29
2.2	Précipitations mensuelles (en mm) de l'arrondissement de Yaoundé 1 ^{er} de 2005 à 2015 [21]	30
2.3	Caractéristiques du site potentiel de NKOLONDON I	35
2.4	Caractéristiques du site potentiel de NYOM II	35
3.1	Valeurs de débits mesurés par nous aux mois d'avril et d'octobre	56
3.2	Précipitations mensuelles (en mm) de l'arrondissement de Yaoundé 1 ^{er} de 2005 à 2015 [21]	56
3.3	Valeurs approchées des débits de la rivière NSAS sur une année au niveau de NYOM II	57
3.4	Estimation de besoin énergétique de NYOM II	59
3.5	Données relatives à la puissance de l'installation	60
3.6	Productibilité moyenne annuelle de l'installation	60
3.7	Caractéristiques de la turbine adaptée à la microcentrale	61
3.8	Caractéristiques du générateur de la microcentrale	61
3.9	Caractéristiques de la conduite d'amenée	61
3.10	Caractéristiques du Barrage de dérivation	62
3.11	Contribution sur le coût d'investissement [9]	62
4.1	Fiche d'implication pédagogique	67

Abréviations

- A.D.E.M.E.** : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie.
- A.E.R.** : Agence d'Électrification Rural
- A.F.P.** : Agence française de développement
- A.I.E.** : Agence Internationale de l'Energie
- A.R.S.E.L.** : Agence de Régulation du Secteur de l'Energie Electrique
- B.U.C.R.E.P.** : Le Bureau Central des Recensements et des Études sur la Population
- C.A.Y.1.** : Commune d'Arrondissement de Yaoundé 1^{er}
- C.E.T.M.E.F.** : Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales
- C.M.P.Y.** : Centre Météo Principal de Yaoundé
- D.S.C.E.** : Document de Stratégies pour la Croissance et l'Emploi
- E.I.E.** : Étude d'Impact Environnemental
- E.I.E.R.** : Ecole Inter-états d'Ingénieurs et d'Équipement Rural
- E.I.E.S.** : Étude d'Impact Environnemental et Social
- E.S.H.A.** : European Small Hydro power Associations
- G.P.S.** : Global Positioning System
- G.T.Z.** : Agence Allemande de la coopération technique
- I.N.C.** : Institut National de la Cartographie
- M.C.H.** : Micro-Centrale Hydroélectrique
- M.I.N.E.E.** : Ministère de l'Eau et de l'Energie
- M.I.N.E.P.** : Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature
- P.A.C.E.R.** : Programme Action Énergies Renouvelables
- P.C.H.** : Petite centrale hydroélectrique
- P.G.E.** : Plan de Gestion Environnemental
- G.E.S.** : Plan de Gestion Environnemental et Social
- P.I.R.** : Plan d'Indemnisation et Recasement
- P.N.D.P.** : Programme National de Développement Participatif

P.N.U.D. : Programme des Nations Unis pour le Développement

S.T.E.P. : Station de Transfert d'Énergie par Pompage

U.N.I.P.E.D.E. : Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique

RESUMÉ

Au Cameroun, les zones urbaines, les aires rurales et les villages dépendent de l'énergie produite à partir des grandes centrales hydroélectriques. Cependant, son acheminement à travers les lignes de transmission reliant ces grandes centrales à ces différentes zones est parfois plus cher pour approvisionner des régions éloignées et des localités isolées à l'intérieur du pays. Ainsi, l'on dénombre près de 10500 localités non électrifiées sur les 13014 que compte le Cameroun. Pourtant, dans ces localités, il existe un réseau hydrographique et une topographie favorisant la production d'électricité à l'aide de micro-centrales hydroélectriques.

Au regard de tout cela, la présente étude a pour but de prospecter et d'identifier un site potentiel pour la réalisation d'une micro-centrale hydroélectrique dans l'arrondissement de Yaoundé 1^{er}, afin de résoudre le problème d'électrification et de baisses de tension que rencontrent les zones rurales et des nouveaux quartiers péri urbain de cet arrondissement. Les prospections, et les mesures de terrains ont permis de localiser sur la rivière NSAS, au niveau de la localité de NYOM II, arrondissement de Yaoundé 1^{er}; un site qui présente des caractéristiques répondant à une installation d'une unité de production par micro-centrale hydroélectrique.

Les principaux résultats obtenus sont présentés ainsi qu'il suit :

- Le potentiel de production hydroélectrique des sites prospectés montre que c'est sur le NSAS au niveau de NYOM II (03.98572N, 00.51671E), de par ses caractéristiques (hauteur de chute de 16.65m , débit de $0.35m^3/s$ et une puissance de 40kW) que nous proposons un projet de micro-centrale hydroélectrique (MCH).
- Le projet de MCH proposé produira $259600KWh/an$, capable de satisfaire les besoins de la localité et de ses environs ;
- Le cout estimatif du projet s'élève à $78millionsCFA$ pour un temps de retour sur investissement de 8 ans 6 mois.

Sur le plan pédagogique, le principe de base de fonctionnement de micro-centrale hydroélectrique se présente comme un véritable kit pédagogique dans un cadre d'enseignement et permet d'aborder certains contenus des sciences physiques de la 6^{eme} en terminale de façon innovante et motivante pour les apprenants.

Mots Clés : Énergie, Microcentrale, Hydroélectricité, débit, hauteur de chute.

ABSTRACT

In Cameroon, villages, urban and rural areas depend on electric energy produced from large hydroelectric power plants. However, supply of these various areas through connection of the hydro power plants with electric lines has shown to be expensive especially when it comes to connect isolates areas. 10,500 over 13,014 villages do not have access to electricity yet in those areas, hydro resources are available with favorable topographies for the production of electricity using micro hydro power plant. Considering all that, the present study aims at prospecting and identifying a potential site for the construction of a micro hydropower plant in Yaoundé 1 subdivision in order to solve the issue of access to continuous and reliable electricity faced by people living in that subdivision.

Field prospection and measurements led to the localization of a site with favorable characteristics for the installation of a micro hydro power plant. The site is located on the NSAS around the place called NYOM II in Yaoundé 1 sub division.

The main results of the study are presented as follow :

- A favorable site located on the NSAS around NYOM II, in Yaoundé 1 subdivision, with a production capacity of 40 kW for falls of 16.65 m with flow of $0.35m^3/s$. The geographical coordinates of the site are : 03.98572N, 00.51671E ;
- The suggested micro hydro power plant project shall generate around 259.6 MWh/year which will satisfy the needs for the locality and its surroundings ;
- The estimated investment cost of the project is 78 million CFA and the payback period is estimated to 8 years and 6 months.

For the teaching purposes, the functioning principle of a micro hydro power plant constitutes a meaningful pedagogic kit for teaching and it helps to engage with certain contents of physics curricular of all the classes of the secondary cycle with innovations and so such that student are motivated.

Key words : Renewable energy, micro power plant, hydroelectricity, rate, height of fall.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis la nuit des temps, les sociétés humaines cherchaient à s'établir à proximité de points d'eau tels que les fleuves, les lacs, les marigots, etc. Ce rapprochement signifie que l'eau est une denrée vitale pour l'existence même de l'homme en tant que être vivant et lui permet en outre de pratiquer les activités courantes de survie comme, l'agriculture, l'élevage, la pêche, la pisciculture, etc. C'est pourquoi, dans les civilisations antiques comme l'Égypte, les hommes avaient construit des barrages et des canaux pour prélever les eaux de crue du fleuve Nil pour l'irrigation [1]. Ils commencèrent ainsi à domestiquer la force de l'eau. On a retrouvé des traces d'ouvrages hydrauliques, datant de 3000 ans avant notre ère, issues de la civilisation mésopotamienne. Au cours de l'histoire, cette forme d'énergie connut alternativement des phases de prospérité et des phases de déclin. Un progrès décisif fut effectué au *XIX^e siècle*, lorsque l'énergie mécanique fournie par les cours d'eau put être utilisée pour la production d'électricité. La turbine, la génératrice électrique, le transformateur, ont permis à cette époque de produire industriellement de l'électricité. L'aménagement des rivières et l'implantation des industries qui utilisaient l'énergie Hydraulique ont conduit à l'essor des villes [2].

Depuis lors, l'intérêt dévolu aux énergies renouvelables ne cesse d'augmenter d'un jour à l'autre dans les quatre coins du monde et ce, pour des raisons écologiques et sociétales. A cet égard, l'énergie hydraulique est la première forme d'énergie renouvelable exploitée actuellement et de plus avant même la prise de conscience mondiale sur l'environnement [3]. En effet, L'hydroélectricité, qui est la plus ancienne forme d'énergie renouvelable à énergie finale électrique, représente à elle seule plus de 94% de la production d'électricité à base du renouvelable [4], ce qui représente 16% de l'électricité produite à travers le monde. À l'heure actuelle, plus de 25 pays dans le monde s'approvisionnent en électricité à 90% à partir de l'hydroélectricité (99,3% en Norvège), et 12 pays sont 100% dépendants des centrales hydroélectriques (Norvège, Éthiopie, Brésil, Uruguay, Islande, Colombie, Venezuela, Croatie, Canada, Suisse, Nouvelle Zélande). L'hydroélectricité produit la majeure partie de l'électricité dans 65 pays et joue un rôle clef dans plus de 150 pays. Le Canada, La Chine et les États-Unis sont les pays qui ont la plus grande capacité d'énergie hydroélectrique [4].

En ce qui concerne le Cameroun, les études montrent que le pays est bien pourvu sur le plan énergétique. En plus de son potentiel énergétique immense et même incroyable, Il dispose d'un potentiel hydroélectrique très impressionnant. Avec une puissance estimée à 23000 Mégawatts

par an, le Cameroun possède le deuxième potentiel hydroélectrique d'Afrique subsaharienne derrière la République Démocratique du Congo. Il est en outre le 18^{ème} au niveau mondial. Étonnement la capacité hydroélectrique utilisée par le Cameroun ne représente que 5% des réserves techniquement exploitables et, Moins de 40% de la population ont accès à l'électricité. Ce taux atteint à peine 10% en zones rurales, où à peine 2700 localités sont électrifiées sur les 13014 recensées en 2005 [5]. Pourtant, le succès des pays développés est attribuable en grande partie à l'exploitation des énergies renouvelables. Cependant, le Cameroun a contrario demeure un simple pays en voie de développement. De ce fait, l'économie camerounaise continue de faire face à un certain nombre de défis qui pourraient empêcher l'atteinte des résultats escomptés pour son émergence à l'horizon 2035. En effet, elle demeure fragile et entravée par des lacunes structurelles, relatives à la faible compétitivité du secteur productif et aux déficiences des facteurs de production clés que constituent les infrastructures et l'énergie. Pour cette raison, le principal défi à relever dans le secteur rural concerne le passage à une production rurale semi intensive et industrielle qui permettra entre autres d'approvisionner l'industrie de transformation et de créer un marché et une consommation internes pour les filières extraverties. Cependant, les faibles capacités de production et la vétusté des installations énergétiques actuelles freinent le développement des entreprises et des industries nationales, en même temps qu'elles ne constituent pas une incitation à investir dans un pays dont le potentiel hydroélectrique et gazier autorise pourtant de grands espoirs [6].

Conscient de ces enjeux et des nombreux défis qui l'interpellent pour les réalisations des grands projets, le Cameroun compte successivement résorber définitivement le déficit structurel, accompagner les besoins énergétiques pour l'atteinte des objectifs de croissance escomptés et devenir un exportateur d'électricité et contribuer ainsi à l'équilibre de la balance Commerciale du pays. Pour ce faire, l'État camerounais s'est fixé pour objectif de porter les capacités de production du pays à 3000 MW à l'horizon 2020 [6]. Ainsi, les actions à mener pour y arriver passe inéluctablement par le programme d'aménagement et la mise en service des grands et petits projets hydroélectriques notamment le développement de plusieurs sites présentant un potentiel à l'exportation d'énergie. C'est dans cette optique que se situe la présente étude qui est une contribution à la réflexion prospective pour la mise en place d'une micro-centrale hydroélectrique dans l'arrondissement de Yaoundé 1^{er}. Plus spécifiquement, il s'agira pour nous :

- D'identifier un site potentiel d'installation d'une micro-centrale dans cet arrondissement ;
- D'évaluer sa puissance ;
- D'estimer son cout de réalisation.

Pour ce faire, nous nous sommes fixés un plan qui repose sur quatre chapitres :

- ▷ Le premier chapitre ressort clairement les généralités sur l'hydroélectricité accompagnées en fin de chapitre de la position du problème.
- ▷ Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes et matériel qu'on peut utiliser pour mettre sur pieds la mini-centrale.

- ▷ Le troisième chapitre présente les résultats et discussion obtenus lors de l'étude.
 - ▷ Le quatrième chapitre présente les implications pédagogiques de notre travail.
- Nous achèverons cette étude par une conclusion générale et des perspectives.

GÉNÉRALITÉS SUR L'HYDROÉLECTRICITÉ

1.1 Introduction

L'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable basée sur le cycle naturel de l'eau. Elle est considérée comme la plus mature, la plus fiable et la plus rentable technologie de production d'énergie renouvelable disponible [7]. La petite hydraulique où la puissance est généralement inférieure à 10MW , a un potentiel énorme dans le monde entier, ce qui lui permettrait une contribution significative aux besoins énergétiques futurs [8]. Dans le nouveau contexte du marché d'électricité, cette technologie représente une bonne solution en termes de coût et d'impact environnemental. Comme la principale ressource est continue et prévisible, ces systèmes peuvent constituer la base de futurs micro-réseaux en particulier dans les sites isolés [8].

En effet, une centrale hydroélectrique est un ensemble d'ouvrages de production d'électricité dans laquelle le flux créé par l'eau amenée par écoulement libre (canaux) ou par des conduites en charge (conduites forcées) actionne la rotation des turbo alternateurs, avant de retourner à la rivière. C'est une forme d'énergie renouvelable, propre et non polluante. Une centrale hydroélectrique transforme l'énergie d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine, puis en énergie électrique. L'hydroélectricité constitue la première filière de production d'électricité primaire à l'échelle mondiale [2]. Pour ce qui est de petite centrale hydroélectrique (PCH), elle se définit comme une installation de production énergétique, d'une puissance inférieure à $10\ 000\ \text{kW}$, transformant l'énergie hydraulique d'un cours d'eau en énergie électrique. En outre, la grande majorité des petites centrales hydroélectriques sont des aménagements "au fil d'eau" ce qui signifie que les turbines produisent de l'électricité lorsque les débits du cours d'eau sont suffisants pour les alimenter. Normalement, ces sites n'ont pas la capacité de stocker de l'eau dans le but de produire de l'électricité durant les heures de pointe, bien qu'il existe quelques exceptions, particulièrement dans les aménagements à haute chute. La production cesse lorsque le débit de la rivière descend en dessous du seuil technique de fonctionnement des techniques de fonctionnement des équipements [9].

D'après l'UNIPEDE (Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'énergie Électrique) on classe les PCH en fonction de la puissance installée et on parle de :

- petite centrale pour une puissance comprise entre $2\ 000\ \text{kW}$ et $10\ 000\ \text{kW}$,
- mini-centrale pour une puissance comprise entre $500\ \text{kW}$ et $2\ 000\ \text{kW}$,

- micro-centrale pour une puissance comprise entre 20 kW et 500 kW,
- pico-centrale pour une puissance inférieure à 20 kW.

Les deux facteurs essentiels de la récupération d'énergie disponible sont **la hauteur de chute** et le **débit d'eau**, qui dépendent du site et qui doivent faire l'objet d'études préalables pour déterminer le projet d'aménagement.

1.2 Historique de l'hydroélectricité

Selon [10], les premiers ouvrages destinés à tirer profit de la ressource en énergie des cours d'eau sont attestés en Mésopotamie au *III^{ème}* siècle avant Jésus Christ. Les premiers moulins hydrauliques qui suivent, seront constitués de simples palettes actionnées par le courant. Au fil des siècles, les inventions mécaniques ont permis d'améliorer les performances ou d'augmenter le champ d'application des moulins : le renvoi d'angle (au *I^{er}* siècle) permet d'augmenter l'efficacité ; les moulins flottants (au *VI^{ème}* siècle) nécessitent peu de travaux d'implantation, les cames (au *XI^{ème}* siècle) permettent de transformer le mouvement de rotation en mouvement de translation. Ces améliorations ont favorisé l'évolution industrielle de nombreux secteurs jusqu'alors artisanaux tels que le textile, la tannerie, la papeterie, la minoterie, les scieries, puis ont révolutionné le travail de l'acier et la sidérurgie par la mécanisation des souffleries de forge. L'aménagement des rivières et l'implantation des industries qui utilisaient l'énergie hydraulique ont conduit à l'essor des villes. D'autres voies de développement liées à l'utilisation de l'eau ont également pu se développer, telles que le transport par voie navigable, l'irrigation, la pisciculture, l'alimentation, les fossés de défense des villes et des châteaux, l'artisanat, la navigation de plaisance. . .

Le moulin hydraulique restera le facteur essentiel du progrès jusqu'à l'invention de la machine à vapeur de Watt (au *18^e* siècle), puis au *19^e* siècle celle du moteur électrique. En Afrique orientale, les moulins furent introduits par les coolies indiens venus construire le chemin de fer de Mombassa en Ouganda, au début du *XX^{ème}* siècle. C'est à cette époque que commence l'exploitation de la force des marées, par l'utilisation de moulins marémoteurs. Mais une pièce centrale manque encore au puzzle hydraulique : la turbine. La Révolution de 1789 abolit le droit d'eau et de vent et c'est une multitude de moulins qui vont se répandre partout. Très vite, un règlement sera nécessaire pour éviter les querelles. L'état imposera un certain nombre de contraintes. Le meunier à eau devra respecter une certaine hauteur d'eau afin d'éviter les inondations et le meunier à vent ne pourra faire construire son moulin à moins de 70 mètres de la route de peur d'effaroucher les chevaux tirant les carrioles, tant par la rotation des ailes que par la projection de leur ombre sur la route. Certains moulins vont être abattus, détruits ou démontés à la suite de nombreux procès. En 1835, le Nord possédait 1728 moulins à vent et à eau, le Pas-de-Calais 1578. Dans le seul arrondissement de Lille il y en avait 448, dont 165 moulins à farine et 283 moulins à huile. La ville de Lille elle-même, capitale de l'huile (lin, colza) dans le Nord possédait un faubourg dit des Moulins, futur quartier de Moulins-Lille, véritable

forêt de moulins à huile, hautes tours de maçonnerie supportant de grandes ailes garnies de toiles rouges ou simples maisonnettes en bois montées sur un pivot. C'était le pays des "olieux". Le toc-toc des moulins s'entendait de fort loin. Dans la seconde moitié du XIX^{eme} siècle, avec le développement industriel, furent construites les minoteries à vapeur.

C'est au XIX^{eme} siècle que Benoist de Fourneyron invente la première turbine. Il utilise l'effet de la pression pour entraîner une roue à eau. Il aménage donc en 1837 une chute de 112 mètres ; l'eau arrive alors à une vitesse de $46m.s^{-1}$ sur une roue qui délivre une puissance de 45 kW. Les dynamos, puis les alternateurs mis au point par Gramme, entre 1869 et 1877, le coulage entre alternateurs étudié par Boucherot et Blondel en 1892, permettent enfin de produire industriellement de l'électricité à partir de l'énergie mécanique. Enfin, l'invention du transformateur électrique par Gaulard et Gibbs en 1885 permet de transporter l'électricité sur de longues distances. Ensuite l'hydroélectricité va connaître un développement spectaculaire. Ainsi, entre 1920 et 1940, plus de cinquante barrages sont édifiés. La naissance de l'électricité de France en 1946 permet de dégager des moyens financiers considérables et de planifier l'aménagement hydraulique du pays. En 1994, il n'y a plus que 17% de la production française d'électricité qui est d'origine hydraulique contre 56% en 1960. Parmi toutes les énergies renouvelables, l'hydroélectricité est la seule à être exploitée à grande échelle, et ceci dans le monde entier. En effet, elle représente 18% de la production électrique mondiale contre 64% pour les combustibles fossiles (charbon, pétrole, etc.), 17% pour le nucléaire et 0,5% pour les centrales géothermiques. La différence de l'électricité, que l'on ne peut pas stocker, l'eau, en revanche, peut être accumulée (EDF accumule ainsi 7 milliards de m^3 soit les 34% des réserves d'eau en France). Cette énergie accumulée est facilement mobilisable : il suffit, par exemple, de deux minutes à l'usine de Grand Maison dans les Alpes pour fournir 1800 MW. Cette souplesse de fonctionnement permet d'ajuster en permanence la production aux variations de la demande et fait de l'hydroélectricité le régulateur du réseau électrique français, indispensable lors de brusques variations de la consommation globale [11].

Le Cameroun quant à lui a accueilli son tout premier barrage hydroélectrique en 1957 baptisé Edéa I, ensuite viennent Edéa II en 1958 et Edéa III en 1975. Ces aménagements comptent 14 turbines d'une puissance allant de 11 à 22 MW pour une production totale de 263 MW. Situé approximativement à 55 km du barrage d'Edéa, le barrage de Song-Loulou a été mis en place en deux étapes : les groupes G1 à G4 de 1980 à 1981 et les groupes G5 à G8 de 1986 à 1987. Ces groupes ont une puissance de 48,75 MW chacun pour une production totale de 390 MW. Le barrage de Lagdo, situé au Sud de Garoua sur la Bénoué, a été mis en place de 1977 à 1982. Ce barrage a été conçu à la fois pour produire de l'électricité pour la région du grand nord Cameroun et pour l'irrigation de 15 000 hectares de terres cultivables. Il produit une puissance de 72 MW [5].

1.3 Les types de centrales hydroélectriques

L'objectif des centrales hydroélectrique est de convertir l'énergie potentielle et cinétique d'une masse d'eau s'écoulant entre deux points d'altitudes différentes, présentant ainsi une dénivellation ou hauteur de chute, en énergie électrique. La puissance de la centrale est proportionnelle au débit prélevé dans le cours d'eau et à la dénivellation. Selon [2], Il existe trois formes principales de production d'énergie hydroélectrique :

- Les centrales dites gravitaires pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement gravitaires.
- Les stations de transfert d'énergie par pompage (S.T.E.P), aussi connues sous l'appellation de centrales de pompage-turbinage, pour lesquelles un dispositif artificiel permet de pomper l'eau d'un bassin situé en aval vers l'autre en amont. Celles-ci comprennent d'ailleurs fréquemment une partie gravitaire.
- Les centrales marémotrices au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues pour produire l'électricité.

1.3.1 Les centrales gravitaires

Les centrales gravitaires sont celles qui mettent à profit l'écoulement de l'eau avec un dénivelé. Elles peuvent être classées en fonction du débit turbine et de la hauteur de chute.

1.3.1.1 Classement par type de fonctionnement

Il existe trois types de centrales gravitaires qui sont [12] :

▷ **Les centrales au fil de l'eau** qui utilisent le débit d'un fleuve et fournissent une énergie de base produite "au fil de l'eau" et injectée immédiatement sur le réseau. Lorsque le débit du cours d'eau descend sous le débit technique minimum nécessaire au fonctionnement de la turbine équipant la centrale, la production cesse. Elles nécessitent des aménagements simples et beaucoup moins coûteux que les centrales de plus forte puissance. Elles sont généralement constituées d'une prise d'eau, d'un tunnel ou d'un canal, puis d'une conduite forcée et d'une usine hydroélectrique située sur la rive de la rivière ;

▷ **Les centrales d'éclusée** : Ici, des barrages sur le fleuve ou sur un canal parallèle au fleuve provoquent des suites de chutes d'eau décimétriques qui ne perturbent pas la vallée dans son ensemble grâce à des digues parallèles au fleuve. Les usines hydroélectriques placées aux pieds des barrages turbinent l'eau du fleuve. Une gestion fine de l'eau stockée entre deux barrages permet de fournir de l'énergie de pointe en plus de l'énergie de base ;

▷ **Les centrales-lacs (ou centrales de hautes chutes)** sont également associées à une retenue d'eau créée par un barrage. Leur important réservoir (constante de vidage de plus de 200 heures) permet un stockage saisonnier de l'eau et une modulation de la production d'électricité : les centrales-lacs sont les plus sollicitées durant les heures de plus forte consommation

et permettent de répondre aux pics. Ces centrales sont typiques des aménagements réalisés en moyenne et haute montagne. Leur puissance est principalement liée au fort dénivelé entre la prise d'eau et le rejet. La conduite est l'ouvrage le plus important de ce type de petite centrale. Le fonctionnement d'une centrale gravitaire est décrit par le schéma suivant :

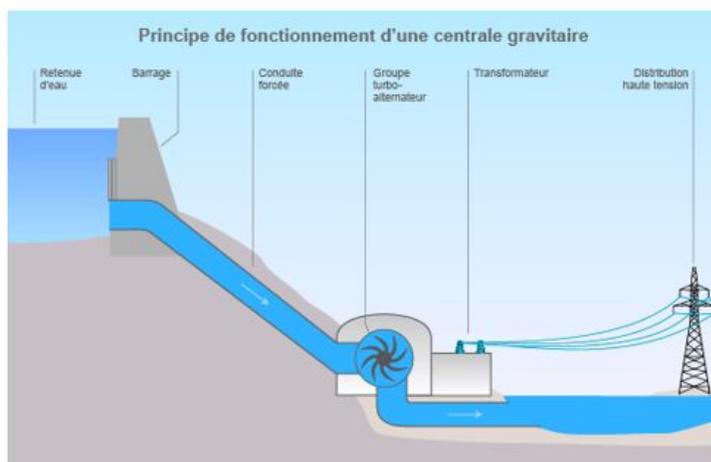


FIGURE 1.1 – Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire (D'après Ackers et al.1996).

1.3.1.2 Classement par hauteur de chute

Selon la hauteur de la chute, qui représente la différence d'altitude entre la surface libre de l'eau en amont de la prise d'eau lorsque le réservoir est plein et l'axe de la turbine ; les PCH peuvent être classées en trois catégories :

- Centrale à haute chute : 100m et plus,
- Centrale à moyenne chute : 30 à 100m,
- Centrales à basse chute : 2-30m.

Cette classification n'est pas rigide mais permet de définir la catégorie des sites [3]. Elle correspond de plus à des types de machines différentes. Parmi les applications nous pouvons citer :

- Les centrales au fil de l'eau qui semblent les plus favorables pour la technologie à vitesse variable [10],
- Les centrales en pied de barrage,
- Les centrales intégrées dans un canal ou un système d'approvisionnement en eau.

▷ Dans les aménagements au fil de l'eau, la turbine produit de l'électricité à partir de l'eau disponible prélevé dans le cours d'eau. Lorsque le débit du cours d'eau descend sous le débit technique minimum nécessaire au fonctionnement de la turbine équipant la centrale, la production cesse.

▷ Les aménagements de moyennes et hautes chutes utilisent des seuils pour dériver l'eau, l'écoulement est alors dirigé vers les turbines par une conduite forcée. Les aménagements de basses chutes sont généralement construits dans les régions de plaine où dans les vallées. Deux options technologiques peuvent être choisies : soit l'eau est détournée vers une centrale par

l'intermédiaire d'une courte conduite forcée, comme dans les centrales à hautes chutes (figure 1.1), soit la chute est créée par un petit barrage, équipé de vanne secteur, d'une prise d'eau intégrée, d'une centrale et d'une passe poissons [3].

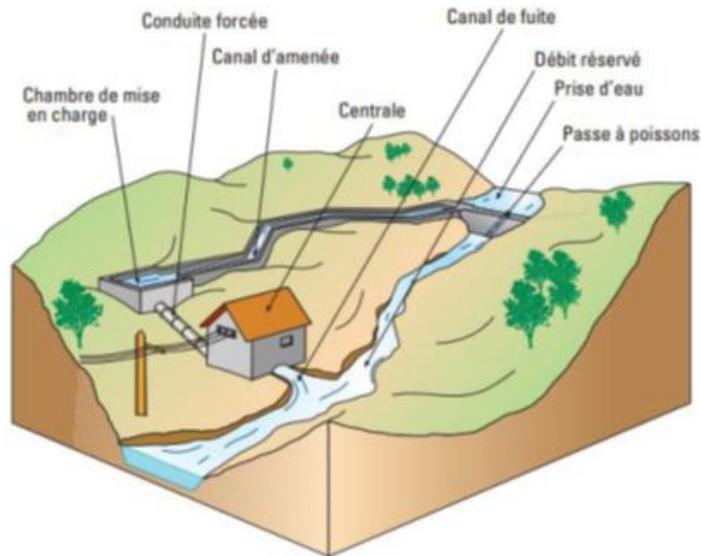


FIGURE 1.2 – petite centrale hydroélectrique “au fil de l’eau” : l’eau est détournée par une conduite forcée [16]

▷ Les aménagements au pied d'un barrage sont situés sur les fleuves et rivières importants, en plaine (figure 1.2). Ce sont les centrales de basses chutes, elles utilisent un débit d'eau qui est très important et non la hauteur de chute d'eau qui est faible (moins de 50 m). Ces centrales produisent sans interruption.

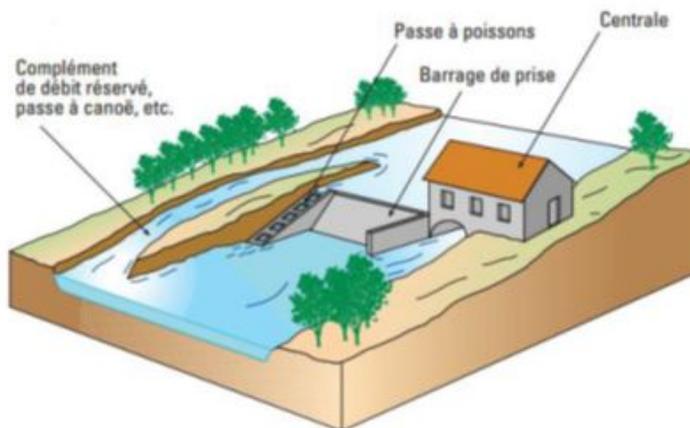


FIGURE 1.3 – Diagramme d'une petite centrale hydraulique au pied d'un barrage [2]

D'autres types d'aménagements peuvent être distingués tel que :

- Les aménagements intégrés utilisant un canal d'irrigation,
- Les aménagements intégrés dans un réseau d'eau potable,
- Les aménagements pour le turbinage des eaux usées

1.3.1.3 Classement par type de remplissage

La quantité d'énergie produite par une petite centrale hydroélectrique au fil de l'eau fluctue avec le cycle hydrologique. En effet, Pour qu'une centrale hydroélectrique fournisse de l'électricité sur demande, pour répondre à une demande fluctuante ou à une demande de pointe, l'eau doit être stockée dans un ou plusieurs réservoirs de retenue.

Ainsi, l'on peut classer les centrales gravitaires en fonction des caractéristiques de remplissage de leur réservoir, induisant par conséquent l'usage électrique sous certaines contraintes. On distinguera par exemple, les réservoirs dont le remplissage peut statistiquement être obtenu de façon hebdomadaire, saisonnière, annuelle, voire pluriannuelle. C'est le cas de très grandes étendues d'eau comme le réservoir Caniapiscau, créé dans le cadre du projet de la Baie James, au Québec. Cependant, il n'existe pas d'équivalence stricte entre ces trois types de classement mais une forte corrélation à savoir :

- Les centrales au fil de l'eau ont en général un remplissage quotidien avec des apports réguliers, et de faible hauteur de chute ;
- Les éclusées ont un remplissage quotidien ou hebdomadaire influencé par la saison (saison de crues) et des hauteurs de chute moyenne, plus rarement haute ;
- Enfin les lacs ont des remplissages en général saisonniers (fonte des neiges ou saison des pluies) et des hauteurs de chutes importantes.

1.3.2 Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Ces centrales, en plus de produire de l'énergie à partir de l'écoulement naturel, comportent un mode pompage permettant de stocker l'énergie produite par d'autres types de centrales lorsque la consommation est basse, par exemple la nuit, pour la redistribuer, en mode turbinage, lors des pics de consommation. Ces centrales possèdent deux bassins, un bassin supérieur et un bassin inférieur entre lesquels est placée une machine hydroélectrique réversible : la partie hydraulique peut fonctionner aussi bien en pompe, qu'en turbine et la partie électrique aussi bien en moteur qu'en alternateur. En mode accumulation la machine utilise le courant fourni pour remonter l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieure et en mode production la machine convertit l'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau en électricité. Les STEP ne sont pas considérées comme productrices d'énergie de source renouvelable puisqu'elles Consomment de l'électricité pour remonter l'eau turbinée. Le rendement entre l'énergie produite et l'énergie consommée est de l'ordre de 70 à 80% [9] . Le fonctionnement de ce type de centrale se résumé au schéma ci-dessous

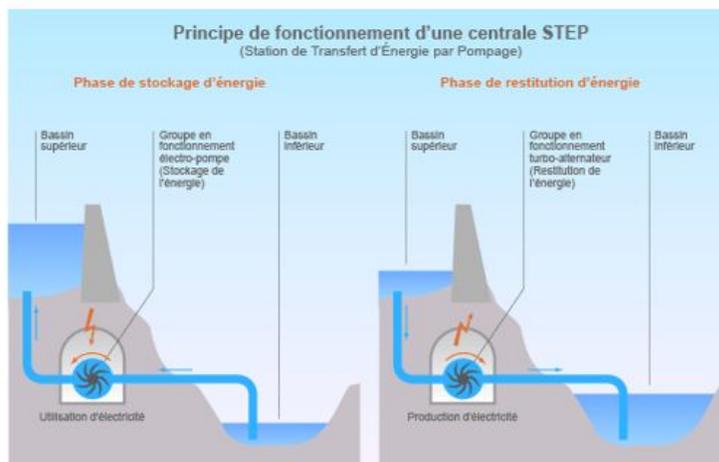


FIGURE 1.4 – Principe de fonctionnement d'une STEP (D'après Ackers et al. 1996).

1.3.3 Les centrales marémotrices

Ce sont des installations hydroélectriques qui exploitent le phénomène de montée et de descente périodique du niveau des eaux océaniques, provoquée par l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur la Terre. En effet, les flux et reflux d'eau sous l'action des marées, donc des forces gravitationnelles, peuvent en effet être utilisés indéfiniment pour actionner les turbines hydroélectriques et les maintenir dans leur mouvement de rotation [13]. Ainsi, une centrale marémotrice est une unité de production d'électricité qui exploite une source d'énergie renouvelable obtenue à partir de divers phénomènes.

1.3.3.1 A partir des marées

Le phénomène de marée est dû à la différence de temps de rotation entre la Terre (24 heures) et la Lune (28 jours) qui est donc relativement fixe par rapport à celle-ci. Il s'ensuit que le globe terrestre tourne à l'intérieur d'un globe d'eau de mer allongé dans les deux sens par l'attraction lunaire. On peut utiliser cette énergie de rotation, ce qui a pour effet (dans des proportions infimes, bien que définitives) de ralentir la Terre et d'éloigner la Lune pour des raisons de conservation du moment cinétique de l'ensemble. L'énergie dite marémotrice constitue donc une récupération du moment cinétique du couple Terre-Lune.

1.3.3.2. A partir des vagues

L'énergie des vagues est une énergie marine utilisant la puissance du mouvement des vagues. La faisabilité de son exploitation a été étudiée, en particulier en Angleterre : le système couplé à des dispositifs flottants ou des ballons déplacés par des vagues dans une structure en béton en forme d'entonnoir, produirait de l'électricité.

1.3.3.3 A partir des courants marins

Cette technologie est construite autour d'un dispositif appelé HYDROLIENNE. Une hydrolienne est une turbine sous-marine (ou subaquatique, ou posée sur l'eau et à demi-immergée) qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou des cours d'eau. Elle permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique par un alternateur.

1.4 Les éléments constituant une petite centrale hydroélectrique

On distingue deux importants types de travaux pour la réalisation d'une petite centrale Hydroélectrique : les ouvrages de génie civil et les équipements électriques et mécaniques.

1.4.1 Les ouvrages de génie civil

Les principaux ouvrages de génie civil d'une petite centrale hydroélectrique sont :

- le barrage de dérivation ;
- les conduites d'eau ;
- la centrale.

1.4.1.1 Le Barrage de dérivation

Il a pour rôle de diriger l'eau dans un canal, un tunnel, une conduite forcée ou une entrée de turbine. L'eau passe ensuite dans la turbine qu'elle fait tourner avec suffisamment de force pour créer de l'électricité dans une génératrice, après quoi elle retourne à la rivière via un canal de fuite. D'ordinaire, les petites centrales hydroélectriques construites pour alimenter une région isolée sont des installations au fil de l'eau, ce qui signifie que l'eau n'est pas stockée dans un réservoir et qu'elle est utilisée que lorsqu'elle est disponible. Le coût de gros barrages de retenue avec réservoir n'est normalement pas justifié pour les petits projets hydroélectriques et par conséquent, un simple barrage de dérivation de faible hauteur est utilisé. Ces ouvrages peuvent être en béton, en bois, en maçonnerie ou en une combinaison de ces matériaux. Des efforts importants continuent d'être déployés afin de diminuer le coût des barrages des petites centrales hydroélectriques puisque souvent les coûts des travaux de génie civil peuvent à eux seuls rendre le projet financièrement non viable.

Ainsi, l'on distingue plusieurs types de barrages à savoir :

a) Le barrage voûte

Le barrage voûte (figure 1.4) est un type de barrage à forme arquée dont la courbe permet de reporter les efforts dus à la poussée de l'eau sur chaque côté des rives plutôt que sur le barrage lui-même. Cette technique est inspirée des voûtes des cathédrales. Les barrages-voûtes sont essentiellement utilisés dans des vallées étroites disposant de versants rigides.

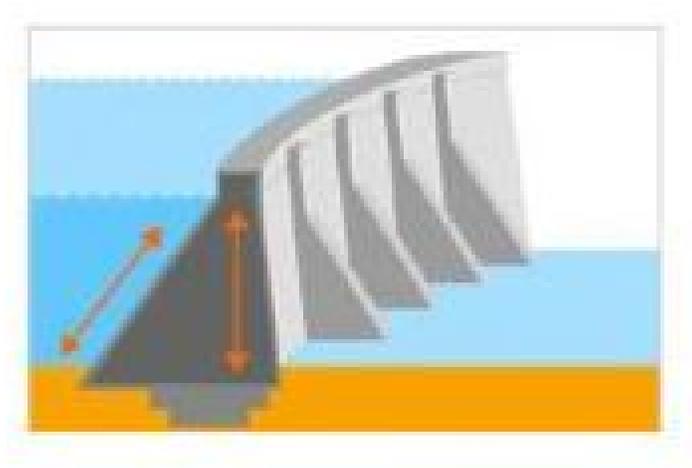


FIGURE 1.5 – Barrage voûte [14]

b) Le barrage à contreforts

Le barrage à contreforts (ou barrage à voûtes multiples) (figure 1.5) est un barrage qui s'appuie sur une série de voûtes qui permettent de transmettre la poussée de l'eau vers la fondation du barrage. Les barrages à contreforts sont utilisés lorsque les appuis sont trop distants, ou lorsque le matériau local est tellement compact qu'une extraction s'avère presque impossible, la technique du barrage à contreforts permet de réaliser un barrage à grande économie de matériaux.



FIGURE 1.6 – Barrage à contreforts [14]

c) Le barrage poids

Le barrage poids (figure 1.6) est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple (leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangle). Les

barrages poids sont privilégiés lorsque le rocher du site (vallée, rives) est suffisamment résistant et lorsque les conditions pour construire un barrage-voûte ne sont pas réunies.

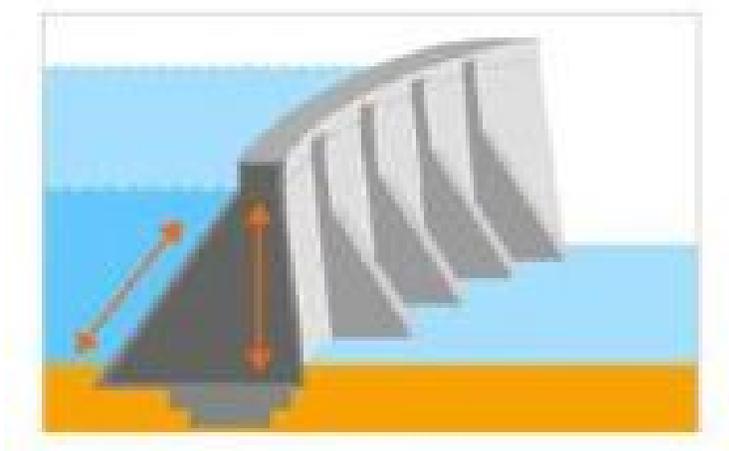


FIGURE 1.7 – Barrage poids [14]

d) Le barrage en remblais

Le barrage en remblais (figure 1.7) est un barrage constitué d'un matériau meuble, qu'il soit très fin ou très grossier (enrochements), ce qui le différencie du barrage poids. Les barrages en remblais regroupent plusieurs catégories, très différentes. Les différences proviennent des types de matériaux utilisés, et de la méthode employée pour assurer l'étanchéité.

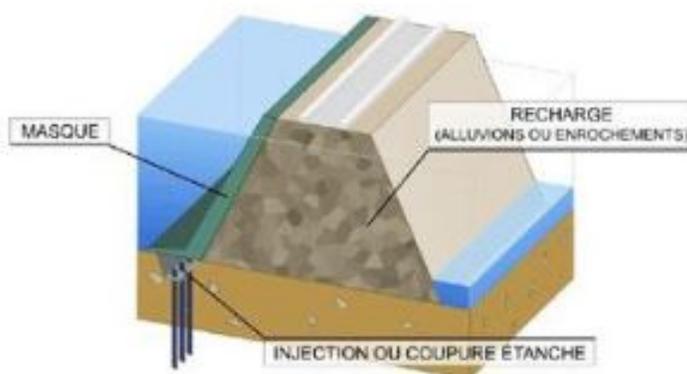


Figure 1.7 – Barrage en remblais [14]

FIGURE 1.8 – Barrage en remblais [14]

e) Le barrage mobile

Il est généralement édifié en aval du cours des rivières, de préférence à l'endroit où la pente est la plus faible. Ce barrage est le plus souvent utilisé pour la construction de ponts ou de futurs barrages afin de réguler le niveau de l'eau ; ce sont des barrages temporaires. Il existe

trois différents types de barrages mobiles : à battant à axe horizontal, à gravité, à clapets. La figure ci-dessous représente un barrage mobile à clapets.

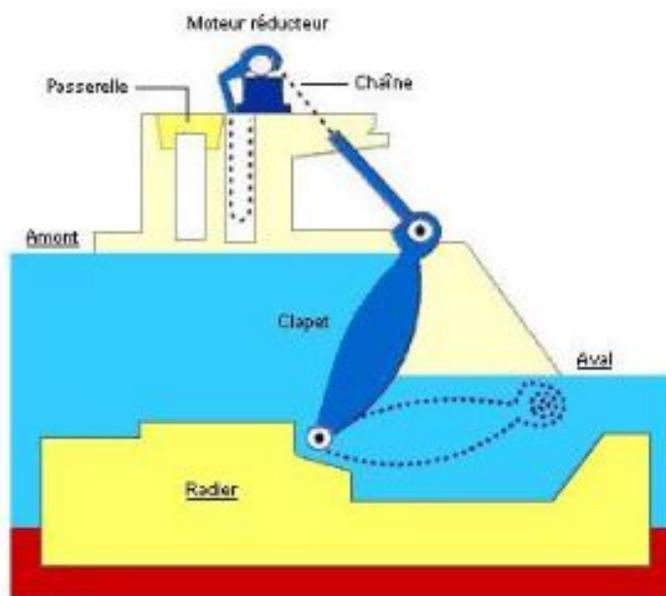


FIGURE 1.9 – Barrage mobile à clapets [14]

1.4.1.2 Les conduites

On distingue généralement, une entrée d'eau munie d'une grille crapaudine, d'une vanne et d'une entrée alimentant un canal, une conduite forcée ou directement la turbine selon le type de centrale.

- L'entrée est généralement en béton armé, la grille en acier et la vanne en bois ou en acier.
- Un canal, un tunnel et/ou une conduite forcée, qui amène l'eau jusqu'à la centrale, dans les installations où la centrale se trouve à une certaine distance en aval de l'entrée d'eau. Les canaux sont généralement excavés et suivent les contours du terrain. Les tunnels sont souterrains et creusés par forage et dynamitage ou à l'aide d'un tunnelier.
- Les conduites forcées, qui amènent l'eau sous pression, peuvent être en acier, en fer, en fibre de verre, en plastique ou en béton.
- L'entrée et la sortie de la turbine, qui incluent les soupapes et les vannes nécessaires pour arrêter l'arrivée d'eau lors de la fermeture et de l'entretien. Ces composants sont généralement en acier. Lorsqu'il faut avoir des vannes en aval de la turbine pour des travaux d'entretien, celles-ci peuvent être en bois.
- Un canal de fuite, qui transporte l'eau de la sortie de la turbine jusqu'à la rivière. Ce canal est aussi excavé.

1.4.1.3 La centrale

La centrale contient la ou les turbines et la plupart des équipements mécaniques et électriques. Les petites centrales hydroélectriques sont généralement d'une taille minimale tout en assurant une infrastructure avec un accès pour l'entretien et un niveau de sécurité adéquats. La centrale est construite en béton et autres matériaux locaux. Afin de limiter les coûts, il est souvent mis l'accent sur une conception simple, pratique et facile de construction et d'entretien.

1.4.2 Équipements électriques et mécaniques

Les principaux composants électriques et mécaniques d'une petite centrale sont la turbine et la génératrice qui peuvent être en plusieurs exemplaires. Différents types de turbines ont été conçues afin de s'adapter à tous les types de sites hydroélectriques se trouvant dans le monde. Les turbines utilisées dans les petites centrales sont des versions réduites de celles qui équipent les grandes centrales classiques.

1.4.2 .1 Les turbines

Une turbine est une machine tournante équipée de pales qui transforme l'énergie de l'eau en énergie mécanique. Deux catégories principales de turbines se distinguent :

- les turbines dites “à réaction” ;
- Les turbines dites “à action”.

a) Les turbines dites à réaction

Une turbine est dite “à réaction” lorsque la pression à l'entrée est supérieure à celle en sortie de la turbine. Elle se compose des éléments suivants :

- * Un **distributeur fixe** pour régler le débit et l'orientation du flux d'eau afin de lui permettre de placer les pales sous un angle adéquat et éviter des pertes importantes de rendement.
- * Une **roue mobile** munie de pales en forme de cuillère qui a pour rôle de transformer l'énergie hydraulique en un mouvement de rotation qui peut être exploité pour la production d'électricité.
- * Un **aspirateur-diffuseur** qui de par sa forme permet de récupérer une partie de l'énergie cinétique résiduelle en créant une dépression à la sortie de la roue.

Les principaux types de turbines à réaction sont les “Francis”, les “Kaplan” et les hélices. Elles sont utilisées dans les centrales à hauteur de chute faible ou moyenne.

• La turbine FRANCIS

Les centrales de moyenne chute sont équipées de turbine FRANCIS (figure1.10), L'eau arrive sur le pourtour de la roue et est évacuée axialement. Les directrices, sont des sortes de vannes, elles s'ouvrent plus ou moins. Elles permettent de faire varier la puissance du générateur en

réglant le débit de l'eau qui est dirigée sur les aubes afin de garantir le meilleur rendement. Ce type de turbine est installé pour les chutes d'eau de 40 à 400 mètres. Elles peuvent être verticales ou horizontales



FIGURE 1.10 – Turbine FRANCIS [7]

• La turbine KAPLAN

Les centrales de basse chute sont équipées de turbine à réaction de type KAPLAN (figure 1.11) avec pales orientables en fonction du débit. Les turbines Kaplan conviennent pour les centrales hydroélectriques situées sur les rivières dont la hauteur de chute d'eau peut être de moins de 60 mètres. Elles sont adaptées à un débit d'eau variable et la faible vitesse de rotation leur permet d'avoir un bon rendement. L'eau arrive par le pourtour ou le centre et est dirigée vers la roue en forme d'hélice de bateau dont l'orientation est variable.

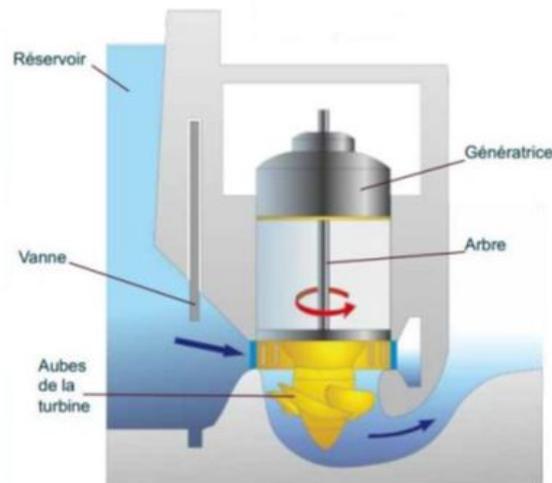


FIGURE 1.11 – Turbine KAPLAN [7]

b) Les turbines dites à action

Une turbine est dite “**à action**” lorsque les pressions à l'entrée et à la sortie de la roue sont égales. Elle se compose uniquement d'un distributeur et d'une roue mobile. Les principaux types

de turbines à action sont les turbines Pelton, Banki-Mitchell (cross flow). Elles sont utilisées pour les hautes chutes.

- **La turbine PELTON**

Les centrales de haute chute sont généralement équipées de turbines PELTON (figure 1.9), ou turbine à action. Les turbines Pelton sont composées d'augets fixés sur un arbre, elles peuvent avoir plusieurs roues sur le même axe ou plusieurs injecteurs, appelés aussi pointeaux ou aiguilles. Les turbines Pelton sont utilisées pour les chutes d'eau dépassant 400 mètres. A l'ouverture de l'injecteur, l'eau est orientée sur les augets ce qui provoque la rotation de la turbine. Les augets sont doubles avec une arête centrale, l'eau arrive sur cette arête et est dirigée dans les augets



FIGURE 1.12 – Turbine PELTON [7]

- **La turbine Banki-Mitchell ou cross-flow**

C'est une turbine à flux traversant. Elle est utilisée pour une large gamme de dénivellations (de 5 à 200m) couvrant les domaines de Kaplan, Francis et Pelton. L'écoulement traverse une roue constituée de deux flasques réunies entre elles par une couronne d'aubes disposées de façon cylindrique.



FIGURE 1.13 – Turbine Banki-Mitchell (cross-flow) [2]

1.4.2.2 Les génératrices

Dans les petites centrales hydroélectriques à vitesse fixe, deux grands types de génératrices sont utilisés : synchrones ou à induction (asynchrones). Les génératrices à induction d'une capacité inférieure à environ 500 kW sont généralement préférées pour les petites centrales hydroélectriques qui fournissent l'électricité à un important réseau de distribution existant [15]. Les autres composants mécaniques et électriques d'une petite centrale hydroélectrique sont les suivants :

- multiplicateur de vitesse pour faire tourner la génératrice à sa vitesse de rotation idéale à partir de la vitesse de rotation de la turbine (au besoin) ;
- vanne(s) d'isolement de l'eau pour la ou les turbines ;
- système de contrôle hydraulique pour les turbines et les soupapes ;
- système électrique de protection et de contrôle ;
- système de télécommunication ;
- systèmes d'alarme incendie et de sécurité (au besoin)
- connexion à un réseau de distribution ou plus rarement de transport.

De façon globale, l'on peut retenir qu'une petite centrale hydroélectrique est composée de quatre éléments principaux :

- les ouvrages de prise d'eau (digues, barrages) ;
- les ouvrages d'amenée et de mise en charge (canal d'amenée, conduite forcée) ;
- les équipements de production (turbines, générateurs, systèmes de régulation) ;
- les ouvrages de restitution.

1.5 Principe de production de l'énergie électrique dans les centrales hydroélectriques

Une centrale hydroélectrique utilise la force hydraulique d'une chute d'eau qui permet d'actionner une turbine dont le mouvement est transféré à un alternateur qui produit de l'électricité. Ainsi, la première fonction du barrage est de retenir une importante quantité d'eau dont la principale raison est de produire de l'électricité. Pour cela il suffit d'ouvrir les vannes pour que l'eau s'engouffre dans un canal pour être par la suite dirigée vers une centrale hydraulique qui est située en contre-bas pour augmenter la hauteur de la chute. La hauteur de la chute se mesure entre la surface d'eau libre en amont de la prise d'eau et l'axe de la turbine. A la sortie de la conduite, la pression et/ou la vitesse entraîne la rotation d'une turbine qui est reliée à un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. L'énergie produite dépend de la puissance de l'eau qui dépend du débit et de la hauteur de la chute. L'eau est ensuite relâchée pour reprendre le cours normal de la rivière. La tension du courant produit par une centrale peut atteindre 13 800 volts. Grâce à un transformateur élévateur de tension situé dans le poste de départ d'une centrale, l'électricité est transportée à des tensions beaucoup plus élevées, allant

de 44 000 à 765 000 volts. Dans les petits réseaux isolés avec des distances relativement courtes, élever vers la moyenne tension est souvent suffisante pour la transmission. D'habitude, la ligne de transmission se termine à un point central dans le village. Là, la tension est transformée par un transformateur abaisseur en courant à basse tension de nouveau et la ligne de distribution permettra la connexion à des maisons et aux petites installations industrielles.

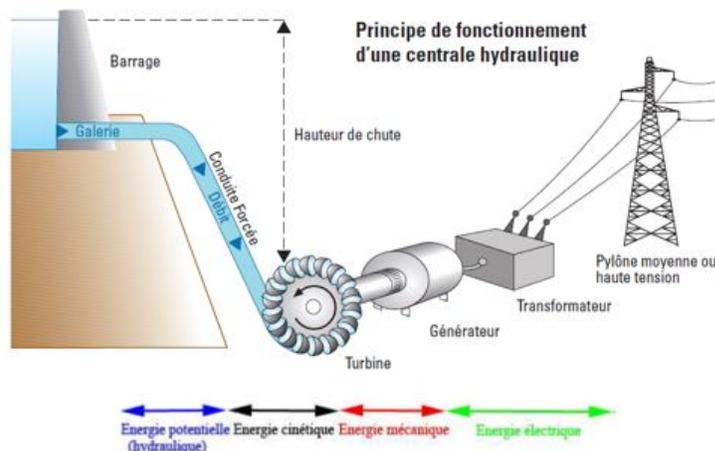


FIGURE 1.14 – Schéma d'une centrale hydroélectrique [2]

Pour produire de l'électricité on utilise l'énergie cinétique de l'eau. L'énergie cinétique provient de la force de gravitation (la force de gravitation dépend de la hauteur de la chute de l'eau). L'énergie cinétique provient de l'énergie potentielle, c'est lorsque l'eau descend des conduites que l'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique. Au niveau de la centrale presque toute l'énergie potentielle est transformée.

• Maintenance des centrales hydroélectriques

Bien que les micros centrales ne requièrent que peu de maintenance, celle-ci ne doit surtout pas être négligée. Elle doit être effectuée par des techniciens compétents, ayant reçu une formation conséquente lors de la mise en œuvre du projet. En dehors des opérations d'entretiens spécifiques aux turbines qui sont détaillées dans leur fiche, la maintenance courante d'une micro-centrale hydraulique doit comporter :

- * Le nettoyage du canal d'aménage d'eau, ainsi que du bassin de mise en charge. Toutes les grilles présentes sur le parcours de l'eau doivent être vérifiées afin d'éviter leurs obstruction, notamment au niveau de la crépine de la conduite forcée.
- * Le nettoyage du dessaleur ou des bassins de décantation qui permettent d'éliminer les déchets susceptibles d'endommager la turbine.
- * Un stock de pièce de rechange doit être constitué afin de palier de manière rapide et efficace à une rupture du matériel. Un ensemble de joints, de vannes, de roulements étanches et d'aubes de remplacement est le strict minimum pour assurer une maintenance correcte.

Normalement, un aménagement hydroélectrique est conçu pour durer de 50 à 60 ans. En

effectuant la maintenance régulière de l'équipement, il est possible de prolonger la vie utile d'un barrage ou d'une centrale. Mais après un certain temps, l'entretien ne suffit plus, il faut donner une nouvelle vie aux installations. Il est parfois plus économique de moderniser une centrale que d'en construire une nouvelle, comme c'est le cas avec la centrale de Beauharnois situé au sud-ouest de Montréal. Par contre, à certaines occasions, il peut être plus avantageux de recommencer à neuf [16].

• Projets hydroélectriques et développement durable

Un projet hydroélectrique doit être conçu dans le respect des trois critères du développement durable à savoir [12].

- Le projet doit être rentable à la lumière des conditions du marché ;
- Le projet doit être acceptable du point de vue environnemental, conformément aux principes du développement durable ;
- Le projet doit être accueilli favorablement par les communautés locales.

L'avantage principal de l'hydroélectricité est qu'il s'agit probablement de la plus ancienne technologie et très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables permettant de produire de l'électricité depuis plus de 100 ans. De ce fait, elle bénéficie d'un long savoir-faire. En outre, elle présente d'autres avantages :

- L'hydroélectricité fait partie des énergies renouvelables et non polluantes : pas de dégagement de gaz à effet de serre, ni de production de déchets toxique. En effet, l'analyse de son cycle de vie complet montre qu'elle émet très peu de gaz à effet de serre (GES), soit 100 fois moins de GES qu'une centrale au charbon. Cette faible production des GES fait de l'hydroélectricité un excellent moyen de lutter contre le changement climatique tout en favorisant le développement durable ;
- Le coût de production de l'hydroélectricité est indépendant des variations des cours des combustibles fossiles. Il s'agit donc d'investissement à faible risque ;
- Les risques d'accident (rupture de barrage) sont très faibles, grâce à un contrôle continu des ouvrages.

1.6 Les étapes d'un projet d'aménagement d'une petite centrale hydroélectrique

Le projet définitif d'une implantation d'une centrale hydroélectrique résulte d'un processus complexe et itératif, dans lequel l'accent est mis sur l'impact environnemental et sur les différentes options technologiques ; celles sont comparées sur le plan économique. Ainsi, il est important d'en décrire les étapes essentielles avant de décider si l'une ou l'autre doit être soumise à une étude approfondie en vue de sa réalisation. Ces étapes sont les suivantes [9] :

- Topographie et géomorphologie du site ;

- Évaluation de la ressource en eau et du potentiel énergétique ;
- Sélection du site et définition de l'aménagement de base ;
- Turbines, génératrices, contrôle commande de l'installation, etc.
- Évaluation des impacts sur environnement et des mesures de compensation ;
- Évaluation économique du projet et de besoins de financement ;
- Cadre institutionnel et procédures administratives pour obtenir les autorisations.

Ces différentes étapes permettent d'élaborer un plan de projet.

• Le dossier d'avant-projet sommaire

Il a pour objectif de fournir dans un premier temps la position du barrage sur le cours d'eau, le type d'ouvrage et ensuite de proposer un certain nombre de variantes pour chaque équipement probable du site (dimensionnement plus précis et spécifications précise des ouvrages pour chaque variante). Une variante sera définie en fonction de plusieurs paramètres (le coût des différents équipements, leur rendement etc. . .).

• Le dossier d'avant-projet détaillé

Pour chaque ouvrage et équipement on ressortira ici de manière détaillée en fonction de la variante choisie les notes de calculs ayant motivées ce choix, le dimensionnement, les plans de chaque équipement et pièce et enfin les plans complets de la centrale.

Le dossier d'exécution

Connaissant les données du terrain, le dossier d'exécution contiendra les métrés (détail estimatif des coûts des différents éléments du projet), le planning d'exécution des travaux, les spécifications des différents matériaux.

1.7 Le contexte réglementaire

La mise en œuvre d'une PCH peut être envisagée selon différents aspects :

- Production d'énergie ;
- Impact sur la qualité de l'eau, la flore et la faune de la rivière, et de tous les autres aspects environnementaux ;
- Raccordement au réseau ;
- Propriétés foncières ;
- etc.

Les différents aspects sont sous la responsabilité des différentes autorités en charge des domaines su cités et de leur implication dans le développement des sources d'énergie renouvelables.

1.7.1 Les procédures environnementales

Depuis 1970, l'intégration environnementale est devenue un élément important dans des projets de PCH et par conséquent la protection de l'environnement est incluse dans des lois en vigueur dans des nombreux pays [9]. Au Cameroun, une étude d'impact environnementale est préalable à la réalisation de tout projet. Cette étude est encadrée par le décret n°2005/0577/PM signé en 2005.

• Évaluation de l'impact environnemental et social (EIES)

Cette analyse scientifique et technique réalise un inventaire de la situation actuelle et évalue les conséquences résultant de la mise en œuvre d'un projet. Elle a pour but de limiter, d'atténuer ou compenser les impacts négatifs. Les domaines prises en compte sont la flore, la faune, les paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, l'environnement naturel et les équilibres biologiques, la protection des biens et du patrimoine culturel, le confort du voisinage (bruit, vibrations, odeurs, luminosité), l'hygiène, la sécurité, la salubrité publique et la santé.

C'est une synthèse des différentes expertises environnementales réalisées sur le site :

- Expertise hydro biologique ;
- Choix du débit réservé ;
- Analyse du paysage ;
- etc.

Au Cameroun l'EIE doit être réalisée par un bureau d'étude agréé par le MINEP. Par ailleurs, le contrôle du contenu et de la pertinence de l'étude d'impact est en général effectué par les services instructeurs des administrations de l'État (MINEP).

Au demeurant, une étude d'impact a trois principaux objectifs [9] :

- Protection de l'environnement ;
- Informations aux autorités publiques et au public ;
- Aide à la décision.

1.7.2 Réglementation du secteur de l'hydroélectricité au Cameroun

1.7.2.1 Régime juridique des activités du secteur de l'électricité

L'exercice des activités dans le secteur de l'électricité est soumis à l'un des régimes juridiques suivants [17].

- la concession ;
- la licence ;
- l'autorisation ;
- la déclaration ;
- la liberté.

L'administration chargée de l'électricité (MINEE) accorde les concessions et les licences tandis que l'Agence de Régulation du Secteur de l'Electricité (ARSEL) est compétente dans tous les autres cas prévus (l'autorisation, la déclaration, la liberté).

Par ailleurs, d'après les dispositions de l'article 13 de ladite Loi, les activités suivantes sont soumises au régime de la concession (sauf disposition contraire de cette loi) :

- stockage d'eau établi sur le domaine public, pour la production d'électricité ;
- production notamment hydroélectrique, établie sur le domaine public ;
- gestion du réseau de transport ;
- transport d'électricité ;
- distribution d'électricité.

1.7.2.2 L'électrification rurale

Il en ressort des dispositions des articles 58 et 59 de loi su cité que :

- L'État assure la promotion et le développement de l'électrification rurale sur l'ensemble du territoire national.
- Les autorités locales participent, en tant que de besoin, à la mise en œuvre de, la politique d'électrification rurale dans les conditions fixées par voie réglementaire.
- L'électrification rurale se fait soit par raccordement aux réseaux interconnectés, soit par production décentralisée.
- Dans le cadre de l'électrification rurale décentralisée, et compte tenu des contraintes liées à la protection de l'environnement, la priorité est donnée à la production décentralisée à partir des sources d'énergies renouvelables, sauf en cas de carence, de coûts prohibitifs ou d'insuffisance de celles-ci.

1.8 Position du problème

1.8.1 Cartographie énergétique du Cameroun

La production nationale est principalement assurée par les centrales hydroélectriques (76%) et thermiques (24%) du concessionnaire du service public Eneo (The Energy of Cameroon). Par ailleurs, le Cameroun dispose en outre de trois barrages de retenue des eaux que sont : Mapé, Mbakaou et Bamendjin avec une retenue totale de 7 600 millions de mètres cubes

En 2010, la puissance totale installée était d'environ 928 MW, dont 723 MW pour les trois centrales hydrauliques et 205 MW pour les 39 centrales thermiques. Elle était estimée à 1 291 MW en 2013[22].

De nos jours, avec la mise en eau partielle du barrage de Lom Pangar ; la puissance totale installée se situe entre 1177 MW et 2406 MW. Au demeurant, le tableau qui suit donne une idée sommaire de moyens de production d'électricité au Cameroun.

Réseau	hydroélectricité (puissance instantanée)	production thermique	barrage de retenue des eaux
réseau interconnecté SUD	- Edéa : 365MW - Songloulou : 396MW	- limbé : 85 MW - Bassa : 22 MW - Bafoussam : 18 MW - Mefou : 2MW - Oyomabang : 41 MW -Ebolowa : 2.2 MW	- Mbakou : 2.6 milliards de m^3 - Bamendjin : 1.8 milliard m^3 - Mape 3.2 milliards de m^3
réseau interconnecté NORD	Lagdo : 72MW	- Djamboutou : 20 MW - Kousseri : 3 MW Autres installations : 1.5 MW	
autres installations thermiques		- Bertoua : 30MW - Autres installations : 4.15 MW	
total	733 MW	270 MW	7.6 milliards de m^3

TABLE 1.1 – Cartographique énergétique du Cameroun [18]

Il ressort de ce tableau que la source d'énergie hydraulique est prépondérante dans la production électrique du Cameroun. Ainsi, la production d'électricité est fortement dominée par les centrales hydroélectriques qui représentent 76% de la production au détriment des centrales thermiques qui détiennent 24.

1.8.2 Problématique

Bien que disposant du second potentiel hydroélectrique (55,2 GW) d'Afrique (après la RDC), avec un potentiel technique de 20 GW, la production d'électricité du Cameroun se situe en dessous de 650 MW, soit près de 50% de la capacité installée. Cette production est très en dessous de la demande nationale : à peine 50% de la population camerounaise a accès à l'électricité [18]. En 2013 la Proportion des ménages ayant accès à l'électricité était estimée à 41% (79% urbains et 21% rural).

De ce fait, le Cameroun est contraint, depuis 2000, de rationner sa distribution d'électricité. Pourtant, l'accès à l'électricité est considéré comme un bien social : il favorise l'éducation et l'alphabétisation, il contribue à l'amélioration de la santé grâce à la conservation des aliments et la réfrigération des médicaments, et il accroît les capacités de communication, de loisirs et d'information. Ainsi, l'un des problèmes qui doit être résolu pour la réalisation du scénario de l'émergence du Cameroun en 2035 est le manque d'énergie électrique qui empêche l'ajout des valeurs, non seulement pour les populations vivants dans des grandes villes et des industries qui sont implantées, mais aussi et surtout pour des innombrables petites communautés et villages isolés à l'intérieur du pays. En effet, sur les 13014 localités (recensement général 2007), on enregistré que 2700 localités électrifiées en 2013. Ainsi, plus de 10500 localités restent encore non

électrifiées [5]. Fort de ce constat, il est urgent de mettre en valeur l'important potentiel énergétique sous exploité aussi bien en hydroélectricité qu'en d'autres ressources d'énergies moins polluantes. D'où la nécessité d'envisager l'éolienne, les biocarburants, l'hydrolienne, les marées et surtout les micros barrages dans des zones éloignées des couloirs de transport énergétique.

Ainsi, ce travail s'inscrit dans le cadre du développement des petits projets d'hydroélectricité pour l'électrification de telles zones. Notons que plusieurs études dont l'exploitation nous a permis d'enrichir cette revue de littérature ont été réalisées au sein du laboratoire de Physique appliquée de L'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé allant dans le même sens, ces dernières années. L'on peut citer entre autres :

- Contribution à la réalisation d'une mini-centrale hydroélectrique dans l'arrondissement de MFOU [17];
- Contribution à l'étude de la mise en place d'une microcentrale hydroélectrique dans l'arrondissement de SA'A [18];
- Contribution à la réalisation d'une microcentrale hydroélectrique dans l'arrondissement d'OBALA [19].

Ces différentes études ont montré que l'on peut développer la petite hydroélectricité dans plusieurs villes Camerounaises pour une production décentralisée d'énergie électrique.

Conclusion

Ce premier chapitre, servant de revue de littérature aux travaux qui seront détaillés par la suite ressort clairement l'ampleur du déficit énergétique observé au Cameroun. Par ailleurs, il permet d'avoir une vision élargie mais non exhaustive de possibilités de développement des micro-centrales hydroélectriques (MCH) pour combler ce déficit. Afin de pallier à cette situation, nous avons opté pour l'étude de faisabilité de la mise en place des micro-centrales hydroélectriques (MCH) dans les arrondissements dotés d'un site potentiel pour leur implantation. Ainsi, le présent projet vise à promouvoir la production décentralisée d'énergie pour pouvoir améliorer la couverture électrique des populations de la région du centre en générale, et celles de la zone rurale de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er} en particulier ; à travers l'étude de la faisabilité pour la mise en place d'une future micro-centrale hydroélectrique dans ladite zone.

Dans le chapitre suivant, nous inventerions les matériels et les méthodes nécessaires pour l'atteinte de notre objectif.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Introduction

Pour créer une micro-centrale hydroélectrique, il est important de disposer de certaines données fondamentales nécessaires pour l'exploitation d'un tronçon de rivière ou d'un site spécifique. Ainsi, les informations les plus importantes qui doivent être disponibles sont la situation générale et la topographie du site, le débit disponible dans la rivière pendant toute l'année et la hauteur de chute exploitable. Par ailleurs, il est utile d'essayer d'estimer la fourniture en courant électrique nécessaire pour tous les ménages, les installations d'infrastructures publiques, ateliers, etc. De ce fait, le présent chapitre vise l'évaluation voire la connaissance de ces différents paramètres et des grandeurs caractéristiques permettant d'évaluer l'importance d'un aménagement hydroélectrique.

2.2 Présentation de la section d'étude

2.2.1 Historique institutionnel de la commune

La Commune de Yaoundé 1^{er} a vu le jour suite au décret N°87/1365 du 25 septembre 1987 portant création de la communauté urbaine de Yaoundé. Toutefois, il convient de préciser que l'actuelle Commune d'Arrondissement de Yaoundé 1 a connu plusieurs mutations : d'abord identifier sous l'appellation de Commune de Yaoundé 1 à sa création d'après le décret su cité, Ensuite, Commune Urbaine de Yaoundé 1 suite au décret N°93/321 du 25 novembre 1993, portant création des Communes Urbaines et Rurales et, aujourd'hui Commune d'Arrondissement de Yaoundé 1 (CAY 1) ; après son éclatement qui a vu naître à ses côtés la Commune d'Arrondissement de Yaoundé 5^e. Aujourd'hui, la Commune d'Arrondissement de Yaoundé 1 est l'une des sept Communes d'Arrondissement que compte la ville de Yaoundé, capitale politique du Cameroun. Elle couvre une superficie de 5552 hectares. Cette commune qui abrite le siège de nombreuses institutions publiques, parapubliques et représentations diplomatiques entre autres bénéficie de nombreuses spécificités territoriales et administratives qui lui permettent de se hisser au rang des plus grandes Communes d'Arrondissement du Cameroun.

2.2.1.1 Limites et localisation

La commune d'arrondissement de Yaoundé 1^{er} est située dans la région du Centre, département du MFOUNDI. Son chef-lieu est fixé A DJOUNGOLO (NLONKAK). Elle couvre une superficie de 5552 hectares pour une population de 281.574 habitants soit une densité d'environ 50.715, 778habitants/ Km^2 [39]. Cette commune d'arrondissement est subdivisée en deux zone : Une zone urbaine réellement urbanisée et une zone rurale en pleine urbanisation. Les limites de la commune urbaine d'arrondissement de Yaoundé Ier, dont le siège est situé à NLONGKAK I, sont déterminées comme suit :

- au Nord par la Commune d'OKOLA (village LENDOM),
- au Sud par l'arrondissement de Yaoundé IV^e (notamment le ruisseau EWOE) ;
- au Sud-ouest par l'arrondissement de Yaoundé II^e (notamment la rivière MFOUNDI et le boulevard du 20 mai et,) ;
- à l'ouest par l'arrondissement de Yaoundé II^e (carrefour WARDA nouvelle route Bastos-la pénétrante de la Présidence de la république) ;
- à l'Est et au Nord-est par l'arrondissement de SOA (notamment les villages TSINGA et OLEMBE II).

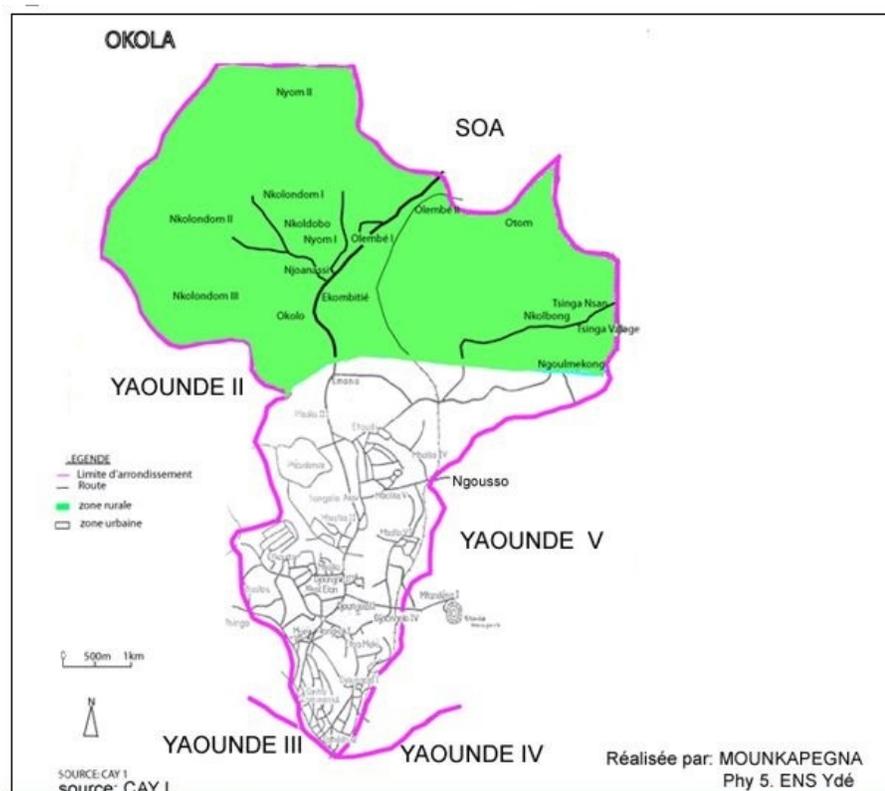


FIGURE 2.1 – Limite et localisation de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er} [19]

2.2.1.3 Administration et Répartition géopolitique

La CAY 1 est placée sous le contrôle du sous-préfet de l'arrondissement de Yaoundé 1¹. Elle a à sa tête un Maire assisté de cinq adjoints, choisis dans un Conseil Municipal de quarante-un (41) membres. Elle compte trente-deux (32) quartiers et villages repartis en cinq (5) zones principales pour 30 chefferies de 3e degré et un chef de 2e degré. Cette répartition zonale est la suivante :

zone	qualification	quartiers
zone I	RURALE	LENDOM, NKOLONDON, NYOM, OLEMBE, EKOMBITIE, OKOLO (I, II, III)
zone II	CENTRALE	OKOLO I, EMANA, ETOUDI, MBALLA (II, III, IV), DRAGAGE
zone III	MANGUIER	MBALLA (IV, V, VI, VII), TSINGA VILLAGE, NKOLMBONG, NKOLMITAG.
zone IV	PILOTE	DJOUNGOLO (II, III, IV), EKOUDOU BASTOS, MFANDENA.
zone V	PILOTE	DJOUNGOLO I, ETOA MEKI, Le Centre Commercial

TABLE 2.1 – Répartition géopolitique de CAY 1 [19]

⊗ Cette division a une origine politique et est fonctionnelle depuis 1997

2.2.2 Milieu humain

2.2.2.1 Données démographiques

Aujourd'hui, la population de la CAY 1^{er} est évaluée à plus de 361 000 habitants selon le dernier recensement général des populations réalisé par le BUCREP en 2005 et sur la base du taux de progression démographique en milieu urbain au Cameroun oscillant entre 10% et 20%. Les statistiques par sexe évaluent à 131 086 habitants pour le sexe masculin et 128 836 pour le sexe féminin ; ce qui conduit à un rapport de masculinité de 101,01%.

2.2.2.2 Groupes ethniques et relations inter-ethniques

La population de la commune est essentiellement hétéroclite. En effet, les populations autochtones s'y sont installées depuis les années 1900. Mais de façon globale, on y retrouve : les ETOUDI, les TSINGA, les BA'ABA, NDONG, les BAKOKO et autres qui constituent les autochtones tandis que les Eton, les Bamiléké, les Bassas, les Haoussa et les expatriés résidents du quartier diplomatiques Bastos) et une kyrielle d'autres tribus font parties des allogènes. Les populations (Bétis) restent majoritaires. Toutes ces ethnies cohabitent en toute harmonie.

2.2.3 Milieu physique et naturel

2.2.3.1 Climat

La commune de Yaoundé 1^{er} fait partie de la Ville de Yaoundé qui elle-même est soumise à un climat de type équatorial (dit). Bien qu'instable à cause du réchauffement climatique, le

climat est caractérisé par deux saisons sèches alternant aux deux saisons de pluie. Ainsi on y distingue :

- Une grande saison sèche, allant de mi-novembre à mi-mars ;
- Une petite saison de pluie allant de mi-mars à mi-juin ;
- Une petite saison sèche allant de mi-juin à août ;
- Une grande saison de pluie allant de septembre à mi-novembre

Les saisons de pluies sont caractérisées par de fortes pluies souvent concentrées dans le temps. Qualifiée de bimodale, la pluviosité de Yaoundé enregistre en moyenne 1747 mm de précipitation par an. Les températures varient de 18°C à 28°C en saisons humides et de 16°C à 31°C en saison sèche [20]. On enregistre ainsi une température moyenne de $23,5^{\circ}\text{C}$ avec des précipitations d'une hauteur allant de 23 à près de 300 mm par an.

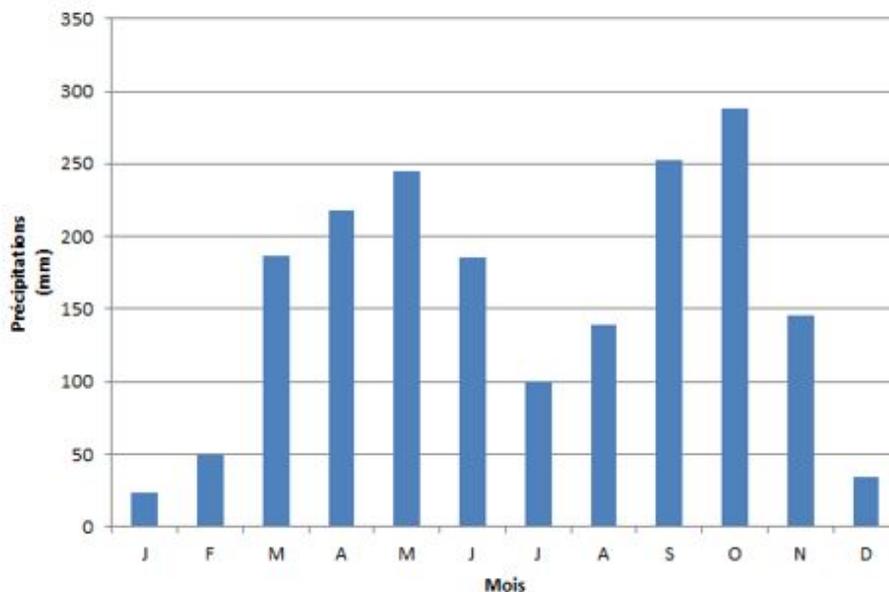
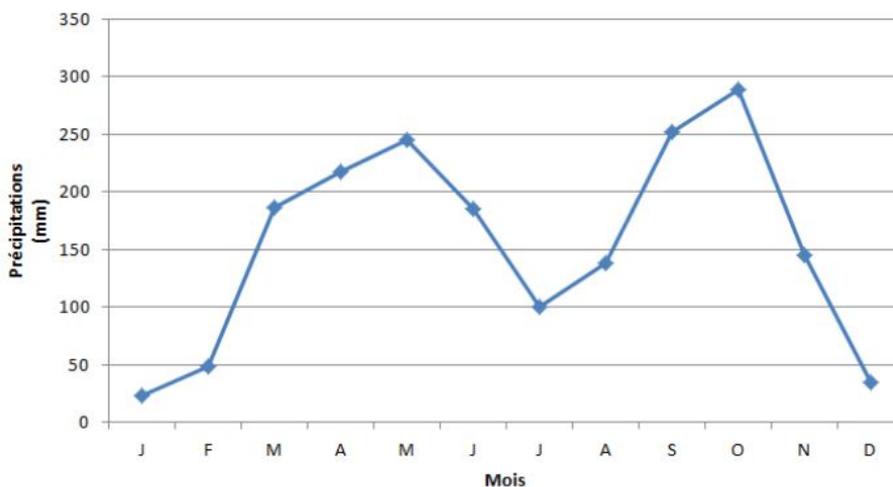
L'hygrométrie moyenne est de 80% et varie dans la journée entre 35 et 98%. Par ailleurs Les vents fréquents sont humides et soufflent en direction du Sud-Ouest (carrefour WARDA nouvelle route Bastos) ; les vents violents sont souvent orientés vers le Nord-Ouest (quartiers NYOM II et NKOLONDON).

Au demeurant, les précipitations moyennes de la ville de Yaoundé de 2005 à 2015 sont données par le tableau ci-après.

ANNÉES	MOIS												TOTAL
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2005	0,9	30,7	260	133,3	176,2	276,1	35,4	27	185,7	251,8	48,5	73,7	1499,3
2006	24,2	32,6	147,8	230,6	188,7	185,7	46,4	25,3	138,8	259,2	101,8	5,2	1386,3
2007	0	3,8	49,9	224,1	261,1	275,5	149,3	175	432,5	231,2	193,1	68,2	2063,7
2008	0,8	7,1	266,8	257,3	198,9	241,1	76,5	93,7	241,2	272,2	45,2	76	1776,8
2009	62,3	54,6	104,6	205	309,4	90,9	97,1	184,3	169,3	279,5	98,1	0	1655,1
2010	4,5	68,7	215,9	212,8	251,4	142,8	73,7	130,3	149,1	362	230,6	7,2	1849
2011	8,9	201,4	114	238,4	380,1	157,2	78,1	192,8	254,9	182,5	108,3	0	1916,6
2012	26,3	10,2	156,2	224,1	240,4	172,7	96,9	131	262,4	379,2	210,5	11,2	1921,1
2013	47,7	68,4	232,6	251,8	190,2	152,4	210,9	198,2	353,2	274,8	202,1	116,1	2298,4
2014	30,1	33,9	279,1	210,9	277,6	176,4	118,2	168,8	291,1	321,6	243,3	22,7	2173,7
2015	47,5	26,2	221,6	204	215,6	168,9	123,4	197,2	297,8	361,1	116,8	0	1980,1
Moyenne	23,0	48,9	186,2	217,5	244,5	185,4	100,5	138,5	252,4	288,6	145,3	34,6	1865,4

TABLE 2.2 – Précipitations mensuelles (en mm) de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er} de 2005 à 2015 [21]

À partir de la table 2.2, nous pouvons construire le diagramme des précipitations mensuelles moyennes (Figure 2.2) et l'évolution des précipitations mensuelles moyennes (Figure 2.3) de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er} à l'aide du logiciel Excel.

FIGURE 2.2 – Diagramme des précipitations mensuelles moyennes de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er}FIGURE 2.3 – Évolution des précipitations mensuelles moyennes de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er}

Au vu de ces différents diagrammes, nous constatons que les moyennes mensuelles des précipitations de 2005 à 2015 sont très faibles en décembre, Janvier et Février qui, correspondent à la période de la grande saison sèche. Ainsi le micro-centrale hydroélectrique fonctionnera de façon optimale de mars à novembre (neuf mois) Nous choisissons donc de faire fonctionner la centrale de Mars à Novembre (neuf mois) ; c'est-à-dire pendant 270 jours en moyenne

2.2.3.2 Végétation

L'arrondissement de Yaoundé 1^{er} est constitué de deux zones : urbaine et rurale. La végétation est du type intertropical avec prédominance de la forêt humide méridionale. Les différents quartiers, disséminés de manière anarchique, laissent une place importante à la végétation dans

les bas-fonds. Se situant comme les autres communes de Yaoundé dans la zone de transition savane (au Nord) et forêt (au Sud), la végétation est de type transition arbustive. La zone agricole (Nyom, Nkolondom), exclusivement maraîchère, est une ceinture verte et un modèle type d'agriculture périurbaine. L'exploitation des bas-fonds de Nkolondom et Nyom ont commencé avec la destruction de la végétation initiale constituée de raphia, de sous-sols marécageux pour la production de légumes-feuilles traditionnels [22]. Cependant, avec l'urbanisation et l'anthropisation du milieu, on a affaire actuellement à : reliques de forêts sur les montagnes (quartiers ruraux et semi-ruraux Nkolondom et Nyom entre autres); forêt galerie/graminées dans les vallées (le long des ruisseaux et rivières Mfoundi, Ewoé et Nsas); Arbres fruitiers dans tous les quartiers ruraux et certains quartiers urbains à mesure que l'on s'écarte de la zone fortement urbanisée [22]. Ainsi, la végétation à Yaoundé 1^{er} offre encore un paysage naturel dans les zones rurales où il fait bon vivre et dont la préservation doit être encouragée dans le respect des plans d'aménagement.

2.2.3.3 Sol

Le sol de la CAY 1, tout comme les sols des autres commune de la ville de Yaoundé est en effet un sol rouge latéritique et forestier classique, horizon rouge plus ou moins superficiellement lessivé qui peut atteindre dans les conditions favorables une profondeur de 4 à 10 mètres, puis, horizon gravillonnaire, horizon tacheté et horizon d'altération de la roche-mère [23]. Outre les zones marécageuses, ce sol s'avère chimiquement pauvre, mais peut cependant supporter de riches cultures en zone semi-rurale, s'il est enrichi ou tant qu'un couvert forestier significatif le protège de l'érosion [23].

2.2.3.4 Le relief

La morphologie du relief épouse celle de la ville de Yaoundé avec des collines et des vallées souvent traversées par des cours d'eau. L'arrondissement de Yaoundé 1 se développe dans un site collinaire, sur un plateau qui varie entre 700 et 800 mètres d'altitude, couronné de massifs montagneux aux formes arrondies culminant entre 1000 et 1300 mètres. Cela crée un paysage très contrasté, essentiellement marqué par trois unités morphologiques qui se partagent la ville : les sommets d'interfluves, les pentes et les fonds de vallées inondables [24]. Les hauts reliefs forment une ligne qui cerne la ville dans sa partie Nord-Ouest et Ouest. Ils sont formés de mornes rocheux dont l'altitude varie entre 900 et 1300 mètres, et supplantent à l'Est un plateau de piémont façonné en interfluves par les rivières Mfoundi et Ako'o [25]. L'arrondissement de Yaoundé 1^{er} a donc suivi pendant longtemps un développement orienté du Nord-Ouest (Nkolodom, Nyom, Olembé) vers l'Est et le Sud.

2.3 Hydrographie et choix du cours d'eau

2.3.1 Hydrographie

L'arrondissement de Yaoundé 1^{er} est inclus dans la ville de Yaoundé; qui est située dans une zone d'interfluve du plateau sud-camerounais, entre la Sanaga et le Nyong. Le principal cours d'eau présent dans cet arrondissement est le Mfoundi, qui, prend sa source sur les flancs du mont Fébé, et coule d'abord d'Ouest en Est suivant le relief. Avec ses premiers affluents, le Mfoundi a découpé, au Nord-Ouest une première série de collines d'altitude parfois supérieure à 800 mètres où sont campés les quartiers Bastos, Oliga, Ntougou, etc. Grossi du Tongolo et du Ntem (affluents) venus du Nord, le Mfoundi se dirige vers le Sud, et "ses affluents ont dessiné des collines de forme oblongue orientées *N.O – S.E.* sur sa droite et *N.E. – S.O.* sur sa gauche, toutes convergentes vers cette axe nord-sud qui constitue en quelque sorte l'épine dorsale de la ville" [23]. En plus du Tongolo et du Ntem, parmi les affluents du Mfoundi, on peut citer l'Ekooza, l'Abiergue, le Mingoa, le Djoungolo.

Au demeurant, Bien que la carte hydrographique de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er} soit très dense, l'on peut retenir qu'il ne comporte que trois grands cours d'eau (figure 2.4), parmi lesquels le NSAS principal cours d'eau de la zone rurale de cet arrondissement.

En effet, le NSAS prend sa source aux pieds du mont NKOLODOM et traverse les localités de NKOLONDOM et NYOM II.

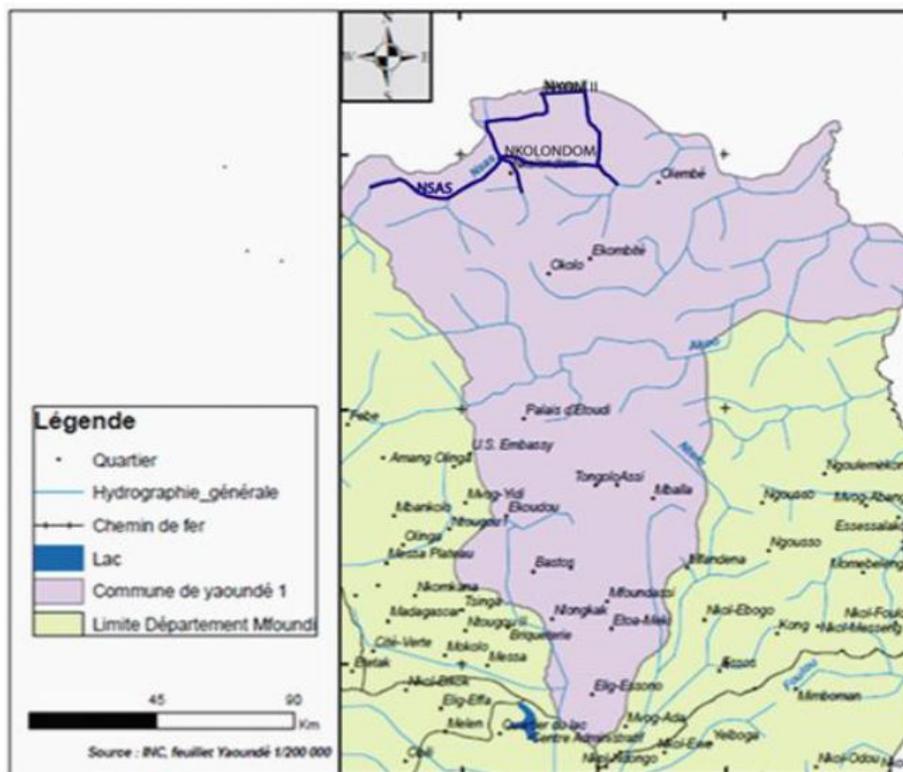


FIGURE 2.4 – Carte hydrographique de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er} [26]

Au vu des positions géostratégiques de la plus part des zones traversées par ce bassin versant,

une quelconque implantation d'une micro-centrale dans la zone urbaine de cet arrondissement aurait d'énormes impacts environnementaux. Pour cette raison, nos investigations ont été orientées dans la zone rurale de cet arrondissement

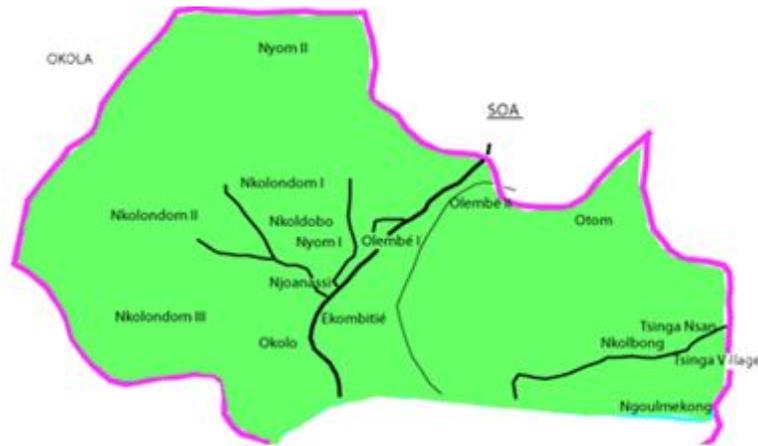


FIGURE 2.5 – zone rurale de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er}

D'après nos prospections, deux sites potentiels traversés par le NSAS sont exploitables pour une implantation d'une micro-centrale hydroélectrique. Ils sont situés dans les localités de NKOLONDON I et de NYOM II. En effet, en utilisant les techniques des mesure des débits et de chute hydrique que nous développerons dans les prochains paragraphes, les deux sites susmentionnés présentent les caractéristiques suivantes.

▷ Site de NKOLONDON I



FIGURE 2.6 – Site de NKOLONDON I

Site potentiel	Dénivellation (m)	Débit moyen disponible (m^3/s)	Besoin énergétique minimal de la localité(KWH/an)	Observations
NKOLONDON I	5	0.15	27200	accès difficile faible débit, dénivellation faible cours d'eau pérenne.

TABLE 2.3 – Caractéristiques du site potentiel de NKOLONDON I

▷ Site de NYOM II



FIGURE 2.7 – Site de NYOM II

Site potentiel	Dénivellation (m)	Débit moyen disponible (m^3/s)	Besoin énergétique minimal de la localité(KWH/an)	Observations
NYOM II	18.5	0.44	13296	accès facile, bon débit,cours d'eau pérenne,propice à l'ins- tallation d'une micro- centrale hydroélectrique .

TABLE 2.4 – Caractéristiques du site potentiel de NYOM II

2.3.2 Choix du site d'implantation

Les informations les plus importantes qui doivent être disponibles sont la situation générale et la topographie du site, le débit disponible dans la rivière pendant toute l'année et la hauteur de chute exploitable. En plus il est important de connaître le besoin énergétique des éventuels consommateurs d'électricité. Ainsi, la table 2.4 éclaire notre lanterne à ce sujet et nous conduit à choisir le site du village NYOM II comme potentiel site pour l'implantation d'une microcentrale hydroélectrique.



FIGURE 2.8 – Plan d'eau amont du site retenue



FIGURE 2.9 – Position géographique du site probable (NYOM II)

2.4 Évaluation de la demande d'électricité de la localité de NYOM II

Pour l'évaluer la demande d'électricité de cette localité, nous sommes partis des principes suivants :

- Hypothèse de base ;
- Estimation de besoin.

• Hypothèse de base

L'évaluation des besoins suit le Principe de la satisfaction de la demande actuelle et future des consommateurs. Pour cela, en ce qui concerne le village de NYOM II, nous partons des hypothèses suivantes :

- Nombre d'habitants en 2005 [27]
- Taux annuel de croissance sur la ville de Yaoundé [27] :3% ;
- Nombre d'habitants estimé en 2016 : 2147
- Nombre de personnes par ménage [27] : 4,5
- Nombre de ménages : 478 ;
- Puissance fixée installée par ménage : 4kW
- Nombre d'artisans PME : 10% des ménages, soit 48 ;
- Puissance fixée pour un artisan PME : 5kW
- Besoins des structures publiques et d'utilité publique : 50kW ;
- Éclairage public : 40kW ;
- Autres besoins : 50kW

• Estimation des Besoins

Cette estimation est faite à partir de la formule suivante :

$$P = \sum P_i \quad (2.1)$$

Où

$$P_i = K_i C_i \quad (2.2)$$

Avec :

- P puissance totale demandée (kw) ;
- P_i puissance unitaire demandée (kw) ;
- k_i puissance installée en kw (en fonction des consommateurs) ;
- c_i facteur de composition.

2.4.1 Estimation des besoins des ménages

La puissance installée par ménage est fixée à 4 :

$$P_1 = K_1 C_1 \quad (2.3)$$

Avec $K_1 = 478 \times 4$ et $C_1 = 0.182$

2.4.2 Estimation des besoins des PME

Elle est donnée par la relation :

$$P_2 = K_2 C_2 \quad (2.4)$$

Avec $K_2 = 478 \times 5$ et $C_2 = 0.273$

2.4.3 Estimation des besoins des structures publiques et d'utilités publiques et autres

Nous considérons ces besoins comme suit :

- Structures publiques et d'utilités publiques : 50kw ;
- Éclairage public : 40kw ;
- Autres : 50kw .

D'où :

$$P_3 = 140KW \quad (2.5)$$

2.4.4 Puissance totale demandée :

$$P_{TOT} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (2.6)$$

2.4.5 Prévision de la consommation

Pour faire face à la demande supplémentaire d'énergie de suite du développement qui s'en suivra, la détermination du taux de croissance de la demande s'avère indispensable. Ce taux est donné par la relation :

$$e = \left(1 + \frac{P}{100}\right)^t \quad (2.7)$$

Avec :

- e : taux de charge ;
- P : Taux de croissance de la population. Pour l'arrondissement de Yaoundé 1^{er}, on a $P = 3\%$; ;
- t : temps d'estimation des charges futures,

D'où la puissance électrique prévisionnelle de la localité de NYOM II pour "t" année est obtenue par la relation :

$$P_p = P_{TOT} \times (1 + 0.03)^t \quad (2.8)$$

2.5 Typologie et techniques de mesure du débit

2.5.1 Typologie de débit

Le débit liquide Q d'un cours d'eau, volume d'eau qui s'écoule en une seconde dans une section transversale, est le produit :

* de la section mouillée S, produit de la profondeur moyenne Hm par la largeur superficielle L ;

* de la vitesse moyenne d'écoulement U, intégrale des vitesses des particules d'eau dans toute la section mouillée.

$$Q = L \times H_m \times U \quad (2.9)$$

Les unités utilisées le plus couramment sont :

- * le mètre cube par seconde ($m^3.s^{-1}$) pour le débit, que l'on exprime avec trois chiffres significatifs étant donné qu'il n'est jamais mesuré dans les lits naturels avec une précision supérieure à 3% ;
- * le mètre (m) pour les distances horizontales et verticales, pour lesquelles la précision maximale espérée est de 1% ;
- * le mètre par seconde ($m.s^{-1}$) pour la vitesse moyenne d'écoulement, que l'on exprimera avec 2 chiffres significatifs après la virgule (précision du cm), même si l'on utilise toujours trois chiffres décimaux pour les vitesses ponctuelles.

2.5.1.1 Débits instantanés

Le débit est une donnée fondamentale du projet d'une microcentrale, il conditionne la puissance et sa rentabilité. Ainsi, la connaissance de la quantité d'eau disponible pour l'implantation d'une microcentrale hydroélectrique est primordiale. Elle s'obtient par la mesure des débits instantanés ; en général, une mesure par jour pendant au moins une année. Mais ces mesures de terrain ne peuvent être réalisées sur des durées suffisamment longues. Elles doivent plutôt être envisagées comme un complément aux autres données collectées : débits au niveau des stations de jaugeage, pluviométrie, etc. La figure ci-après présente un exemple de courbes des débits instantanés.

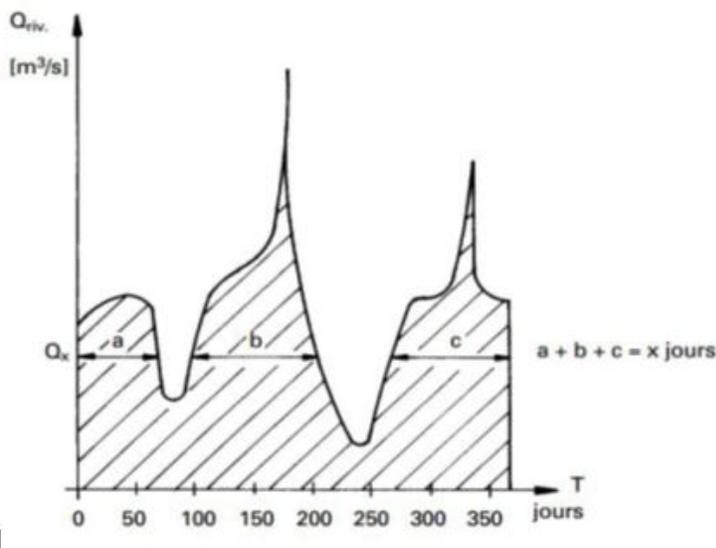


FIGURE 2.10 – Exemple de courbe chronologique des débits mesurés [28]

2.5.1.2 Débits classés

La courbe des débits classés est la courbe donnant l'historique des débits moyens quotidiens d'un site, classés en fonction du pourcentage du temps où le débit est supérieur ou égal à ce débit. La courbe de débits classés permet d'évaluer la régularité du débit d'un site et, par conséquent, d'évaluer à la fois la puissance et la quantité d'énergie qu'un site hydroélectrique

permettra de garantir. La courbe des débits classés (figure 2.6) montre le nombre de jours pendant lesquels un débit donné est atteint ou dépassé sur une année.

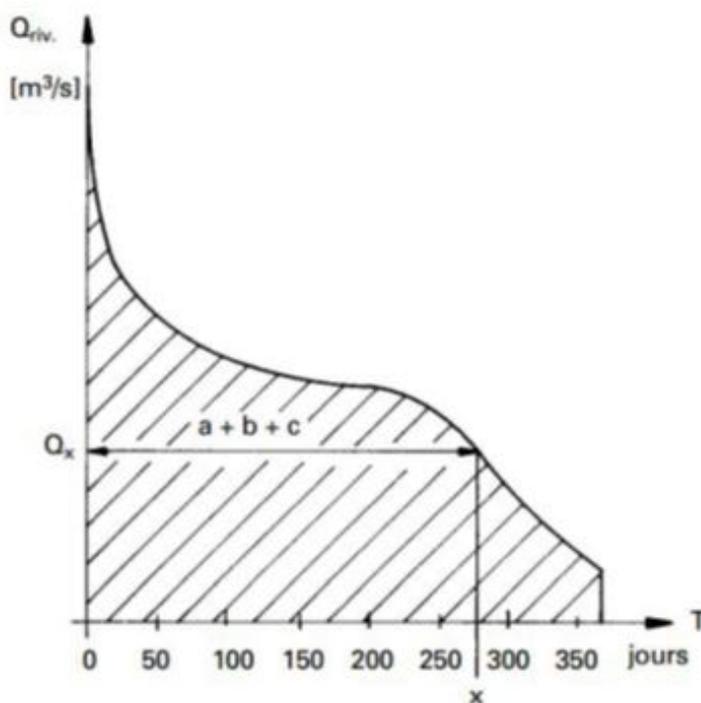


FIGURE 2.11 – Exemple de Courbe des débits classés calculée à partir de la courbe chronologique [28]

Q_x est le débit qui est atteint ou dépassé pendant X jours par année. L'aire sous les courbes des figures 2.9 et 2.10 est identique et représente la quantité totale d'eau s'écoulant dans le cours d'eau. La surface hachurée des courbes correspond à l'énergie hydraulique disponible. Cette courbe peut être établie année par année ou pour plusieurs années, avec, en abscisses, le nombre de jours de l'année, et en ordonnées, les débits. La représentation graphique de ces débits classés sur plusieurs années donne une courbe décroissante rappelant une hyperbole. De l'allure de la courbe des débits classés dépendra la puissance installée. Cette courbe des débits classés permet notamment d'apprécier la régularité du cours d'eau.

2.5.1.3 Débits caractéristiques

Nous distinguons trois types [28] :

- **Le débit de restitution**

Le débit de restitution Q_{res} ou débit résiduel minimal est le débit maintenu dans le lit de la rivière après un barrage de dérivation ou une prise d'eau. Dans le cadre de la protection des eaux, la question des débits résiduels a une signification particulière. Le tronçon de rivière compris entre le barrage et la réintroduction de l'eau dérivée est appelé **tronçon à débit résiduel**. Si le **débit minimum légal** n'est pas respecté, un débit de dotation doit être réinjecté dans le lit

de la rivière. Les débits minima sont exigés pour tenir compte des autres formes d'utilisation du cours d'eau.

- **Le débit de turbinage**

Le débit de turbinage Q_t utilisé pour le dimensionnement est le débit mesuré sur la rivière Q_{riv} auquel on soustrait le débit réservé (ou le débit de restitution) Q_{res} .

$$Q_t = Q_{riv} - Q_{rest} \quad (2.10)$$

- **Le débit nominal**

Le débit nominal Q_n est le débit maximum utilisable par la turbine pour fonctionner. Il sert de base pour le dimensionnement des composants de la petite centrale, à l'exception de la prise d'eau qui doit être conçue en fonction des crues.

- **Choix du débit nominal**

En vue d'une rentabilité maximale, il est justifié d'utiliser la plus grande quantité d'eau possible. Cependant, le débit nominal ne correspond que rarement à la quantité d'eau effectivement à disposition :

- Un débit minimum doit être maintenu en permanence dans le lit de la rivière (débit résiduel) entre la prise d'eau et la sortie du canal de fuite de la centrale (protection de la faune et de la flore). La restitution de l'eau dans ce but est appelée devoir de dotation ;

- Il faut encore déduire du débit à disposition la part non exploitable des crues, l'eau utilisée pour éliminer les dépôts de débris et sédiments dans la prise d'eau et le canal (purge) ainsi que les fuites. Le débit nominal sera choisi après avoir soustrait les diverses pertes susmentionnées de la courbe des débits mesurés. Ces différents débits sont indiqués sur les illustrations de la figure 2.11.

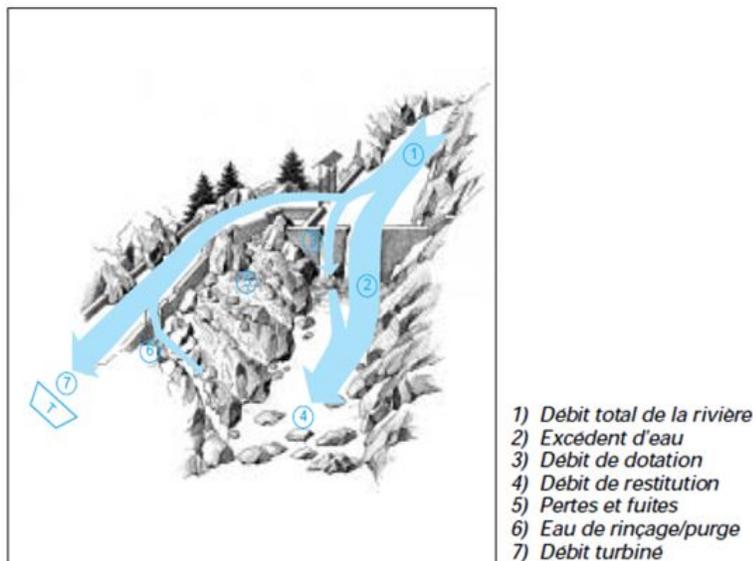


FIGURE 2.12 – Illustration de la définition des débits de restitution et de dotation [29]

2.5.2 Techniques de mesure des débits d'un cours d'eau

On appelle hydrométrie l'ensemble des techniques de mesures des différents paramètres caractérisant les écoulements dans les cours d'eau naturels ou artificiel et dans les conduites.

• Les méthodes de jaugeage

On appelle **jaugeage** l'ensemble des opérations destinées à mesurer le débit d'une rivière ; en un lieu et un temps donné.

Les méthodes de jaugeage des débits des rivières sont nombreuses et variées. Certaines d'entre elles sont très peu utilisées, d'autres le sont très souvent. On distingue :

- les méthodes globales, dans lesquelles Q est mesuré directement (méthode volumétrique, seuils jaugeurs, dilution chimique, électromagnétisme) ;
- les méthodes complètes, dans lesquelles les trois composantes H_m , L , U sont mesurées séparément (essentiellement moulinet hydrométrique) ;
- les méthodes incomplètes, dans lesquelles le champ des vitesses est exploré de façon partielle (ultrasons, bateau mobile, flotteurs) [30] .

Dans le cadre ce travail, nous avons choisi la méthode “d'exploration du champ de vitesse” pour la mesure des débits des cours d'eau. Pour ce faire, nous utiliserons deux techniques pour sa mise en œuvre. Il s'agit de :

- L'effet Venturi ;
- La méthode *float* ou de section.

Le débit retenu sera obtenu en faisant la moyenne des valeurs obtenues par les deux techniques.

2.5.2.1 Méthode d'exploration du champ des vitesses

C'est une méthode conventionnelle pour des rivières moyennes à grandes. Celle-ci se base sur la section transversale de la rivière et la vitesse moyenne de l'eau passant à travers celle-ci. Une section appropriée du cours d'eau à jauger doit être sélectionnée sur un tronçon relativement droit, présentant un écoulement calme. Pour que la mesure soit valide, la section choisie doit avoir une largeur uniforme, bien définie et délimitée.

a) Effet de Venturi

L'effet venturi exploite les phénomènes de pertes de charges et de dénivellation dans les systèmes hydrauliques permettant ainsi la mesure de certaines grandeurs caractéristiques des écoulements. Nous l'avons exploité dans ce travail à l'aide de certains matériels, pour mesurer le débit du cours d'eau (NSAS).

▷ Matériels utilisés

Un ensemble de matériel a été utilisé sur le terrain pour réaliser ces mesures avec cette technique. Il s'agit plus spécifiquement :

- D'un tube de Venturi fabriqué par nous ;
- Un GPS de marque GARMIN qui a permis de relever les coordonnées géographiques des sites et nous a aussi servi de chronomètre ;
- Deux tiges en bois pour jauger le niveau d'eau dans les deux tubes ;
- Un marqueur indélébile pour estampiller le niveau d'eau sur les tiges en bois ;
- Un mètre ruban pour mesurer la dénivellation dans les deux tubes.



FIGURE 2.13 – Matériels de mise en œuvre de l'effet de Venturi

Le venturi (figure 2.14) exploite deux pertes de charges linéaires et une perte de charge singulières à travers un rétrécissement brusque d'angle droit [31] .

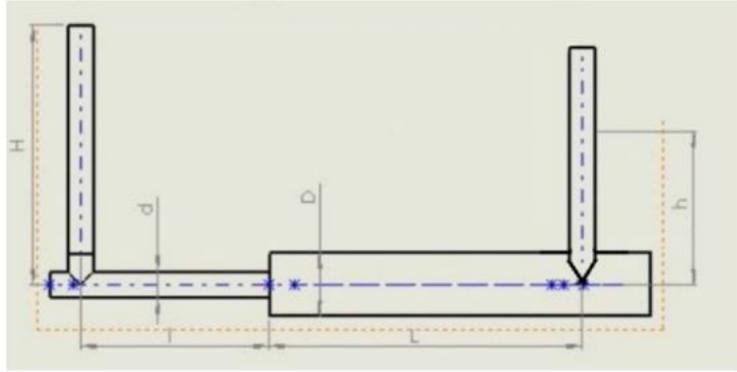


FIGURE 2.14 – Dessin de définition



FIGURE 2.15 – Mise en œuvre de l'effet Venturi

Ce qui nous permet en appliquant le théorème de Bernoulli pour les fluides incompressibles d'avoir la relation 2.10 du débit :

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2g(H - h - \Delta h_s - \Delta h_l)}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \quad (2.11)$$

b) La méthode Float ou méthode de section

La mesure du débit est donnée de la vitesse moyenne du passage de l'eau sur une coupe transversale moyenne (A), pour une longueur connue de ruisseau (L), où l'on va chronométrer le temps nécessaire à un flotteur pour parcourir une longueur mesurée ($L = 10 \dots 20m$). Cette mesure est à répéter plusieurs fois, puis calculer ensuite le temps moyen.

Le flotteur pourrait être une bouteille plastique remplie d'eau de façon que celle-ci plonge 2/3 de son hauteur. Ladite bouteille sera plongée dans l'eau en amont de la partie choisie. En multipliant la zone de coupe transversale avec la vitesse moyenne du débit, on peut désormais obtenir une estimation du taux de débit. Pour tous les cas ; il faut appliquer une marge d'erreur $\pm 20\%$.

• Matériels utilisés

Pour appliquer cette méthode, nous avons eu recours à certains matériels .Il s'agit plus spécifiquement :

- De dix (10) bouteilles plastiques remplies au 2/3 que nous avons utilisées comme flotteur ;
- D'un chronomètre ;
- D'un décimètre pour délimiter notre section.
- D'une tige en bois graduée pour mesurer la profondeur du cours d'eau dans les différentes positions ($P_1, P_2, P_3 \dots$) des diverses sections (par exemple la section initiale et la finale).

Il faudra aussi calculer la **profondeur moyenne (p)** ; comme l'illustre la (figure 2.16) ci-dessous.

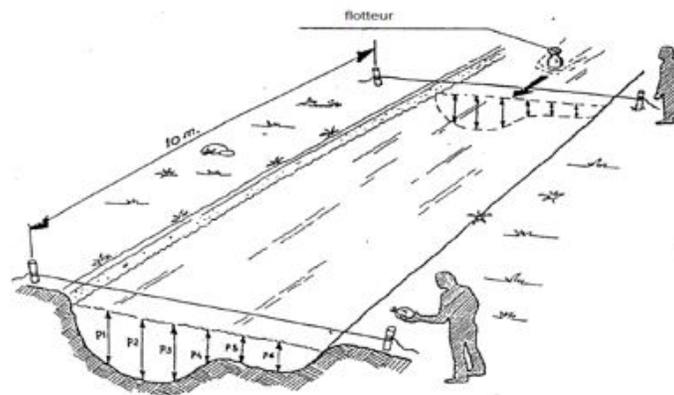


FIGURE 2.16 – Méthode Float ou méthode de section du cours d'eau [32]



FIGURE 2.17 – Mise en œuvre de la méthode Float

Ainsi, le débit sera calculé en utilisant la relation (2.11) :

$$Q = 0,8XVXA \quad (2.12)$$

Notons par ailleurs que A représente la section moyenne :

$$A = p \times L \quad (2.13)$$

Où :

- 0,8 représente le facteur de correction de la vitesse V du flotteur ;
- (m^3/s).

2.6 Typologie et techniques de calcul des hauteurs de chute

2.6.1 Évaluation de la dénivellation (chute brute)

La dénivellation, appelée également chute brute (H_b) ; correspond à la différence d'altitude entre les plans d'eau amont (supérieur) et aval (inférieur) de l'aménagement envisagé.

Sur le terrain, les mesures de dénivellation sont habituellement réalisées en utilisant des techniques de topographie. Cependant, nous avons utilisés le relevé du GPS (Global Positioning Systems) qui est par ailleurs de plus en plus pratiqué.

2.6.2 Hauteur de chute nette

La hauteur de chute nette (H_n) est la différence entre la hauteur de chute brute et les hauteurs dues aux pertes de charges. La chute nette permet de calculer, avec le débit, la puissance hydraulique qui entre dans la turbine et qui sera transformée par celle-ci.

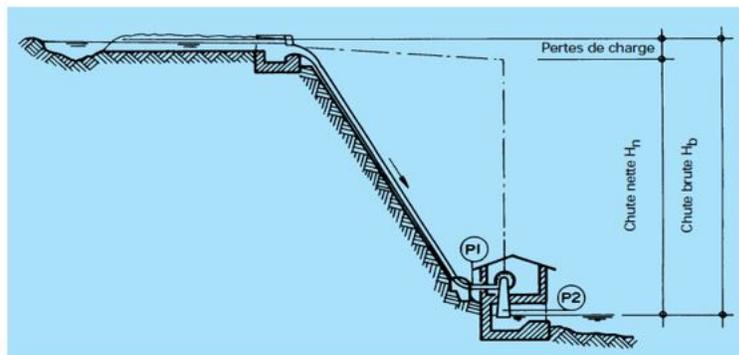


FIGURE 2.18 – Illustration de la Hauteur de chute brute et nette d'une petite centrale à conduite forcée.

Ainsi, la hauteur de chute nette est donnée par la relation :

$$H_n = H_b - \Delta h \quad (2.14)$$

Où

$$\Delta h = \Delta h_l + \Delta h_s \quad (2.15)$$



FIGURE 2.19 – Dénivellations du NSAS à NYOM II

2.7 Estimation de la puissance

On distingue habituellement :

- la puissance maximale brute qui exprime la puissance potentielle de l'aménagement :

$$P_b = \rho \times g \times H \times Q_m \quad (2.16)$$

- la puissance installée qui représente la puissance effective de l'aménagement ou puissance extraite par la turbine :

$$P_{el} = \eta \times \rho \times g \times H \times Q_m \quad (2.17)$$

Où :

- ρ = Densité de l'eau (kg/m^3);
- g = accélération gravitationnelle terrestre : ($9,81m/s^2$);
- H = hauteur de chute nette :(m);
- Q_m = Débit annuel moyen :(l/s);
- η = rendement de l'ensemble turbine-générateur, lequel varie principalement entre 0,6 et 0,9 selon la puissance.

Au demeurant, La puissance moyenne d'une petite centrale projetée sur un site donné peut être calculée avec la formule suivante :

$$P_{el} = \frac{7 \times Q_m \times H_n}{1000} \quad (2.18)$$

Cette formule tient compte des pertes et du rendement (les pertes dans la conduite forcée, la turbine, la boîte de vitesses, le groupe générateur et la transmission de l'électricité) qui réduisent la puissance électrique définitive de 20...30% d'environ.

Cela signifie que seuls 70% de la puissance maximale brute sont disponibles.

2.8 Perte de charge

Il est important de connaître la perte de charge dans la conduite forcée, car elle influence la puissance que la turbine pourra générer. Elle s'obtient généralement à partir de l'équation de l'énergie de Bernoulli.

▷ **Équation d'énergie de Bernoulli :**

$$\left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_{entree} = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_{sortie} + h_{friction} + h_{turbine} \quad (2.19)$$

Où :

- P = pression (Pa) ;
- V = vitesse (m/s) ;
- Z = hauteur (m) ;
- $h_{friction}$ = perte de charge dans le tuyau (m)
- $h_{turbine}$ = hauteur de tête de la turbine (m)

La perte de charge dans le tuyau :

$$h_{friction} = f \frac{LV^2}{2 \times d \times g} \quad (2.20)$$

Où :

- f = facteur de friction ;
- L = longueur de la conduite (m) ;
- V = vitesse (m/s) ;
- d = diamètre de la conduite (m) ;
- g = accélération gravitationnelle terrestre : $9,81 m/s^2$.

Le facteur de friction :

$$f = \left[\frac{1}{-1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} \right) \times 1,11 \right]} \right]^2 \quad (2.21)$$

Où :

- ε : Rugosité
- Re : nombre de Reynold, avec $Re = \frac{Vd}{\nu}$

Où :

- V : Vitesse moyenne d'écoulement à travers la section considérée en (m/s) ;
- d : Diamètre de la conduite ou largeur de la veine fluide en (m).
- ν : viscosité cinématique du fluide (m^2/s)

La vitesse moyenne dans la conduite est :

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.22)$$

Où :

- A : Aire de la section du tuyau (m^2)
- Q : débit dans la conduite (m^3/s)

▷ **Pertes de charges dans la mise en œuvre de l'effet Venturi**

Dans la mise en œuvre de l'effet venturi, nous avons distingués :

- **La perte de charge singulière**, qui est dues à la présence de singularités dans le circuit hydraulique et dont la formule est :

$$\Delta h_s = \zeta \rho \frac{V^2}{2} \frac{d^4}{D^4} \quad (2.23)$$

Où :

- ζ : le coefficient de pertes de charges singulières ;
- ρ : densité de l'eau (kg/m^3) ;

- **La Perte de charge linéaire**, qui est due aux frottements des particules liquides sur les parois du tuyau. Elle a pour expression :

$$\Delta h_l = \frac{V^2}{2g} \left(\Lambda_1 L \frac{d^4}{D^4} + \Lambda_2 \frac{l}{d} \right) \quad (2.24)$$

Où Λ_1 et Λ_2 sont les coefficients de pertes de charge linéaires respectivement dans les tronçons 1 et 2 du venturi. Ils sont fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité des canalisations. Le tableau suivant donne un aperçu de différentes valeurs de la rugosité des canalisations :

Nature de la paroi	Rugosité uniforme équivalente k (mm)
Tuyau étiré en verre, cuivre, laiton	< 0,001
Tuyau industriel en laiton	0,025
Tuyau en acier laminé :	
– neuf	0,05
– rouillé	0,15 à 0,25
– incrusté	1,5 à 3
– bitumé intérieurement	0,015
Tuyau en acier soudé :	
– neuf	0,03 à 0,1
– rouillé	0,4
Tuyau en fer galvanisé	0,15 à 0,20
Tuyau en fonte usuelle moulée :	
– neuf	0,25
– rouillé	1 à 1,5
– bitumé intérieurement	0,1
Tuyau quelconque, fortement incrusté ...	jusqu'à 3
Tuyau en ciment :	
– lisse	0,3 à 0,8
– brut	jusqu'à 3
Tuyau en acier riveté	0,9 à 9
Planches non rabotées	1 à 2,5
Pierre de taille	8 à 15
Galerie brute de percement	90 à 600

FIGURE 2.20 – Rugosité des canalisations [33]

L'abaque ci-dessous permet la lecture du coefficient de perte de charges en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité des canalisations :

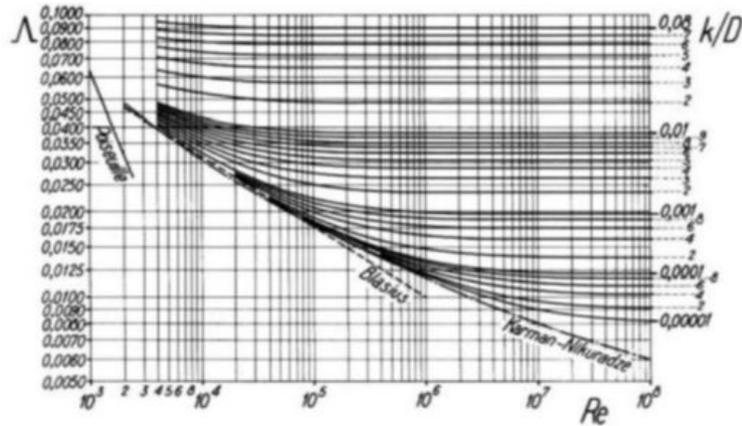


FIGURE 2.21 – Coefficient de pertes de charges linéaires [33]

2.9 Dimensionnement des principaux éléments de l'installation

2.9.1 Les transformateurs

[9]Connaissant la puissance en sortie de la centrale et le rendement des transformateurs, on peut choisir ces derniers grâce à la formule 2.16 :

$$P_{transf} = \frac{P_{centrale}}{\eta_{transf}} \quad (2.25)$$

Les générateurs produisent un courant sous des tensions qui ne sont pas celles du réseau de livraison et il est indispensable de séparer les tensions de l'usine de celles du réseau. Un transformateur est donc indispensable, son rapport de transformation sera tel que la haute tension sera celle du réseau(en général 20 kV).

2.9.2 L'alternateur

[9]Connaissant la puissance des transformateurs et le rendement de l'alternateur, on peut trouver la puissance à mettre à son entrée par la formule suivante :

$$P_{alt} = \frac{P_{transf}}{\eta_{alt}} \quad (2.26)$$

Selon les cas, on peut utiliser :

- Une génératrice asynchrone ;
- Un alternateur (qui fonctionne au synchronisme grâce à son rotor qui fournit l'énergie réactive nécessaire)

Au demeurant, deux grands types de génératrices sont utilisés dans les petites centrales hydro-électriques à vitesse fixe : synchrones ou à induction (asynchrones). Généralement, les génératrices asynchrones sont réservées aux faibles puissances (< 200kW)

2.9.3 Choix de la turbine

[9] La puissance à mettre en entrée de l'alternateur et le rendement de turbinage étant connus, nous pouvons trouver la puissance hydraulique permettant de produire l'énergie électrique de la centrale en appliquant la formule 2.17, on obtient :

$$P_{hyd} = \frac{P_{alt}}{\eta_{turb}} \quad (2.27)$$

Ainsi, la puissance hydraulique et la puissance électrique sont liées par la relation :

$$P_{hyd} = \frac{P_{centrale}}{\eta_{turb}\eta_{alt}\eta_{transf}} \quad (2.28)$$

Ayant la puissance hydraulique de la centrale, nous aussi obtenir sa hauteur de chute nette en utilisant la formule :

$$H_n = \frac{P_{hyd}}{Q_t \rho g} \quad (2.29)$$

Avec :

- H_n : hauteur de chute nette en (m) ;
- Q_t : débit turbiné en (m^3/s) ;
- ρ : masse volumique de l'eau en (kg/m^3) ;
- g : accélération due à la pesanteur en (m/s^2)

• Vitesse spécifique [38]

La vitesse spécifique N_s est une grandeur qui caractérise une famille de turbines et qui permet de classer les différentes turbines. Elle est donnée par les fabricants et représente le critère le plus important pour trouver la turbine correspondant à un site hydraulique ; Ceci permet de réaliser des calculs précis des performances de la turbine pour une plage de hauteurs de chute et de débits. Elle est donnée par la relation :

$$N_S = N \frac{P_{hyd}^{0,5}}{H_n^{1,25}} \quad (2.30)$$

Où :

- N_s est la vitesse spécifique de la turbine ;
- H_n est la hauteur de chute nette ;
- P_{hyd} est la puissance reçue par la turbine.

Du reste, le Choix des turbines hydrauliques pour les microcentrales hydroélectriques se fait selon l'abaque ci-dessous.

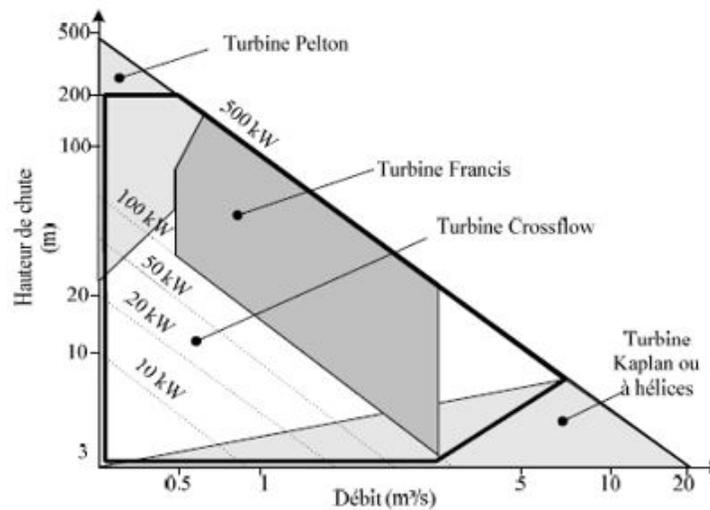


FIGURE 2.22 – Choix des turbines hydrauliques pour les microcentrales hydroélectriques [3]

• Puissance installée

Une fois le type de turbine connu, il est nécessaire de déterminer la puissance nominale la plus adaptée à cet écoulement. Ce choix est important dans le sens où la turbine n'a pas un rendement constant. En effet, les rendements sont relatifs au point de fonctionnement et aux débits réduits. Ce rendement est maximum lorsque le débit qui traverse la turbine est égal au débit nominal, et plus faible sinon. Les courbes des rendements typiques sont montrées sur la figure 2.23 [3]

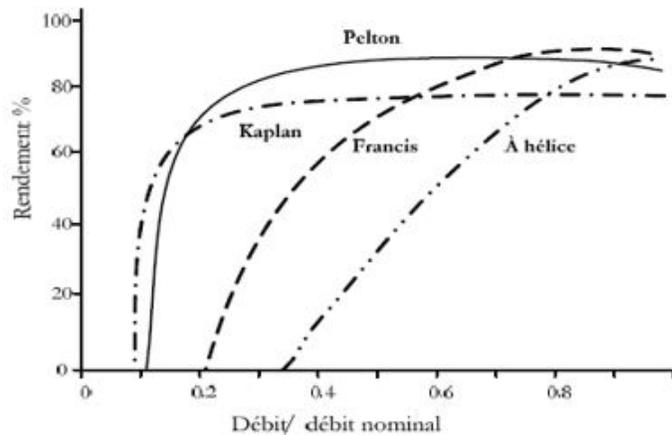


FIGURE 2.23 – Rendements relatifs des turbines hydrauliques pour débits variables [3]

2.9.4 Analyse économique

Un investissement dans une petite centrale hydroélectrique entraîne un certain nombre de dépenses réparties sur toute la vie du projet et procure aussi des revenus, distribués sur la même durée de vie. Ainsi, le débit d'équipement optimal est celui pour lequel le gain financier, dû à la vente de l'énergie produite, est maximal. Ce gain financier est calculé à l'aide de la

formule suivante :

$$G = \sum_i \frac{\rho g H_n Q(i) \eta \left(\frac{Q}{Q_0} \right)}{1000} \times heures(i) Tarif(i) \quad (2.31)$$

Où :

- ρ est la masse volumique de l'eau ;
- η est le rendement total de l'installation,
- H_n est la hauteur de chute nette ;
- Q_0 est le débit nominal de la turbine ;
- $Q(i)$ est le débit moyen journalier pour le ième jour ;
- tarif(i) est le prix de rachat du kWh le ième jour.

2.9.5 Les canalisations

[9]La puissance de l'installation est liée au diamètre des canalisations et à la vitesse d'arrivée du fluide au niveau de la turbine par relation 2.32 :

$$P_{centrale} = \frac{\pi \eta_{transf} \eta_{alt} \eta_{turb} \rho g H_n}{4} V D^2 \quad (2.32)$$

La vitesse de turbinage s'écrit à partir du théorème de l'énergie cinétique comme suit :

$$V = \sqrt{2gH_n} \quad (2.33)$$

Nous déduisons ainsi le diamètre intérieur des différentes canalisations. Un calcul de résistance des matériaux permet de déterminer l'épaisseur de la canalisation en fonction du matériau utilisé et de la pression hydrostatique.

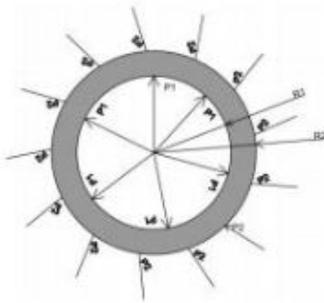


FIGURE 2.24 – Conditions de fonctionnement des canalisations [9]

Dans ces conditions, on a les contraintes qui sont données par la relation 2.34 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = A - \frac{B}{r^2} \\ \sigma_\theta = A + \frac{B}{r^2} \\ \sigma_z = Cte \end{array} \right\} \quad (2.34)$$

Où A et B sont des constantes que l'on détermine grâce aux conditions aux limites : Pour $r = R_1$, on a $\sigma_r = -P_1$; Pour $r = R_2$, on a $\sigma_r = -P_2$. Ce qui revient à :

$$\left\{ \begin{array}{l} A - \frac{B}{r_1^2} = -P_1 \\ A - \frac{B}{r_2^2} = -P_2 \end{array} \right\} \quad (2.35)$$

La résolution du système 2.35 nous donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{P_1 R_1^2 - P_2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \\ B = \frac{(P_1 - P_2) R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \end{array} \right\} \quad (2.36)$$

Ce qui donne :

$$\sigma_{r,\theta} = \frac{P_1 R_2^2 - P_2 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \pm \frac{(P_1 - P_2) R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2} \quad (2.37)$$

On a d'après le critère de Tresca :

$|\sigma_\theta - \sigma_r| \leq \sigma_c$ où σ_c est le module d'élasticité

$$e \geq R_1 \left(\sqrt{1 + \frac{2(P_1 - P_2)}{\sigma_c}} - 1 \right) \quad (2.38)$$

2.9.6 Le Barrage de dérivation

Étant donné que la microcentrale hydraulique, objet de notre étude est faite pour alimenter une localité ; ces installations seront au fil de l'eau, ce qui signifie que l'eau ne sera pas stockée dans un réservoir et qu'elle sera utilisée que lorsqu'elle est disponible. Ainsi, le barrage de dérivation aura pour rôle de diriger l'eau dans la conduite forcée ou une entrée de turbine. L'eau passera ensuite dans la turbine qu'elle fera tourner avec suffisamment de force pour créer de l'électricité dans une génératrice, après quoi elle retournera à la rivière via un canal de fuite. Par conséquent, un simple barrage de dérivation de faible hauteur sera utilisé. Ces ouvrages pourraient être en béton armé. L'on peut néanmoins estimer le volume de la retenue nécessaire pour que la centrale puisse fonctionner pour une durée "T" au mois le plus défavorable de l'année.

• La capacité de la retenue

Ce volume est donné par la relation :

$$V_{retenue} = (Q_{inst} - Q_{entr}) T \quad (2.39)$$

Où :

- T est le temps de fonctionnement journalier ;
- Q_{entr} est le débit minimal du cours d'eau ;
- Q_{inst} est le débit de l'installation.

2.10 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les grandeurs caractéristiques qui permettent l'aménagement des micros centrales hydroélectriques ainsi que les méthodes que nous avons utilisés pour évaluer les éléments essentiels qui constitueraient une probable implantation d'une microcentrale sur la rivière NSAS dans la localité de Nyom II. Avec les caractéristiques propres à ce site, le chapitre qui suit sera consacré à la présentation des différents résultats obtenus.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Introduction

L'arrondissement de Yaoundé 1^{er} dans sa zone rurale, dispose d'un potentiel hydroélectrique exploitable pour satisfaire les besoins énergétiques de populations du village NYOM II et ses environs. Pourtant, cette localité en pleine urbanisation et croissance démographique fait face à une mauvaise couverture en électricité. Ce qui met en veilleuse le spectre du potentiel naturel hydroélectrique évident dont dispose cette zone. Dans ce chapitre, Il est question de partir des concepts du chapitre 2 pour évaluer la possibilité de l'installation d'une microcentrale hydroélectrique dans ladite localité.

3.2 Hydrométrie de la rivière NSAS

Une bonne étude de faisabilité pour la réalisation d'une centrale hydroélectrique sur un cours d'eau nécessite la mesure de débits de celui-ci sur une durée d'au moins 5 ans comme nous l'avons mentionné au chapitre précédent. Cependant, faute des données disponibles sur les débits de ce cours d'eau, nous avons utilisés les deux méthodes soulignées au chapitre précédent pour mesurer nous-même. En procédant par interpolation et à l'aide des données des précipitations ces dix dernières années, nous avons pu générer les débits de ce cours d'eau sur 10 ans.

• Données recueillies sur la rivière NSAS

Nous avons effectué plusieurs descentes dans la localité de NYOM II entre les mois d'avril et d'octobre 2015, pour mesurer les débits de la rivière NSAS dans cette zone. Avec l'exploitation de la méthode de délimitation de section (méthode *Float*) et de l'effet venturi présentés au chapitre 2, nous avons obtenus les résultats consignés dans la table 3.1.

	Débit moyen (m^3/s)	Débit moyen (m^3/s)
Méthodes	Avril (Q_1)	Octobre (Q_2)
<i>float</i>	0.97	1.35
venturi	0.90	1.23
Valeur moyenne de débit (m^3/s)	0.94	1.29

TABLE 3.1 – Valeurs de débits mesurés par nous aux mois d'avril et d'octobre

• Interpolation des valeurs des débits sur 10 années

A partir de la pluviométrie moyenne de la ville de Yaoundé de 2005 à 2015 de la table 3.2 ci-dessous :

2005	0.9	30.7	260	133.3	176.2	276.1	35.4	27	185.7	251.8	48.5	73.7
2006	24.2	32.6	147.8	230.6	188.7	185.7	46.4	25.3	138.8	259.2	101.8	5.2
2007	0	3.8	49.9	224.1	261.1	275.5	149.3	175	432.5	231.2	193.1	68.2
2008	0.8	7.1	266.8	257.3	198.9	241.1	76.5	93.7	241.2	272.2	45.2	76
2009	62.3	54.6	104.6	205	309.4	90.9	97.1	184.3	169.3	279.5	98.1	0
2010	4.5	68.7	215.9	212.8	251.4	142.8	73.7	130.3	149.1	362	230.6	7.2
2011	8.9	201.4	114	238.4	380.1	157.2	78.1	192.8	254.9	182.5	108.3	0
2012	26.3	10.2	156.2	224.1	240.4	172.7	96.9	131	262.4	379.2	210.5	11.2
2013	47.7	68.4	232.6	251.8	190.2	152.4	210.9	198.2	353.2	274.8	202.1	116.1
2014	30.1	33.9	279.1	210.9	277.6	176.4	118.2	168.8	291.1	321.6	243.3	22.7
2015	47.5	26.2	221.6	204	215.6	168.9	123.4	197.2	297.8	361.1	116.8	0
Moyenne	23.02	48.87	186.23	217.48	244.48	185.43	100.54	138.51	252.36	288.65	145.3	34.57

TABLE 3.2 – Précipitations mensuelles (en mm) de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er} de 2005 à 2015 [21]

★ Pour le mois d'avril, nous avons :

$$\begin{cases} P_{moy1} = 217mm \\ K_1 = \frac{Q_1}{P_{moy1}} = 4.30m^2/s \end{cases} \quad (3.1)$$

★ Pour le mois d'octobre, nous avons :

$$\begin{cases} P_{moy2} = 288.65mm \\ K_2 = \frac{Q_2}{P_{moy2}} = 4.38m^2/s \end{cases} \quad (3.2)$$

★ La moyenne du ratio est :

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2} = 4.38m^2s^{-1} \quad (3.3)$$

★ Le débit pour chaque mois s'obtient par la relation :

$$Q_i = K \times P_i$$

En utilisant la relation précédente, nous avons ainsi obtenu les valeurs approchées des débits chronologiques de la rivière NSAS sur une année. Puis celles des débits classés à l'aide du logiciel Matlab.

jours	31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	334	365
Débits chronologiques (m^3/s)	0,086	0,214	0,816	0,953	1,0719	0,812	0,441	0,607	1,106	1,265	0,637	0,151
Débits classés (m^3/s)	1,265	1,112	1,062	0,956	0,842	0,758	0,691	0,592	0,423	0,238	0,140	0,086

TABLE 3.3 – Valeurs approchées des débits de la rivière NSAS sur une année au niveau de NYOM II

Ces données obtenues nous permettent ainsi d'avoir les courbes des débits chronologiques et classés de cette rivière. Elles sont représentées par les figures 3.1 et 3.2 ci-dessous.

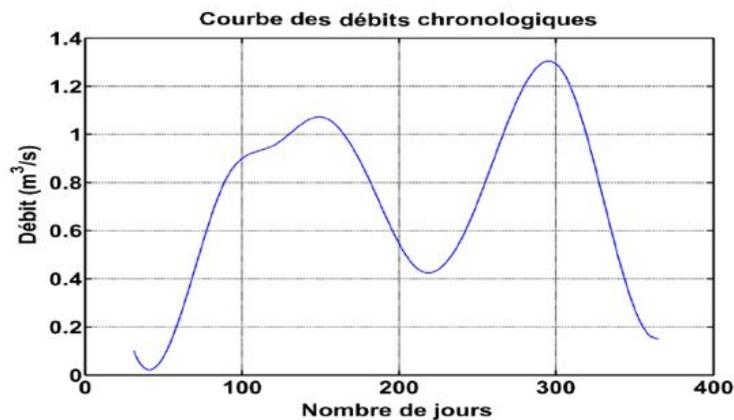


FIGURE 3.1 – Variation annuelle des débits

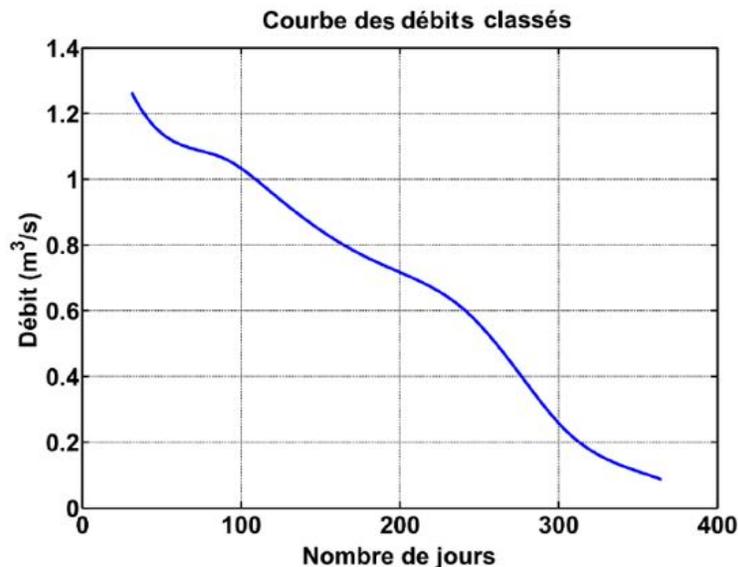


FIGURE 3.2 – Courbe des débits classés

La courbe des débits disposés par ordre chronologique (figures 3.1) apparaît comme très irrégulière avec des périodes de hautes eaux et des périodes de basses eaux. Ainsi, nous avons convenus au préalable de classer tous les débits journaliers de l'année par ordre décroissant, du plus fort au plus faible; ceci sur un pas de temps égal au nombre de jours du mois et allant de 0 à 365 jours. Nous avons ainsi obtenus la courbe des débits classés ci-dessus (figures 3.2) qui ; va permettre de mieux apprécier la régularité du débit et de prévoir donc une production plus régulière de l'électricité dans le temps à travers la détermination du débit de turbinage.

Étant donné que notre micro-centrale hydroélectrique ne fonctionnera de façon optimale que pendant 270 jours au cours de l'année, nous obtenons ainsi la figure 3.3.

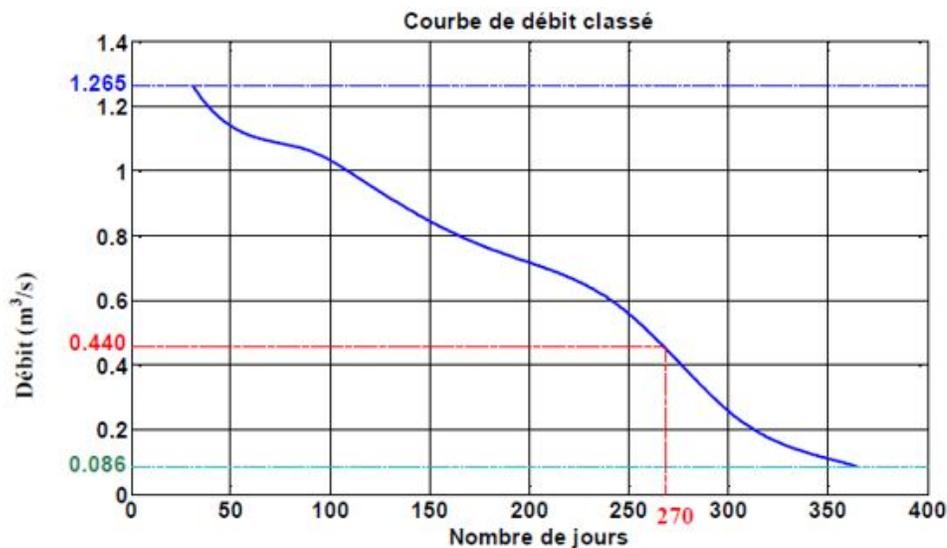


FIGURE 3.3 – Détermination du débit d'équipement ou de turbinage

Par lecture graphique, nous avons le débit d'équipement du site hydroélectrique de NYOM

II :

- Le débit disponible : $Q_d = 0.44m^3s^{-1}$
- Le débit minimum vital (pour la sauvegarde du milieu aquatique) : $Q_{DMV} = 0.086m^3s^{-1}$
- Le débit d'équipement ou de turbinage : $Q_t = Q_d - Q_{DMV} = 0.35m^3s^{-1}$

3.3 Présentation des résultats

3.3.1 Évaluation de la demande d'électricité de la population de NYOM II

En appliquant les formules développées au chapitre pour l'estimation de la demande en électricité de ce village, nous avons obtenus les résultats suivants :

Désignation	Puissance annuelle
Besoin des ménages	$P_1 = 348KW$
PME	$P_2 = 66KW$
- Structures publiques et d'utilités publiques - Éclairage public, - Autres	$P_2 = 140KW$
Besoin Total à court terme (CT)	$P_{TOT} = 554KW$
Puissance électrique prévisionnelle dans 30 ans	$P_{30} = 1345KW$

TABLE 3.4 – Estimation de besoin énergétique de NYOM II

3.3.2 Puissance électrique de l'installation

Nous avons obtenus une dénivellation (hauteur de chute brute) de 18m sur le terrain. En évaluant les pertes de charges à 10% ; la hauteur de chute nette du site est donc $H_n = 16.5m$. Par ailleurs, le rendement total de l'installation est donné par le produit des rendements de la turbine, du générateur, de l'éventuel multiplicateur de tours et par le transformateur. Pour ce type d'implantation, sa valeur est approximativement estimée à : $n_{TOT} = 0.70$. Ainsi, sur la base des données précédentes et des considérations développées au chapitre 2 sur le calcul de puissance des microcentrales hydroélectrique, La valeur de la puissance associable à cette microcentrale est ainsi obtenue :

Puissance électrique de l'installation sur le site NYOM II	
Paramètres	Valeurs
Hauteur de chute brute	18.5 m
Pertes des charges	1.85m
Hauteur de chute nette	16.65m
Débit disponible	$0.44m^3s^{-1}$
Débit minimum vital	$0.086m^3s^{-1}$
Débit d'équipement ou de turbinage	$0.35m^3s^{-1}$
Puissance hydraulique	57KW
Rendement total de l'installation (n_{tot})	0.70
Puissance électrique	40KW

TABLE 3.5 – Données relatives à la puissance de l'installation

• Productibilité moyenne annuelle de la microcentrale

La Productibilité moyenne annuelle d'énergie électrique se détermine sur la base du produit des Puissances de l'installation multipliée par les heures de fonctionnement annuel. Ainsi, on a :

Productibilité moyenne annuelle de l'installation	
Puissance de l'installation	40kw
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	24h
Nombre de jour de fonctionnement par an	270
E = productibilité annuelle moyenne	259600KWh

TABLE 3.6 – Productibilité moyenne annuelle de l'installation

3.4 Choix des principaux éléments de la centrale

3.4.1 La turbine

En se référant aux différents types de turbine citée au chapitre premier et aux critères de choix des turbines hydrauliques pour les micro centrales-hydrauliques développés au chapitre 2, les caractéristiques de cette microcentrale correspondent à celles d'une **turbine Cross-Flow** :

Caractéristiques de la turbine Cross-Flow ou Banki-Mitchell	
Débit (m^3/s)	0,02 à $7m^3/s$
Hauteur de chute	10m à 150m
Vitesse de rotation	400 tr/s
Nombre de jour de fonctionnement par an	270
Rendement	0.70

TABLE 3.7 – Caractéristiques de la turbine adaptée à la microcentrale

3.4.2 Le générateur

Etant donné que le turbinage sera suspendu pendant les mois de très faibles débits (mois de décembre, janvier et février), on aura donc un temps mort pour le fonctionnement du générateur. En plus, ce projet est celui d'un réseau. Tous ces facteurs nous imposent le choix d'un générateur synchrone ayant les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques du générateur	
Type	synchrone
Tension	1kV
Fréquence	50Hz
Puissance apparente	75kVA
Rendement	90%

TABLE 3.8 – Caractéristiques du générateur de la microcentrale

3.4.3 Conduite d'amenée

Les caractéristiques de la conduite d'amenée de ce projet sont les suivantes :

Caractéristiques de la conduite	
Longueur	350m
Diamètre intérieur	500mm
Epaisseur	$14mm \leq e \leq 15mm$
Matériau	PVCPN6

TABLE 3.9 – Caractéristiques de la conduite d'amenée

3.4.4 Barrage de dérivation

Pour ce qui concerne ce projet, la structure de retenue sera constituée par un barrage déversoir, dont le rôle n'est pas celui de cumuler la ressource hydrique, mais d'élever le niveau du

tirant hydrique pour Permettre aux eaux d'entrer dans l'ouvrage de Prise. Pour cette micro-centrale, le débit d'équipement à contrôler sera de $0,35m^3/s$.

Caractéristiques du Barrage de dérivation	
Débit moyen à réguler	$0,35m^3/s$
Hauteur hors fondation	0.50m
Longueur à la crête du barrage	6 m
Largeur à la crête du barrage	0.5 m
Longueur du barrage à la base	1.5 m
Longueur seuil de la fondation	5 m

TABLE 3.10 – Caractéristiques du Barrage de dérivation

3.5 Étude de rentabilité économique

3.5.1 Coût d'investissement initial

Selon ESHA (Europerean Small Hydro power Association), le coût moyen d'investissement "Clefs en main" pour les microcentrales de puissance comprise entre 10kw et 50kw est de :

- ★ 1 950 000 FCFA/KWh.

Pour notre installation de 40kW, le coût d'investissement initial vaut :

- ★ $I = 78\,000\,000$ FCFA (soixante-dix-huit millions)

Par ailleurs, la contribution sur le coût d'investissement selon l'agence internationale de l'énergie peut être regroupée dans le tableau 3.9 :

Investissement	Contribution (en %)	Prix en CFA
Différentes études	10	7800000
Génie civil	55	42900000
Turbine	20	15600000
Equipements électriques	10	7800000
Installation et autres	5	3900000
Total	100	78 000 000

TABLE 3.11 – Contribution sur le coût d'investissement [9]

3.5.2 Recettes annuelles

Dans le secteur de l'électricité au Cameroun, le prix de vente de l'énergie électrique selon l'ARSEL est de 50 FCFA/kWh pour la tranche 1(consommation inférieure ou égale à 110kwh) et 79 FCFA/kwh pour la tranche 2(consommation supérieure à 110 kwh). Pour zstimer la

recette annuelle, nous choisissons de le faire sur la base de 50 FCFA/kwh. Ainsi La production annuelle est estimée à 259600KWh. Les recettes annuelles RA s'élèvent donc à :

$$* \quad \mathbf{RA = 12\ 980\ 000\ FCFA}$$

Selon l'AIE[20], les coûts directs d'exploitation des PCH représentent 30% des recettes brutes. Ainsi, les recettes nettes annuelles (RNA) s'élèvent à :

$$* \quad \mathbf{RNA = 9086000\ FCFA}$$

3.5.3 Temps de retour sur investissement (TRI)

Il est donné par la formule 3.1 :

$$TRI = \frac{I}{RNA} \quad (3.4)$$

Où :

- I cout d'investissement ;
- RNA = Recette nette annuelle.

Le temps de retour sur investissement correspond au nombre d'années requis pour couvrir le capital investi grâce aux recettes dégagées par le projet. Dans notre cas, il est de : **8 ans et 6 mois** de fonctionnement.

3.5.4 L'actif sur la durée de vie du projet

Il s'agit de l'ensemble des recettes inhérentes à l'exploitation de la centrale. C'est l'énergie électrique vendue par l'agence chargée de cette activité [9].

$$Actif = Energie \times Tarif \quad (3.5)$$

Avec *Energie* = quantité d'énergie produite pendant 30 ans d'activité

Tarif = prix d'énergie au kWh

$$\star \quad \mathbf{Actif = 389\ 400\ 000\ FCFA}$$

3.5.5 Le passif sur la durée de vie du projet

Il correspond à l'ensemble des dépenses inhérentes à l'exploitation de la centrale. Il s'agit des coûts de maintenance, des coûts d'entretien du site, des salaires, de la couverture sanitaire, de l'allocation familiale etc. Ces dépenses représentent 30% des recettes brutes annuelles [9].

$$\star \quad \mathbf{Passif = 116\ 820\ 000\ FCFA}$$

3.5.6 La valeur résiduelle

C'est la valeur des équipements au terme du projet. Elle est estimée à 10% de la valeur de l'investissement initial [9].

★ **VR = 780 000 FCFA**

3.5.7 La V.A.N.

C'est un flux de trésorerie actualisé représentant l'enrichissement supplémentaire d'un investissement par rapport au minimum exigé par les apporteurs de capitaux. La VAN est donné par l'équation 3.9 :

$$VAN = VR - I + \sum_{i=1}^{30} 0.65 \frac{(Actif - Passif)}{(1+t)^i} \quad (3.6)$$

Le taux d'actualisation généralement utilisé est **0,1** [9]. En calculant le **VAN** de ce projet sur **30ans**, obtient :

★ **VAN = 128 9 442013 FCFA**

3.6 Discussion

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire a consisté à prospecter et d'identifier un site potentiel pour une implantation d'une microcentrale hydroélectrique dans l'arrondissement de Yaoundé 1^{er}. Pour répondre à notre objectif, nous avons été amené à parcourir le bassin versant de cet arrondissement. Cependant, au vu de la position géopolitique des zones traversées par le Mfoundi, principal fleuve qui traverse cet arrondissement ainsi que les deux autres cours d'eau de ce bassin (AKOO, NTEM); une quelconque implantation d'une microcentrale hydroélectrique dans ces zones poserait d'énormes problèmes d'impacts environnementaux. Ce qui nous a amené à orienter nos investigations dans la zone rurale de YAOUNDE 1^{er}, notamment dans les villages NKOLONDONDOM et NYOM.

Au cours de cette prospection, nous nous sommes attardés sur deux sites traversées par le **NSAS**; principal cours d'eau qui traverse la zone. En effet, ces deux sites dont l'un se trouve à **NKOLONDONDOM I** et l'autre à **NYOM II**, présentent des caractéristiques favorables pour une exploitation hydroélectrique. Avec le GPS, nous avons obtenus une dénivellation naturelle au niveau de NYOM II et de **5m** à NKOLONDONDOM I. Par ailleurs, l'exploitation du principe de l'effet venturi et de la méthode de délimitation de section, encore appelée méthode *float*; nous ont permis d'effectuer des mesures directes des débits sur ces sites. Ces deux paramètres fondamentaux pour la production de l'énergie hydroélectrique, couplés à d'autres critères (accessibilité, contraintes techniques, etc.) nous ont permis de choisir le site de **NYOM II** comme site exploitable pour l'implantation de notre microcentrale.

En utilisant les valeurs des débits obtenues au mois d'avril et d'octobre, nous avons procédé à des interpolations avec les valeurs des précipitations moyennes annuelles de la ville de Yaoundé ces dix dernières années. Ainsi, nous avons obtenus une valeur de $0.44m^3/s$ comme débit annuel disponible au niveau de **NYOM II** et de $0.15m^3/s$ à **NKOLONDONDOM I**.

A partir de ces données, nous avons tracés la courbe des débits classés qui nous a permis d'obtenir un débit d'équipement égal à $0.35m^3/s$ sur les $0.44m^3/s$ disponible. Ce débit de turbinage

couplé au **16.65m** de hauteur de chute nette nous ont mis sur le chemin d'une centrale à moyenne chute et d'une turbine **Cross-Flow** pour une puissance installée de **40KW** ; largement capable de satisfaire la demande annuelle de la localité dont l'estimation du besoin annuel en terme de puissance nous a donnée **554kW**. La mise en place de cette infrastructure nécessite un coût d'investissement initial de **78 millions FCFA**. Puis que cette micro-centrale ne fonctionne de façon optimale que durant **270 jours** au cours de l'année, la production annuelle est estimée à **259600KWh**. En tenant compte du prix de vente de l'électricité, et des coûts d'exploitation de la centrale, les recettes annuelles ont été évaluées à **9086000 FCFA**, ce qui correspond un temps de retour sur investissement de **8 ans et 6 mois**. La Valeur Actuelle Nette (**VAN**) du projet, évalué sur une durée de vie de 30 ans montre que ce dernier est rentable.

3.7 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre montre que le village NYOM II de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er} dispose d'un site exploitable pour une implantation d'une microcentrale hydro-électrique d'une puissance installée de **40KW** ; capable de satisfaire la demande en électricité de cette localité et ses environs. La mise sur pied de ce projet dans cette zone pourra ainsi résoudre le problème d'électrification et de baisse drastique de tension électrique que rencontre cette localité et ses environs.

IMPLICATIONS PEDAGOGIQUES

4.1 Introduction

Les énergies renouvelables bénéficient d'une forte attractivité, qui peut être mise au service des apprentissages par l'immersion des théorèmes et propriétés dans la réalité physique des choses. En effet, l'utilisation du principe de base de microcentrale hydroélectrique dans le cadre d'un enseignement intégré des sciences et technologies est particulièrement adaptée et marque un impact positif sur la motivation des apprenants

4.2 Adéquation avec les thèmes d'enseignements du secondaire

Au secondaires, différentes disciplines scientifiques abordent la notion d'énergie. Mais les thèmes d'enseignement y afférents souffrent parfois de désaffection de la part des élèves. Ceci parce que l'énergie est une notion difficile à appréhender, car elle se réfère à des ressources naturelles, des conversions et transformations, ainsi qu'à des technologies variées. Ainsi, l'exploitation du mécanisme de production de l'énergie électrique peut être considérée comme un dispositif pédagogique, innovant et motivant pour animer les cours et activités du lycée en lien avec l'énergie. Les matières concernées sont les sciences physiques, la technologie, les sciences de la vie et de la terre et, dans une moindre mesure la géographie. Par ailleurs, ce mécanisme de fonctionnement permet de découvrir les notions de base de la culture scientifique qui restent mal connues en reliant avec la vie courante.

4.3 Intérêt didactique

4.3.1 Connaissances et capacités

L'utilisation du principe de production de l'énergie électrique à partir d'une microcentrale hydroélectrique permet aux apprenants l'acquisition des connaissances et capacités suivantes :

- Savoir que l'eau est une source d'énergie renouvelable ;
- Faire la distinction entre les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables ;
- Savoir que l'alternateur est une partie commune à toutes les centrales électriques ;
- Savoir que l'énergie reçue par l'alternateur est convertie en énergie électrique ;

- Savoir que l’alternateur est constitué par un stator (partie fixe) et un rotor (partie mobile).

4.3.2 Fiche pédagogique

Les différentes composantes d’une microcentrale hydroélectrique peuvent être utilisées pour joindre la théorie à la réalité physique lorsqu’on aborde certains thèmes d’enseignement de physique aux secondaires. Cette illustration peut être faite à travers d’une fiche pédagogique mettant en liaison les différentes composantes de la microcentrale avec ces thèmes d’enseignement.

Ainsi, nous avons pu concevoir la fiche ci-après

★Intitulé : MICROCENTRALE HYDROÉLECTRIQUE ★Objectif général : conversion de l’énergie mécanique(potentielle et cinétique) d’une chute d’eau en énergie électrique.		
Elément	Déclinaison en énergie	Contenu d’enseignement
1- Barrage de retenue d’eau	Source d’énergie mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie potentielle - Énergie cinétique - Énergie mécanique
2-Conduite forcée	Source d’énergie cinétique de translation de l’eau	- Transformation de l’énergie potentielle en énergie cinétique
3-Turbine	Source d’énergie mécanique de rotation	-Transformation de l’énergie cinétique de translation en énergie mécanique (cinétique de rotation et potentielle)
4-Alternateur	Convertisseur d’énergie	<ul style="list-style-type: none"> -Conversion de l’énergie mécanique en énergie électrique ; -Moteur électrique ; -Rotor, stator, bobine.
5-Ligne à haute tension	Énergie électromagnétique	- Combinaison de la force électrique (issue des interactions entre les charges électriques) et de la force magnétique (celles des aimants)

TABLE 4.1 – Fiche d’implication pédagogique

4.4 Conclusion

Cette partie de notre travail a pour but de faire le lien entre l’objet de notre étude et les thèmes d’enseignements dispensés au secondaires. Au regard des notions développées et les étapes à franchir pour la conception, la réalisation et l’exploitation d’une microcentrale hydroélectrique et, vu certains thèmes d’enseignement abordés aux secondaires en l’occurrence la notion de l’énergie ; l’utilisation du principe de base de fonctionnement d’une microcentrale

hydroélectrique dans un cadre d'enseignement se présente comme un véritable kit pédagogique qui permet d'aborder certains contenus des sciences physiques de la 6^{ème} à la terminale de façon innovante et motivante pour les élèves.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au Cameroun, à peine 50% de la population a accès à l'électricité et, plus de 10500 localités sur les 13014 que l'on dénombre restent encore non électrifiées. Ainsi, seuls 21% des ménages des zones rurales et 79% des ceux des zones urbaines ont accès à l'électricité [22]. Ceci contraste avec l'énorme potentiel hydroélectrique dont la capacité technique de production est estimée à 20 GW.

En réalité, les zones urbaines, les aires rurales et les villages du Cameroun dépendent de l'énergie produite à partir des grands barrages hydroélectrique. Cependant, son acheminement à travers les lignes de transmission reliant ces grands barrages à différentes zones est parfois plus cher pour des régions éloignées et des localités isolées à l'intérieur du pays. De plus, des nombreuses pannes surviennent régulièrement au niveau des transformateurs et de ces lignes de transmission ; d'où le coût de ces types de projets serait parfois très élevé par rapport à la demande. Pour remédier à cela, des microcentrales pourraient être envisagées dans des zones éloignées des couloirs de transport énergétique et possédant de site d'implantation. Ceci situe le contexte de l'étude sujet de notre mémoire. Il est question pour nous de résoudre les problèmes d'électrification et de baisses des tensions que rencontrent les zones rurales et les nouveaux quartiers de l'arrondissement de Yaoundé 1^{er}. Nos différentes prospections, investigations et mesures de terrain nous ont permis de localiser dans le village **NYOM II**, sur la rivière **NSAS** ; un site qui présente des caractéristiques répondant à une installation d'une unité de production de microcentrale. En exploitant une hauteur de chute nette de **16.65m** et un débit de turbinage de $0.35m^3/s$ qu'il présente, nous sommes arrivés à prédire une capacité de production journaliere de **40KW** et, un investissement de **78 millions FCFA** pour un temps de retour sur investissement de **8 ans et 6 mois** et une Valeur Actuelle Nette de 1 milliard 289 millions FCFA sur une durée de vie de 30 ans. Sur le plan pédagogique, l'utilisation du principe de fonctionnement d'une microcentrale hydroélectrique dans un cadre d'enseignement se présente comme un véritable kit pédagogique qui permet d'aborder certains contenus des sciences physiques de la 6^{eme} en terminale de façon innovante et motivante pour les apprenants.

• Perspectives

La réalisation d'un projet de microcentrale nécessite plusieurs études. Ainsi, avant la mise en œuvre de ce projet, d'autres études approfondies doivent être réalisées :

- Au niveau de dimensionnement et de choix technologique des systèmes de stockages, des études technico-économiques plus approfondies doivent être réalisées afin de permettre d’assurer le fonctionnement de la microcentrale même dans des conditions défavorables ;
- Affiner et approfondir cette étude afin d’introduire ce site dans le répertoire du potentiel équitable de la petite hydroélectricité du Cameroun ;
- Rechercher de potentiels investisseurs et financement pour la mise en œuvre du présent projet.

Bibliographie

- [1] N. Djimadoum, Diagnostic des microbarrages dans la region de koupela en vue de leur réhabilitation : cas du site de Kombeole Burkina Faso, Mémoire de fin d'étude d'ingénieur d'équipement rural Ouagadougou : EIER, (2006).
- [2] ADEME, "Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité", mars 2003, pp.2-17. Paris : Rouland.
- [3] B. Lakhdar, "Optimisation du contrôle de commande d'un système hydraulique réversible à vitesse variable" Thèse de doctorat, Engineering sciences, université de Grenoble, 2013, pp.2-28.
- [4] S. Bretan, Etude de système de conversion électronique d'une microcentrale hydraulique à vitesse variable. Thèse de doctorat en science, Ecole Supérieure d'Arts et Métiers, 2008, p12.
- [5] MINEE, "Rapport 2011 sur la situation énergétique du Cameroun", 2012, p9.
- [6] G. Camerounais, "Document de Stratégie pour la Croissance et l'Emploi", Yaoundé, 2009, p 13.
- [7] A. Brown, S. Müller and Z. Dobrotkov "Renewable energy markets and prospects by technology", International Energy Agency (IEA)/OECD, Paris, 2011, p13.
- [8] O. Paish "Small hydro power : technology and current status" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 6 Dec 2002, pp 537-556
- [9] ESHA, "Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité", 2005, p11.
- [10] CETMEF, "Microcentrales hydroélectriques : note de synthèse", 2012, pp.6-12.
- [11] R.O. Sinniger, W.H. Hager, "Constructions Hydrauliques", Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1989, p43.
- [12] J. Goldemberg, "Energy, environnement and developpment", Earhrscan publications, 1999.
- [13] "www.retscreen.net/download.php/fr/2010/2/cours_hydro.pdf", [En ligne]. [Accès le 12 2015].
- [14] RETSCREEN, "Analyse de projets d'énergies propres : Manuel d'ingénieurs et d'études de cas" 2004, p9.

- [15] Hydro-Quebec, “www.hydroquebec.com”, 2010. [En ligne]. [Accès le 2016].
- [16] G. Tchatat, “Cameroun-contribution à la préparation du rapport national pour la formulation du livre blanc régional sur l’accès universel aux services énergétiques intégrant le développement des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique”, PNUD, Yaoundé, Cameroun, 2014 pp. 69-97.
- [17] H. DJOUDA, “Contribution à la réalisation d’une mini-centrale hydroélectrique dans l’arrondissement de MFOU” Mémoire présenté et soutenu en vue de l’obtention du Diplôme de Professeur de l’Enseignement Secondaire 2ème grade(DIPES II), ENS, Yaoundé, 2015.
- [18] G. SOUGA, “Contribution à l’étude de la mise en place d’une microcentrale hydroélectrique dans l’arrondissement de SA’A Mémoire présenté et soutenu en vue de l’obtention du Diplôme de Professeur de l’Enseignement Secondaire 2ème grade(DIPES II), ENS, Yaoundé, 2014.
- [19] B. FOMENE, “Contribution à la réalisation d’une microcentrale hydroélectrique dans l’arrondissement d’OBALA” Mémoire présenté et soutenu en vue de l’obtention du Diplôme de Professeur de l’Enseignement Secondaire 2ème grade(DIPES II), ENS, Yaoundé, 2015.
- [20] “www.ledictionnairevisuel.com.” [En ligne].
- [21] Loi d’inscription : ”Loi N°2011/022 du 14 décembre 2011 régissant le secteur de l’électricité au Cameroun : Article 11”, Yaoundé Cameroun, 2011
- [22] CAY.1, “Monographie de la commune de Yaoundé 1”, Yaoundé, 2004.
- [23] J. Wéthé, “Urbanisation et protection de la ressource en eau : une approche par les Systèmes d’Information Géographique appliqué à Yaoundé-Cameroun” Mémoire de fin d’étude de DEPA. “Département de l’environnement”, Université de senghor, Alexandrie (Egypte), 1999, p 104.
- [24] CMP Yaoundé, “Relevé climatique mensuel de la localité de Yaoundé : 2005-2015”, Yaoundé, 2016
- [25] L. Onana, “Pratiques de fertilisation et caractéristiques des sols en zone maraichère périurbaine de Yaoundé : cas des basfonds de Nkolondom” Mémoire de fin d’étude, Université de Dschang, Dschang (Cameroun), p73, (2006).
- [26] R.J. Assako, “Apport des systèmes d’information géographique dans l’analyse des risques d’inondation et de glissement de terrain à Yaoundé”, in : D.Bley, J.Champaud, P. Baudot, B.Brun, H. Pagezy and L.Vernazza, Villes du Sud et environnement, Ed. Bergier, 1997, pp. 110-124.
- [27] M. Tchotsoua, “Les risques morpho-hydrologiques en milieu urbain tropical cas de Yaoundé au Cameroun.”, 2007, P 9.
- [28] A. Franqueville, “Yaoundé-Construire une capitale” Collection mémoire, Paris, N-104, 1984, PP. 29-192.

- [29] INC, “Cartographie, Bassin versant de la ville de Yaoundé”,s.d.
- [30] BUCREP, “Rapport de présentation des résultats définitifs”, 2007.
- [31] G. Decoutte, “Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi”, Cemagref, Paris, 2002, pp 182-185.
- [32] PACER, “Guide pratique pour la réalisation de petites centrales hydrauliques” 1992, p 30.
- [33] Projet Niger, “Techniques hydrométriques : Mesurage et calcul des débits liquides Jaugeages”, 2007, p5.
- [34] R.B. Hamouda, “Notions de mécanique des fluides, Cours et exercices corrigés” 2008, p140 .
- [35] GTZ, “Bons et Mauvais exemples d’une mini-centrale hydroélectrique”, 2009 p 9.
- [36] J. Bonnin, “Ecoulement des fluides dans les tuyauteries (Les techniques de l’ingénieur)”, 2002, P 110.

4.6 Annexe 2 : Choix des Turbines

	Pelton	Banki-Mitchell ou Cross-flow	Francis	Kaplan
Types	Turbine à l'action : l'eau est mis en vitesse maximale dans l'injecteur. Toute l'énergie dans le jet entraîne la rotation de la roue et l'eau ressort en pluie.		Turbine à réaction : l'eau est guidée par le distributeur pour rentrer sans choc dans la roue. Celle-ci se met en vitesse maximale à la sortie de la roue.	
Débit l/s	20 à 1 000 l/s	20 à 7 000 l/s	100 à 6 000 l/s	300 à 10 000 l/s
Hauteur de chute	50 à 1 000 m	10 à 150 m	5 à 100 m	Jusqu'à 10 m
Vitesse de rotation	500 à 1 500 tr/min	Faible	Jusqu'à 1 000 tr/min	Faible
Caractéristiques de performance	<ul style="list-style-type: none"> - Arrivée d'eau réglable par injecteurs qui permettent de conserver de bons rendements - Encombrement réduit autorisé par liaison directe turbine-générateur 	<ul style="list-style-type: none"> - Construction simple mais rendements relativement faibles - Multiplicateur encombrant entre turbine et générateur 	<ul style="list-style-type: none"> - Excellents rendements si le débit varie entre 60 à 100 % de son débit nominal - Fonctionnement sans multiplicateur 	<ul style="list-style-type: none"> - Bons rendements - À utiliser pour les forts débits et les faibles chutes

Figure 4.2 – Capacité de réponse aux variations de chute et de débit des différents types de turbines

4.7 Annexe 3 : Mesure des débits

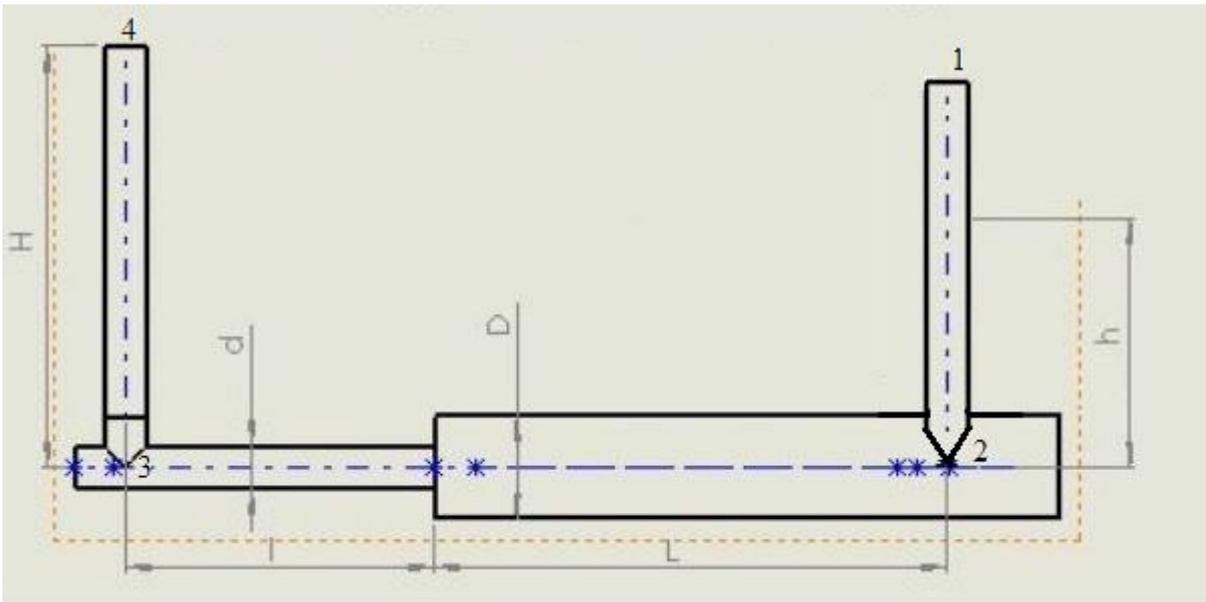


Figure 4.3 – Dispositif expérimental

Nous avons :

$$P_1 - P_2 + P_2 - P_3 + P_3 - P_4 = 0$$

Or d'après l'équation de Bernoulli généralisée, on a :

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + Z = q \quad \text{Où } q \text{ est la charge.}$$

Donc $P_1 - P_2 = -\rho gh$, car la vitesse est nulle sur le tronçon 12 ; ce qui signifie que les pertes linéaires sont également nulles.

$$P_2 - P_3 = \rho g \Delta q - \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_3^2) \quad \text{Où}$$

$$\Delta q = \Delta q_l + \Delta q_s = p = \text{perte de charge linéaire} + \text{perte de charge singulière sur le tronçon 32.}$$

On aussi :

$$P_3 - P_4 = \rho gh$$

Car la vitesse est nulle sur le tronçon 34 .Ce qui signifie que les pertes linéaires sont également nulles

Ainsi, on a :

$$-\rho gh - \rho g \Delta q - \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_3^2) - \rho gh = 0$$

$$V_2^2 - V_3^2 = -2gH - 2g\Delta q + 2gh$$

Or

$$V_2 S_2 = V_3 S_3 \quad \text{Avec} \quad S_2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{et} \quad S_3 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$V_3^2 \left(\frac{4}{\pi d^2} \right)^2 \left(\left(\frac{d}{4} \right)^4 - 1 \right) = -2gH - 2g\Delta q + 2gh$$

Donc

$$V_3 = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2g(H - h - \Delta q_l - \Delta q_s)}{\left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right)}}$$

Or

$$Q = VS \quad \text{et} \quad Q = V_3 S_3 = V_2 S_2 = V_1 S_1 = V_4 S_4$$

$$\text{D'où} \quad Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2g(H - h - \Delta q_l - \Delta q_s)}{\left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right)}}$$