

École polytechnique de Louvain

Développement d'une méthodologie pour le développement de microcentrales hydroélectriques dans des zones rurales en Haïti

Auteur: **Christiane NLANDU SAMBA**

Promoteurs: **Sandra SOARES FRAZAO, Yves ZECH**

Lecteurs: **Miltiadis PAPALEXANDRIS, Olivier CARLIER**

Année académique 2019–2020

Master [120] : ingénieur civil mécanicien

Remerciements

Je souhaite tout d'abord adresser mes remerciements à Sandra SOARES FRAZAO, pour m'avoir donné l'opportunité de participer aux prémises d'une étude de faisabilité en vue de développer une installation de production d'électricité verte en Haïti.

Je tiens également à remercier Yves ZECH, pour son suivi régulier et rigoureux qui m'a incontestablement aidée à développer davantage mon sens de l'analyse, et avec qui j'ai eu l'occasion de débattre sur les approches à conceptualiser. Son soutien sans faille m'a été essentiel pour mener à bien mon étude.

J'exprime enfin mon infinie reconnaissance envers toutes les personnes qui se sont impliquées dans la relecture de ce travail, et envers toutes celles qui y ont apporté des remarques constructives.

« Ils ne savaient pas que c'était impossible, alors ils l'ont fait. »
- Samuel Langhorne Clemens (Mark Twain)

Table des matières

Remerciements	ii
Résumé	iii
Introduction	1
1 Analyse topographique de Dubreuil	4
1.1 Définition du modèle numérique de terrain	4
1.2 Analyse du modèle numérique de terrain	4
2 Climat et données pluviométriques et débitométriques	11
2.1 Climat en Haïti	11
2.2 Récolte de données pluviométriques et débitométriques	11
2.2.1 Instruments de mesures pour les pluies et les débits	11
2.2.2 Importance de ces mesures	13
2.2.3 Approche en cas de données manquantes	14
3 Modélisation de la dynamique de crue	20
3.1 Traitement de données hydro-climatiques	20
3.2 Construction du modèle d'écoulement superficiel	22
3.2.1 Définition d'un modèle pluie-débit	22
3.2.2 Types de fonction de production	24
3.2.3 Types de fonction de transfert	25
3.2.4 Identification des paramètres du modèle	27
3.2.5 Fichiers d'entrée du modèle	28
3.2.6 Calage du modèle	31
3.2.7 Analyse de sensibilité sur l'incertitude des fonctions de production et de transfert	32
3.3 Résultats finaux de la simulation	36

4	Modélisation de l'irrigation	39
5	Modélisation des niveaux d'eau	42
5.1	Détermination du niveau amont	42
5.2	Détermination du niveau aval	44
6	Infrastructure	52
6.1	Dimensions de l'infrastructure	52
6.2	Capacité du déversoir	53
7	Etude de faisabilité pour l'installation d'une centrale microhydroélectrique	56
7.1	Choix des turbines	56
7.2	Détermination de la puissance et de la capacité de l'installation	58
7.3	Similitude et divergence des turbines	65
7.3.1	Vis d'Archimède	65
7.3.2	Banki-Michell	65
7.4	Architecture des turbines	66
7.4.1	Vis d'Archimède	66
7.4.2	Banki-Michell	68
7.5	Fonctionnement des turbines	69
7.5.1	Vis d'Archimède	69
7.5.2	Banki-Michell	70
7.6	Dimensionnement final des turbines	72
8	Estimation des coûts de l'installation et niveau de consommation en électricité	73
8.1	Coûts	73
8.2	Raccordement au réseau et aux habitations	74
8.3	Coût de production et niveau de consommation d'électricité	75
9	Evaluation de l'impact environnemental et social d'une installation	76
9.1	Impact environnemental	76
9.2	Impact social	78
	Conclusion	80
	Bibliographie	85
	Appendices	87

A	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	88
A.1	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	89
A.2	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	90
A.3	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	91
A.4	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	92
A.5	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	93
A.6	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	94
A.7	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	95
A.8	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	96
A.9	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	97
A.10	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	98
A.11	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	99
A.12	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	100
A.13	Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède	101
B	Dessin technique de la Banki-Michell JLA29-66-33	102
B.1	Dessin technique de la Banki-Michell JLA29-66-33	103
B.2	Dessin technique de la Banki-Michell JLA29-66-33	104
C	Calcul de puissances des Banki-Michell	105
C.1	Calcul de puissances des Banki-Michell	106
D	Estimation du coût de Banki-Michell JLA29-66-33	107
D.1	Estimation du coût de Banki-Michell JLA29-66-33	108
E	Zone Electrique	109
E.1	Zone Electrique	110
F	Coûts et consommation en électricité	111
F.1	Coûts et consommation en électricité	112
F.2	Coûts et consommation en électricité	113
F.3	Coûts et consommation en électricité	114

Introduction

En République d'Haïti, l'électricité est générée à 85% par de l'énergie fossile et à 15% par de l'hydroélectricité [1]. La production, la transmission, la distribution et la vente d'électricité est prise en charge par la société Electricité d'Haïti qui détient le monopole du secteur énergétique. Les producteurs d'électricité indépendants vendent l'électricité à Electricité d'Haïti, et des producteurs de micro-réseaux électriques indépendant d'Electricité d'Haïti participent également à la génération d'énergie partout dans le pays mais surtout en zone rurale [2].

Le réseau électrique est constitué de plusieurs réseaux régionaux émiétés sur l'ensemble du territoire. La métropole de Port-au-Prince est alimentée par un réseau d'une capacité d'environ 200MW, dont 54MW proviennent de la centrale hydroélectrique de Péligre. Les zones densément peuplées et situées en-dehors de la capitale sont quant à elles desservies par des réseaux régionaux indépendants. Ces derniers disposent de centrales de plus petites tailles, ayant une capacité inférieure à 20MW. On dénombre environ 30 villages alimentés par des réseaux isolés, d'une capacité en dessous de 500kW, qui comportent des microcentrales hydroélectriques. [2]

Seulement 75% des ménages ont accès à l'électricité dans la ville de Port-au-Prince pour une durée de 5 à 20 heures par jour, contre 15% en zone rurale. Ceci revient à une consommation d'environ 36kWh/an/personne [2] alors qu'en Belgique, une personne consomme 2036kWh/an [3]. Dans certaines zones, les habitants se voient contraints de se raccorder illégalement à un réseau existant ou d'utiliser des groupes électrogènes. Finalement, le taux d'électrification du pays - à savoir le rapport entre le nombre d'habitants raccordés (légalement et illégalement) et le nombre total d'habitants - s'élève depuis plusieurs années à 25%. Cette faible couverture s'explique non seulement par un nombre insuffisant d'installations disponibles pour la population, mais aussi par le fait que la perte d'énergie électrique s'élève à environ 60% de ce qui est produit. Cette perte est engendrée d'une part par le vieillissement des installations. D'autre part, elle est

causée par l'accumulation de limons dans les cours d'eau qui tendent à diminuer leurs débits, à créer un dépôt notamment dans les réservoirs des centrales hydroélectriques « à accumulation » et par conséquent, à réduire la capacité de l'installation[1]. De plus, les pertes non techniques, telles que les raccords illégaux et les facturations insuffisantes de consommation chargées plus particulièrement par Electricité d'Haïti [4], génèrent des pertes financières ayant un impact sur la quantité d'électricité produite car l'installation est de moins en moins rentable.

Face à une couverture électrique insuffisante d'autant plus notable en zone rurale, la volonté d'y créer de nouvelles installations par les producteurs d'électricité indépendants travaillant en collaboration avec Electricité d'Haïti ou non, et par Electricité d'Haïti s'est intensifiée. Toutefois, un tel projet dans un pays en voie de développement nécessite souvent l'apport de capitaux externes. Un des organismes qui soutient la promotion de ce type de projets est le Wallonie-Bruxelles International (WBI)[5]. Ce dernier s'intéresse de près à la faisabilité d'installer une microcentrale hydroélectrique en Haïti. EDH a donc répertorié plusieurs sites pour lesquels il serait intéressant de faire de la microhydroélectricité. Ces sites sont caractérisés par un débit suffisant ainsi que par une chute d'eau comprise entre 2 et 6 mètres. De plus, un des principaux critères pour le WBI est que le site comporte une infrastructure existante permettant de limiter le coût des travaux de génie civil. Il est tout aussi important que des potentiels consommateurs puissent se situer à proximité de la future installation dans le cas où la pré-étude se révèle être favorable, et que le projet aboutisse.

Suite à cela, trois sites en milieu rural ont été sélectionnés par Electricité d'Haïti : Drouet, d'Avezac et Dubreuil. L'Université Catholique de Louvain a été sollicitée pour réaliser une pré-étude technique sur un premier site : Dubreuil, une zone isolée située dans le Département du Sud d'Haïti, et traversée par la rivière d'Acul du Sud.

Le but de ce mémoire est donc le développement d'une méthodologie de développement de microcentrales hydroélectriques sur le site de Dubreuil, et de la rendre transposable sur les autres sites. Le site comprend un parement de barrage déjà existant et un évacuateur de crue. Actuellement, une prise d'eau s'effectue à l'amont du barrage pour irriguer les plaines, mais il faudrait évaluer le potentiel d'y ajouter une microcentrale hydroélectrique. Pour ce faire, des mesures topographiques, pluviométriques, débitométriques, et limnimétriques (indicatives du niveau de la surface d'eau d'une rivière) sont indispensables. Cependant, aucune mesure de pluies, de débits, et de niveau d'eau ont été réalisées sur le terrain. Par conséquent, comment pourrions-nous élaborer une étude

de prédimensionnement de microcentrale hydroélectrique avec seulement des données topographiques à notre disposition ? Ce mémoire propose une démarche innovante pour pallier au manque de données qui est un problème récurrent dans ce type de projet réalisé dans les pays du Sud. Plusieurs approches ont été établies pour lever les verrous sur les éléments manquants cités précédemment. Des pistes de réflexion seront proposées pour alimenter les prochaines recherches qui compléteront la méthodologie développée.

Chapitre 1

Analyse topographique de Dubreuil

1.1 Définition du modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation numérique de la topographie d'un terrain étudié. Ce dernier ne prend pas en compte les éléments naturels visibles sur le sol, ainsi que ceux construits par l'homme¹.

1.2 Analyse du modèle numérique de terrain

L'étude de ce modèle s'est faite dans un premier temps au moyen du logiciel QGIS. Celui-ci permet la réalisation de carte, l'analyse et la modification de données spatiales [6]. Le MNT a été superposé sur une carte du monde Bing afin de localiser précisément la zone d'intérêt en Haïti, comme nous le voyons à la figure 1.1. Sur cette dernière, les zones noires et blanches correspondent respectivement aux basses et hautes altitudes. Par conséquent, nous pouvons constater que le relief est relativement pentu.

1. *Modèle numérique de terrain*, 1 juin 2020, https://fr.wikipedia.org/wiki/Modèle_numérique_de_MNT_ou_MNE

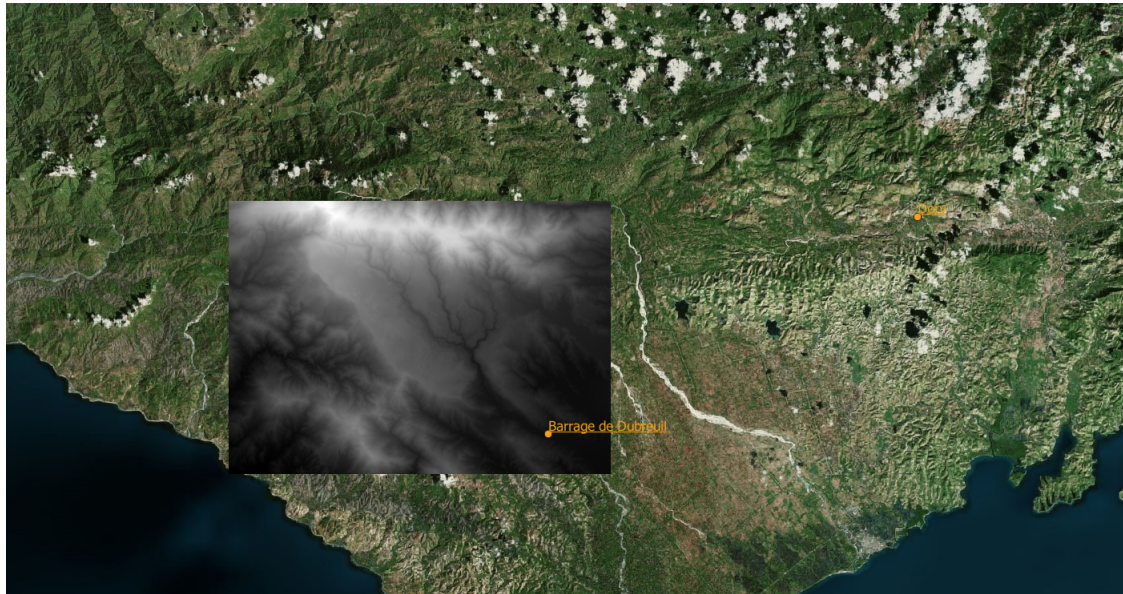


FIGURE 1.1 – Localisation du MNT initial sur Bing

Dans un second temps, le logiciel Athys a permis, sur base du MNT initial à la figure 1.2, de générer des MNT dérivés du MNT de base dont chacun met en exergue la structure du terrain étudié. Le module de Athys que nous avons utilisé est Vicair. En effet, il est possible de visualiser, sur les MNT dérivés, les talwegs qui représentent les lignes des points ayant la plus basse altitude dans le lit d'un cours d'eau, comme présenté à la figure 1.3. Grâce à cela, nous pouvons visualiser les cours d'eau principaux et leurs affluents. De plus, il est possible de :

1. identifier la direction de drainage (figure 1.4)
2. représenter le réseau de pente qui donne une image plus détaillée du relief (figure 1.5)
3. générer le bassin versant avec ou sans les talwegs qui s'y trouvent sur base des coordonnées géographiques de Dubreuil (figure 1.6 et figure 1.7)

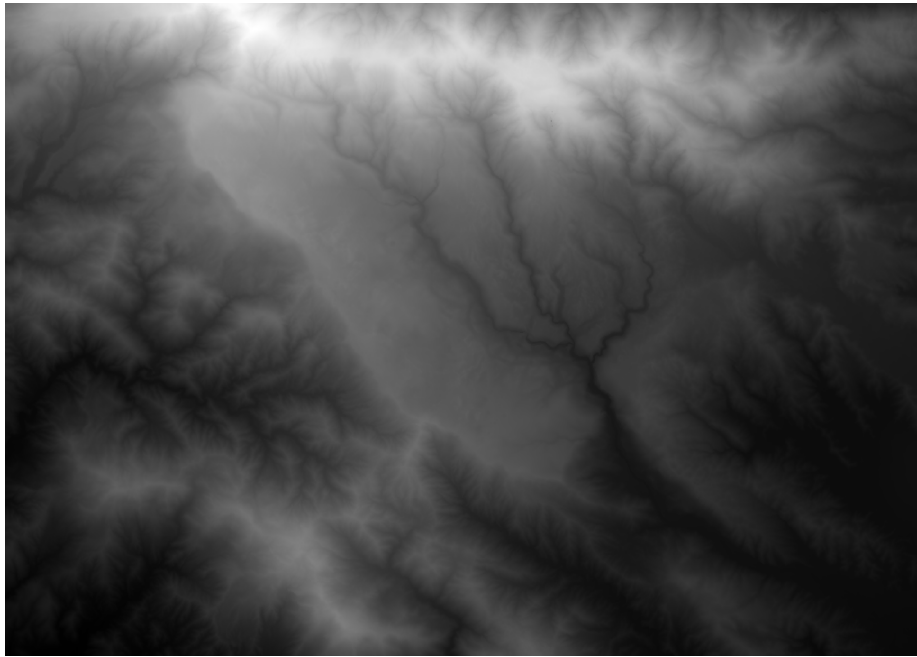


FIGURE 1.2 – MNT initial

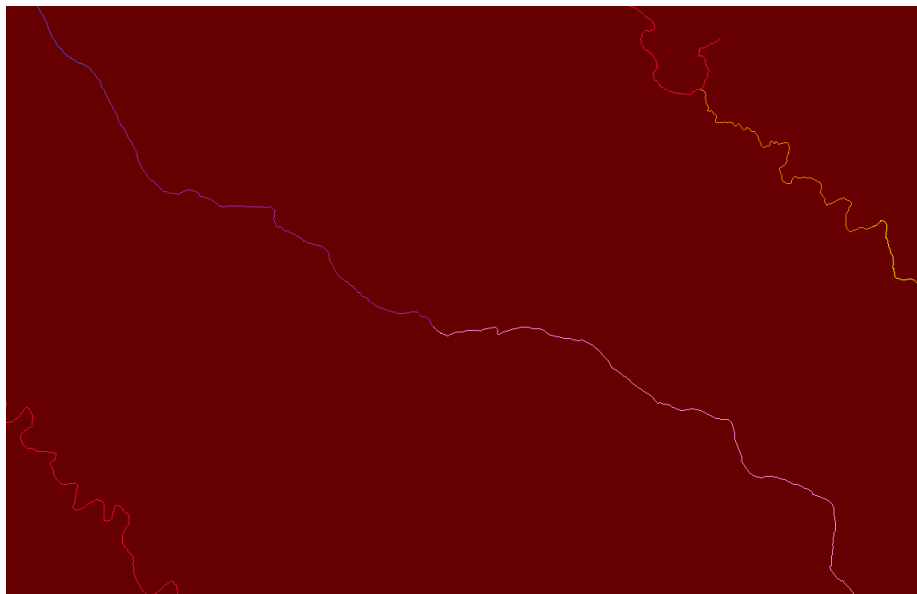


FIGURE 1.3 – MNT caractérisant l'écoulement superficiel

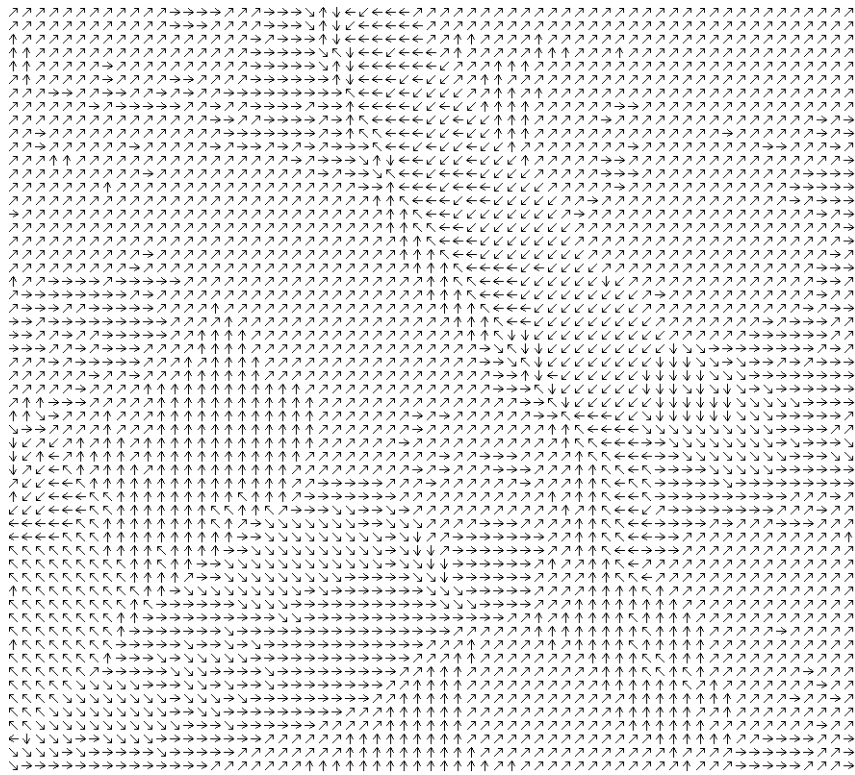


FIGURE 1.4 – MNT caractérisant les directions de drainage

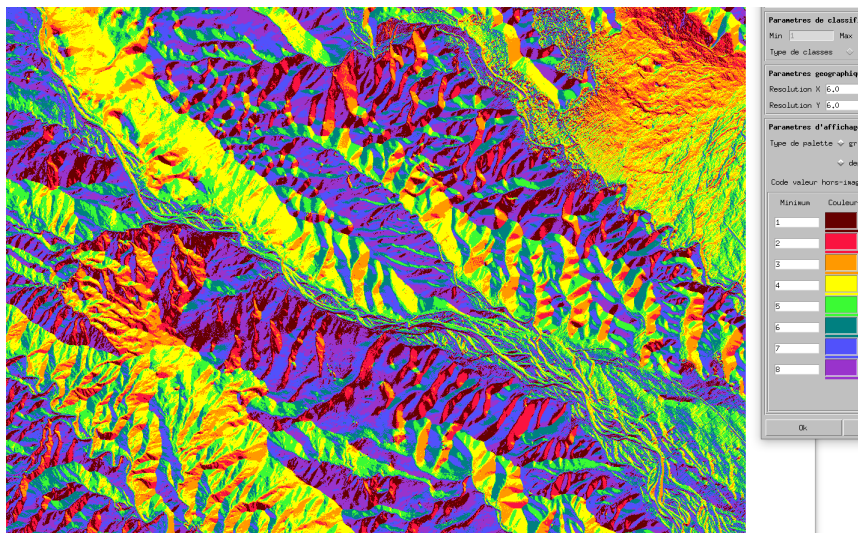


FIGURE 1.5 – MNT caractérisant le réseau de pente

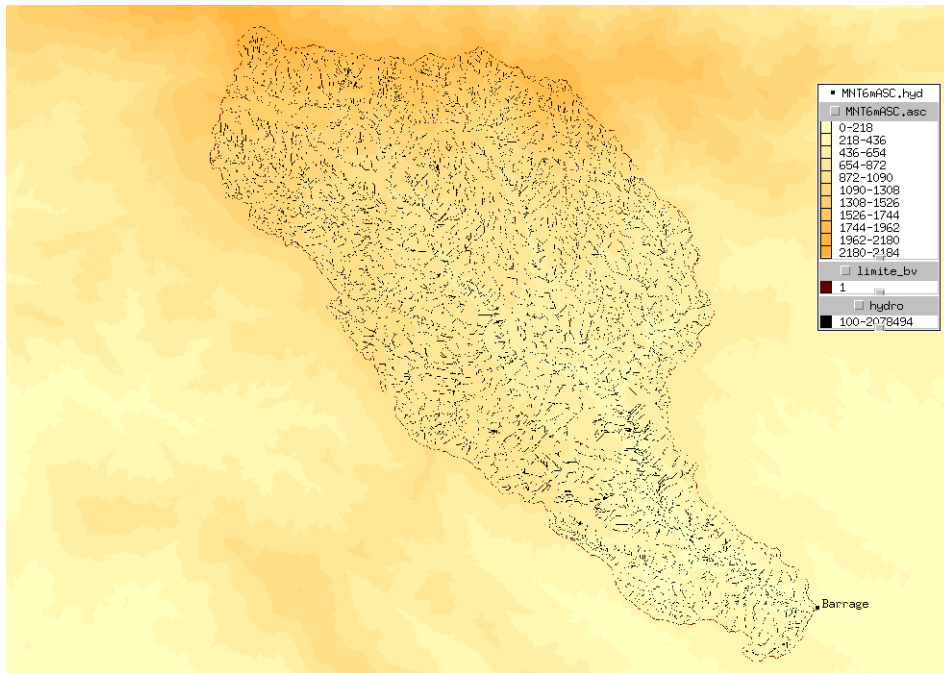


FIGURE 1.6 – Bassin versant et réseau d'écoulement superficiel

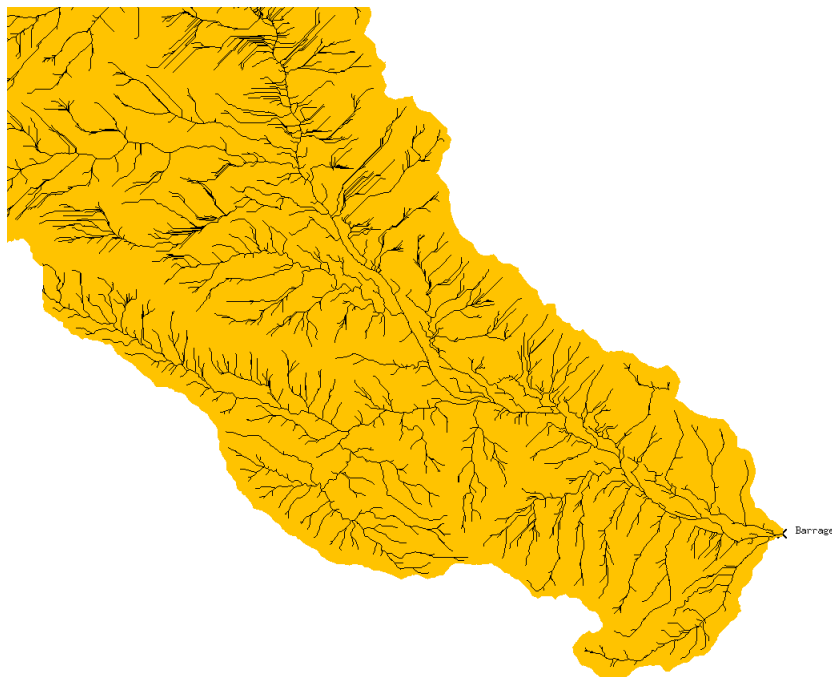


FIGURE 1.7 – Bassin versant et réseau d'écoulement superficiel (zoom)

Tous ces nouveaux éléments sont visibles, modifiables et superposables les uns aux autres dans QGIS, ce qui permet in fine de constituer une carte avec les informations indispensables du site (figure 1.8).

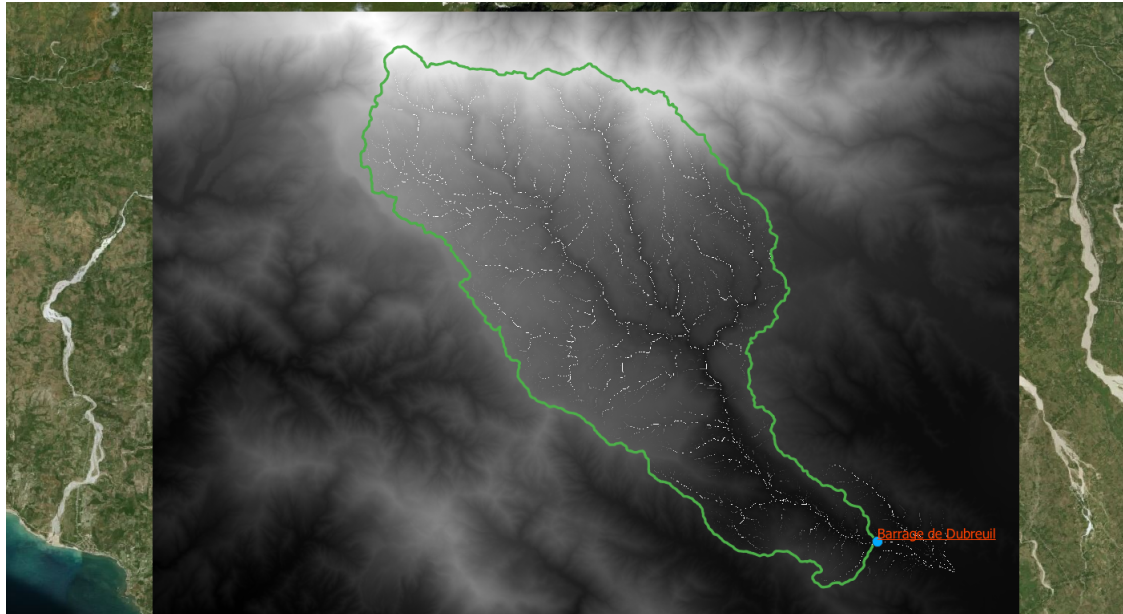


FIGURE 1.8 – Réalisation de la carte finale sur QGIS

Une coupe sur le MNT a été faite dans QGIS pour apercevoir le profil du terrain à l'amont et à l'aval du barrage, ainsi que sa crête. A la figure 1.9, on constate l'absence de dénivelé important entre le niveau du sol à l'amont du barrage et la crête de barrage. Dès lors, la première supposition qui s'imposa à nous fut que le barrage soit « manquant » sur le MNT initial. Cette impression était possible étant donné que ce type de modèle topographique ignore en principe les infrastructures construites. Dans ce cas, il aurait fallu demander des informations complémentaires sur la position du barrage, les dimensions du profil transversal de son parement, et sa longueur. Ainsi, la section transversale d'un éventuel réservoir aurait pu être estimée, et la hauteur maximale de la ligne d'eau par rapport au thalweg aurait pu être déterminée. En revanche, l'estimation du volume du réservoir aurait nécessité de poser des hypothèses sur l'irrégularité à l'amont du barrage des sections transversales du réservoir par rapport au thalweg, et des profils en long du terrain le long du parement. Dans cette situation, la future centrale hydroélectrique aurait été appelée « centrale à accumulation » car elle aurait été dotée d'un réservoir permettant une certaine régularisation du débit.

Afin de lever cette supposition, de plus amples informations ont été demandées concernant le dénivelé au niveau du barrage. Il nous a été renseigné que le barrage a été construit de sorte à être « posé » contre un dénivelé existant. Il n'y a donc pas de réservoir. Par conséquent, aucune hypothèse ne sera émise sur le volume du réservoir. Seules les dimensions du profil transversal et la largeur du parement seront donc les données géométriques de base de notre problème. Nous concluons que nous avons une « centrale au fil de l'eau ». De plus, il est important de préciser que les centrales de ce type sont soumises à de fortes variations de débits dans la mesure où la quantité d'eau qui entre dans la turbine dépend fortement de la pluviométrie de la région et sa saisonnalité. De plus, les fluctuations importantes influenceront également le choix de la turbine à utiliser, son mode de fonctionnement, son temps de fonctionnement, et les périodes de maintenance.

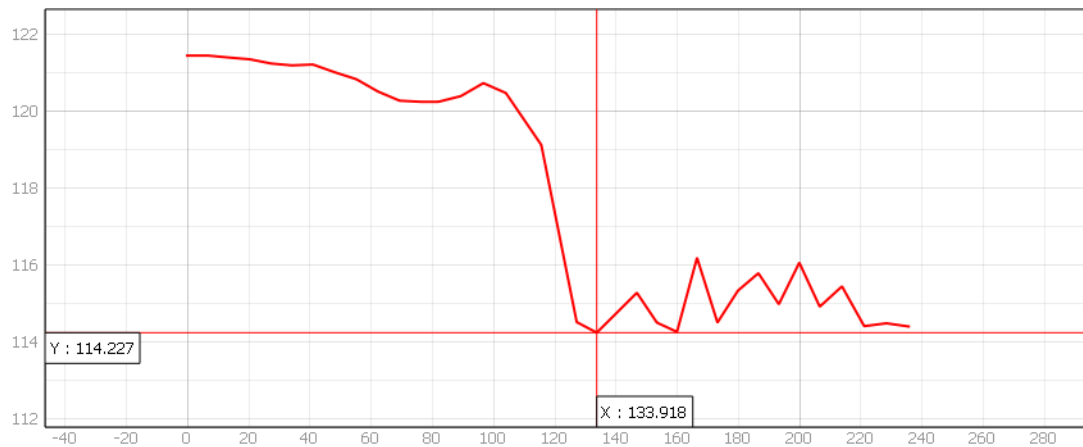


FIGURE 1.9 – Profil en long du terrain en amont et en aval du barrage

Chapitre 2

Climat et données pluviométriques et débitométriques

2.1 Climat en Haïti

En Haïti, le climat y est tropical¹ ; il se caractérise par une saison sèche et une saison humide avec des niveaux de précipitations et températures extrêmes. La saison des pluies s'étend environ du mois d'avril au mois de juin puis d'octobre à novembre ; cette durée peut varier à cause du réchauffement climatique.

Piste de réflexion proposée : Pour connaître l'évolution des températures qui règnent lors des saisons sèches et humides, il faudrait en faire une moyenne mensuelle par an de 2009 à 2019. Les données de températures sont accessibles via le site GIOVANNI [7].

2.2 Récolte de données pluviométriques et débitométriques

2.2.1 Instruments de mesures pour les pluies et les débits

Les données de pluies sont collectées par des stations pluviométriques via des instruments de mesures répandus sur l'ensemble du bassin versant. Chacun collecte l'eau sur une étendue d'environ $0.04m^2$ horizontal². La mesure des précipitations se fait soit avec un pluviomètre soit avec un pluviographe.

1. *Climat tropical*, 2020, 3 juin 2020, https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_tropical

2. Il s'agit de la surface de la projection sur un plan horizontal d'une partie de l'étendue du bassin versant. Ainsi, nous faisons abstraction du relief du terrain.

L'instrument le plus utilisé est le pluviomètre (figure 2.1). Il s'agit d'un seau qui stocke l'eau tombant à l'intérieur d'un entonnoir dont le trou est de très petite taille pour limiter l'évaporation de l'eau collectée dans le fond du seau³. Il est vidé selon la fréquence de la mesure⁴ choisie dans une éprouvette graduée.

Le second instrument, le pluviographe, à la figure 2.2, est composé de 2 « augets basculeurs »⁵. Le dispositif bascule grâce au moment de force exercé par le poids de l'eau dans un des augets, ce qui permet au second de se remplir.

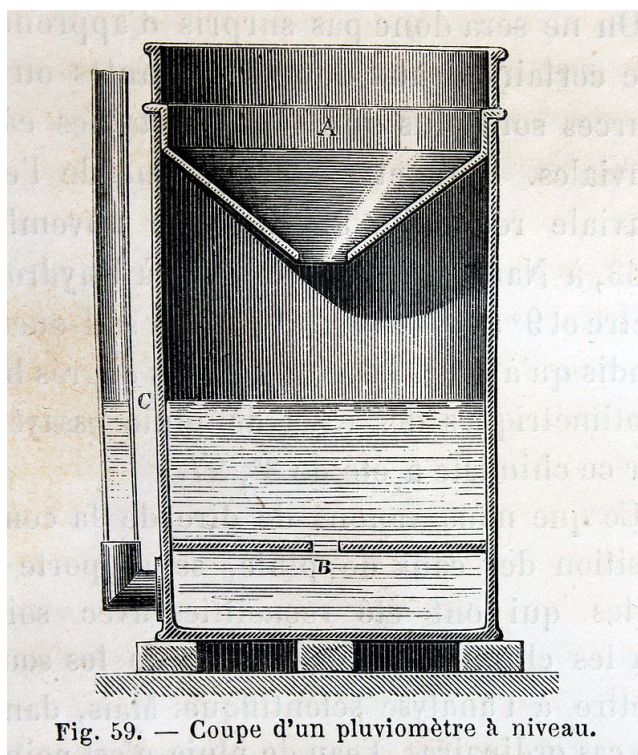


Fig. 59. — Coupe d'un pluviomètre à niveau.

FIGURE 2.1 – Pluviomètre

3. *Pluviomètre*, 2020, 18 juin 2020, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pluviom%C3%A8tre>

4. Il est intéressant d'ajouter que lorsque que la prise de mesure se fait durant une averse, la mesure apparaîtra comme étant une demi-averse.

5. *Pluviographe*, 18 juin 2020, <http://hydroval.free.fr/liens.html>

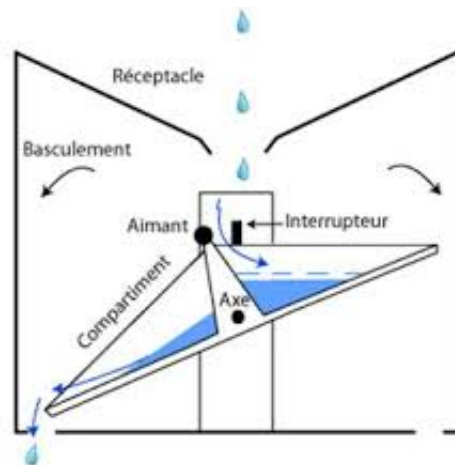


FIGURE 2.2 – Pluviographe à 2 augets basculeurs

La présence de plusieurs instruments de pluie (seau et/ou augets basculeurs) permet de prendre en considération l'hétérogénéité de la pluie tombée sur un bassin versant. En effet, à chaque pluviomètre y est associé une zone d'influence, autrement dit une surface A_i sur laquelle tombe une pluie d'intensité I_i mesurée par le pluviomètre i . Dès lors, l'intensité moyenne sur l'ensemble du bassin versant sera calculée selon la formule⁶ :

$$I_{moy} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i I_i.$$

D'autres instruments de mesures, tels que les débitmètres, sont utilisés pour mesurer les débits disponibles dans les cours d'eau principaux, leurs affluents, et les débits au niveau du barrage.

2.2.2 Importance de ces mesures

Toutes ces données de pluie et de débits sont d'une importance capitale dans l'élaboration d'un prédimensionnement de centrale hydroélectrique de toute taille. En effet, elles permettent de connaître les intensités de pluie⁷ et de débit au niveau de la crête de barrage, qui est l'exutoire du bassin versant. De plus, il est important de se rappeler à ce stade de notre réflexion que c'est la connaissance de l'évolution du débit et de la hauteur de chute d'eau qui permettront d'évaluer la capacité du site en terme de viabilité technique et donc la possibilité d'y installer une turbine et de la dimensionner au mieux. Le type de turbine est choisi en fonction du diagramme débit-hauteur de chute d'eau

6. Cette méthode de calcul est appelée méthode de Thiessen.

7. Les pluies sont caractérisées par la hauteur de précipitation dont l'unité est le mm : $1mm = \frac{1L}{m^2}$. Le m^2 est également horizontal. L'intensité de pluie est la hauteur de précipitation sur un temps donné. Elle s'exprime en mm .

$Q - H$ que nous verrons plus loin.

Nous comprenons donc qu'il est primordial d'avoir des données les plus fiables possibles de pluies et de débits. A ce jour, nous constatons toutefois qu'aucune mesure de ce type a été prise sur le bassin versant de Dubreuil et dans la rivière d'Acul du Sud. Dès lors, il a fallu trouver une approche innovante pour pallier au manque considérable de données.

2.2.3 Approche en cas de données manquantes

L'approche proposée est la collecte de données de pluies prises par les satellites de la NASA. Elles sont disponibles sur le site de GIOVANNI sous le format .csv (figure 2.3). La démarche pour y parvenir est la suivante :

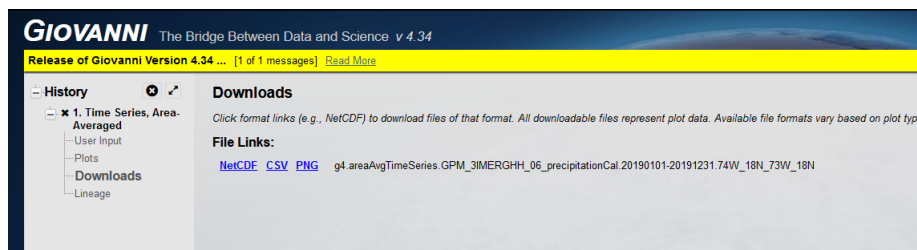


FIGURE 2.3 – Format des fichiers de sortie de GIOVANNI

1. Pour les récolter, il a fallu sélectionner la série chronologique qui calcule des moyennes spatiales d'une variable donnée (les précipitations) sur une région sélectionnée par l'utilisateur, et ce à chaque pas de temps (la fréquence de la mesure) sur un intervalle de temps choisi par l'utilisateur. Chaque valeur moyenne prise à une fréquence choisie est représentée dans un graphe en fonction de l'intervalle de temps de l'utilisateur. A titre d'illustration, nous pouvons voir sur la figure 2.4 que la série chronologique choisie est : « Times Series : Area-Averaged ».
2. Nous devons choisir un intervalle de temps. Pour notre modèle, il a fallu récolter des données de 2009 à 2019 pour avoir une prise de mesure suffisamment longue. D'ailleurs, les données de précipitations et de débits in situ sont généralement prises sur une période assez longue (10 ans à 30 ans) pour pouvoir faire une étude de faisabilité d'une centrale hydroélectrique. Sur le site de GIOVANNI il est possible, pour Haïti précisément, de prendre des données jusqu'à 20 ans. Cependant, dans le cadre d'un développement d'une méthodologie de prédimensionnement de microcentrale hydroélectrique, le nombre d'années a été réduit de 20 ans à 10

ans. D'une part, il s'agit d'une durée de mesure usuelle pour une prise de mesure. D'autre part, une augmentation du nombre d'années ne changera aucunement la méthodologie à suivre.

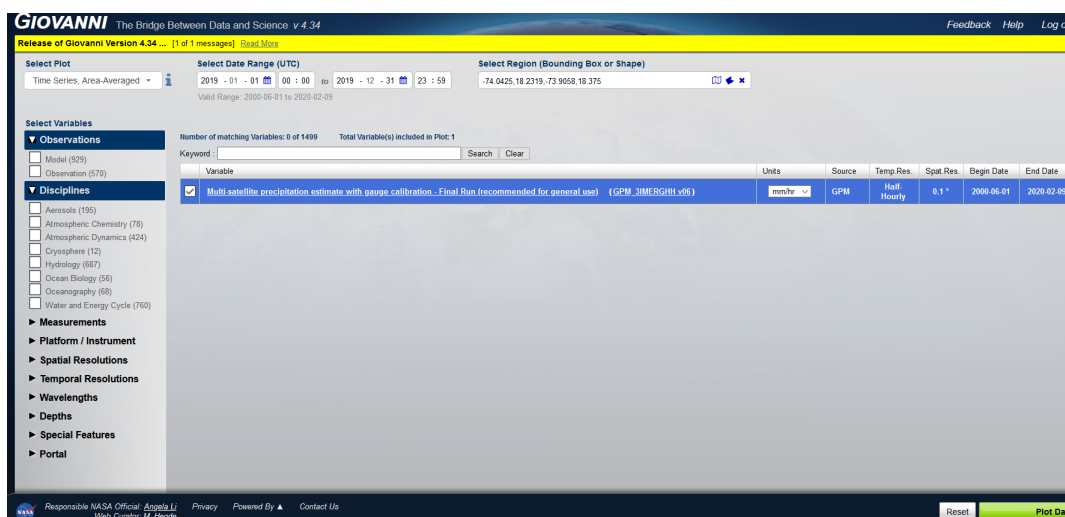


FIGURE 2.4 – Sélection des paramètres d'entrée sur GIOVANNI

3. Nous devons sélectionner une région sur laquelle les données seront prélevées. Dans un premier temps, tout le territoire haïtien avait été choisi. Cependant, en considérant une surface aussi large, nous surestimons largement la quantité de pluie brute qui s'écoulerait sur le bassin versant de Dubreuil. Dès lors, une maille carrée a été approximativement tracée sur GIOVANNI pour pouvoir restreindre la zone d'intérêt. Afin de vérifier l'étendue réelle de cette maille par rapport au bassin versant, il a fallu convertir les coordonnées géographiques utilisées dans QGIS⁸ à savoir le système de coordonnées de référence (SCR) WGS84 EPSG32618 en longitudes et latitudes exprimées dans le SCR WGS84 EPSG4326. Nous avons constaté lors de notre étude que la maille était à nouveau trop large. Par conséquent, pour avoir la maille la plus proche du bassin versant, nous avons placé 4 sommets dans QGIS de sorte que le carré qui l'encadre soit le plus petit. Ensuite, nous avons converti uniquement les sommets inférieur gauche et supérieur droit dans le SCR WGS84 EPSG4326, et nous l'avons écrit dans le format utilisé dans GIOVANNI (figure 2.5).

8. Il est possible de choisir différents types de système de coordonnées de référence. Il a été choisi librement de travailler dans le système WGS84 EPSG32618 dont la position de chaque point est donnée selon les variables X , Y , Z .

Nous avons in fine une maille de $233km^2$ qui englobe l'entièreté du bassin versant, et qui correspond à la portée du satellite. La valeur de $233km^2$ provient de la mesure de la maille sur QGIS.

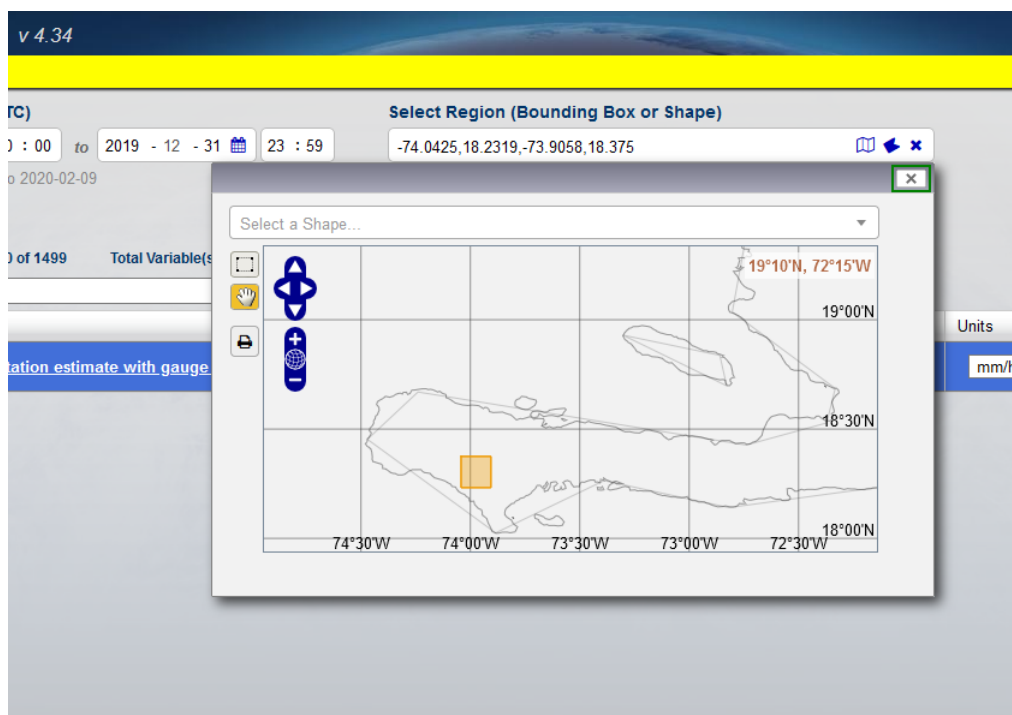


FIGURE 2.5 – Représentation de la maille du satellite sur GIOVANNI

4. A présent, nous devons choisir le type de mesure : "Précipitations".
5. Nous fixons le type de résolution spatiale qui correspond à l'étendue d'une maille carrée. Nous avons choisi la résolution la plus petite pour avoir une mesure plus précise parmi les différentes résolutions spatiales proposées, à savoir une maille carrée dont un côté peut valoir : 0.1° ; 0.125° ; 0.25° ; 0.5° ; 0.5×0.626 soit 0.3125° ; 0.5×0.667 soit 0.3335° ; 1° ; 1.25° . Pour rappel, 1° correspond à $111.319km$ à l'équateur⁹, donc une résolution choisie de 0.1° correspond à une maille de $11km \times 11km$ soit $121km^2$. Cette surface comprend en grande partie le bassin versant de $74.16km^2$ mais pas la totalité en vue de sa forme géométrique irrégulière.

9. *Coordonnées géographiques*, 2020, 4 juin 2020, https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonnées_géographiques

6. Nous devons imposer la résolution temporelle qui n'est autre que la fréquence de mesure. Il est possible de choisir des données mensuelles, journalières, trihoraire, horaire et demi-horaire. A ce stade-ci, une comparaison a été établie entre les intensités des précipitations prises par 2 satellites de même résolution ¹⁰ et dont la fréquence de mesure et le type de prise de mesure diffèrent. Pour ce faire, nous choisissons de comparer des précipitations journalières prise par un satellite ¹¹ A et des précipitations mensuelles ¹² prises par un satellite B de 2009 à 2019. Les précipitations journalières du satellite A ont été sommées pour avoir des précipitations mensuelles et ensuite pour les comparer aux précipitations mensuelles du satellite B. Nous constatons, à la figure (**à la figure**) 2.6, que globalement les résultats sont identiques à quelques erreurs ¹³ près. Nous concluons que malgré que les types et fréquences de prise de mesure soient différentes pour A et B, la valeur de l'intensité de pluie n'est pas altérée significativement, à quelques résultats près. Piste de réflexion proposée : Il serait intéressant de faire une comparaison similaire entre : des données journalières et horaires ; des données horaires et demi-horaire. Cela permettrait de vérifier si les résultats présentent ou non de moins en moins d'écart lorsque la fréquence de la prise de mesure augmente.

Remarque : Une comparaison a été faite entre les satellites de résolution différentes, de type de prise de mesure différente et de même fréquence de mesure. Nous avons constaté que la résolution altère grandement la mesure.

Piste de réflexion proposée : Il serait intéressant de voir l'influence du type de

10. A un modèle de satellite (ou instrument de mesure) est associé une et une seule résolution spatiale. Les seuls paramètres qui permettent de comparer un même instrument sont la fréquence de prise de mesure et le type de mesure.

11. Satellite GPM de résolution 0.1° dont le type de mesure est "Daily accumulated precipitation (combined microwave-IR) estimate - Final Run daily ()". Il est disponible sur le site : https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=2009-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-74.0425,18.2319,-73.9058,18.375&data=GPM_3IMERGDF_06_precipitationCal&variableFacets=dataProductTimeInterval%3Adaily%3B&dataKeyword=precipitation&portal=GIOVANNI&format=json.

12. Satellite GPM de résolution 0.1° dont le type de mesure est "Merged satellite-gauge precipitation estimate - Final Run (recommended for general use)". Il est disponible sur le site : https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=2009-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-74.0425,18.2319,-73.9058,18.375&data=GPM_3IMERGM_06_precipitation&variableFacets=dataProductTimeInterval%3Amonthly%3B&dataKeyword=precipitation&portal=GIOVANNI&format=json.

13. L'erreur a été calculée comme étant la différence en valeur absolue entre 2 intensités de pluies rapportée à l'intensité dont la fréquence de mesure est la plus petite.

mesure prise sur la valeur des intensités de précipitation.

Vérification de l'erreur entre les précipitations mensuelles de 2 satellites GPM de même résolution dont la prise de mesure diffère		
Précipitation mensuelle mm	Précipitation mensuelle mm	Erreur %
54.28176511	70.51705024	29.91
117.5511604	117.5511718	0.00
38.84028877	46.26594809	19.12
133.445579	133.4455632	0.00
326.1464663	326.1464742	0.00
150.7144237	150.7144298	0.00
89.26384298	89.26385074	0.00
175.3949666	175.3949548	0.00
121.9715644	121.9715777	0.00
226.8685989	226.8684758	0.00
101.4820785	101.4820646	0.00
189.8011942	189.8011935	0.00
24.93746265	61.88460282	148.16
14.15370667	16.92487964	19.58
7.077189	24.33203335	243.81
147.7545459	147.7545264	0.00
251.1964925	251.1964566	0.00
241.8572948	241.8571901	0.00
221.6222733	221.6222498	0.00
152.1010353	152.1009971	0.00
315.1529592	315.1528646	0.00
245.7147482	245.7147323	0.00
309.6920862	309.6921017	0.00
141.3292999	141.3292773	0.00
49.07563328	49.07562949	0.00
91.53838808	91.53838378	0.00
54.33125166	55.30349495	1.79
78.80815402	78.80815584	0.00
116.4684438	116.4684258	0.00

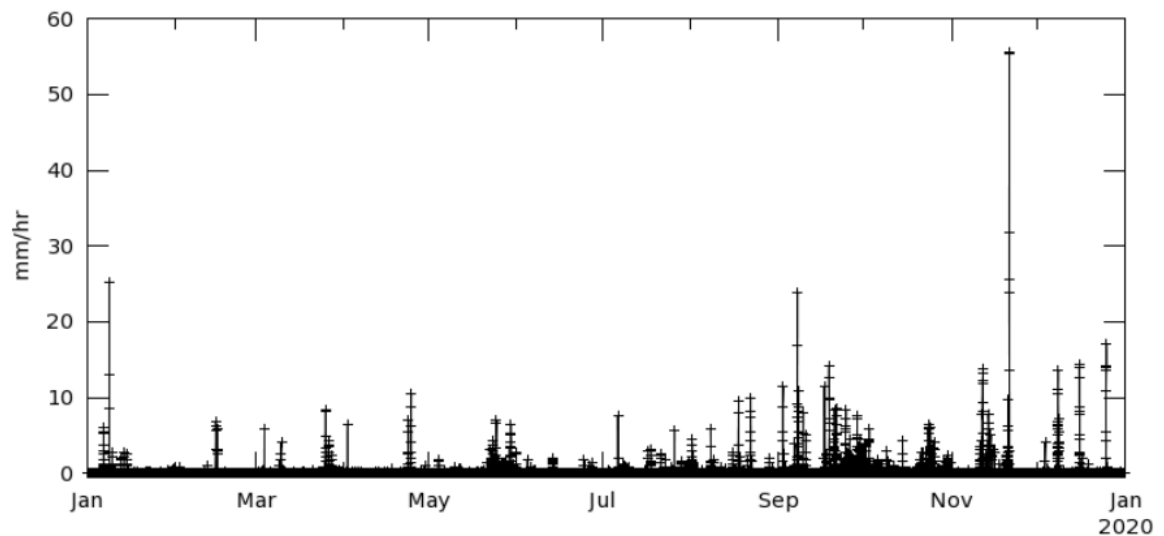
FIGURE 2.6 – Calcul de l'erreur entre les données de précipitations mensuelles de 2 satellites

Au terme de cette démarche, nous avons collecté des données de pluies écoulées sur une maille de $233km^2$ qui englobe l'entièreté du bassin versant, figure 2.7. Cette méthode suppose de poser une première hypothèse : la pluie tombée sur le bassin versant sera considérée comme étant homogène. Cette hypothèse soulève également des pistes de réflexion supplémentaires :

Piste de réflexion proposée : Nous savons qu'une pluie est hétérogène sur un bassin versant. En effet, l'intensité de pluie à un endroit du bassin peut être complètement différente à un autre endroit considéré, c'est d'ailleurs ce que prend en compte les réseaux de pluviomètres via la méthode qu'on appelle la méthode de Thiessen. Une analyse complémentaire qui pourrait être faite est de voir s'il est possible de prendre des mailles plus petites sur le bassin, prenons par 4 mailles satellitaires par exemple. Elles seraient représentatives de la pluie qui s'écoulerait sur une partie du bassin versant et auraient le même rôle qu'un pluviomètre. La surface de chaque maille risquerait d'être plus petite que la résolution du satellite donc il faudrait voir l'influence que ça aurait sur la valeur de l'intensité de pluie.

Piste de réflexion proposée : Pour voir à quelle point les données satellitaires se rapprochent des données de pluie, il faudrait les comparer à des mesures de précipitations prises par des pluviomètres ou pluviographes, en considérant une, puis plusieurs mailles satellitaires.

Time Series, Area-Averaged of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM GPM_3IMERGHH v06] mm/hr over 2019-01-01 00:00Z - 2020-01-01 00:00:00Z, Region 74.0425W, 18.2319N, 73.9058W, 18.375N



- The user-selected region was defined by 74.0425W, 18.2319N, 73.9058W, 18.375N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 73.95W, 18.25N, 73.95W, 18.35N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.
- Selected date range was 2019-01-01 00:00Z - 2019-12-31 23:59Z. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

FIGURE 2.7 – Simulation finale de la série chronologique des précipitations sur GIOVANNI

Chapitre 3

Modélisation de la dynamique de crue

3.1 Traitement de données hydro-climatiques

Afin de traiter des données hydro-climatiques et de développer un modèle hydrologique, nous allons utiliser à nouveau le logiciel Athys. Pour rappel, nous l'avons utilisé précédemment pour élaborer le modèle topographique grâce au module Vicair. Nous allons à présent utiliser les modules Vishyr et Mercedes pour cette partie de notre recherche.

Vishyr est le module d'Athys qui permet de visualiser des événements hydro-climatiques, autrement dit de tracer des hyétogrammes et hydrogrammes sur base de séries chronologiques de pluies et/ou débits (figure 3.1). De plus, il sert à convertir le format des séries collectées soit « .csv » ou « .txt » (figure 3.2) en format « .63 » lisible par la plateforme Mercedes d'Athys et inversement. Nous pouvons voir à la figure le résultat des conversions (**mettre la figure des conversion**) 3.3

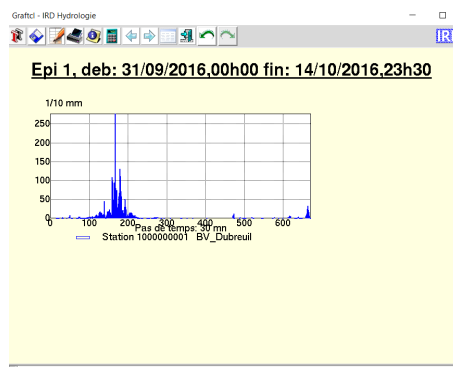


FIGURE 3.1 – Hyétogramme issu du module Vishyr de Athys

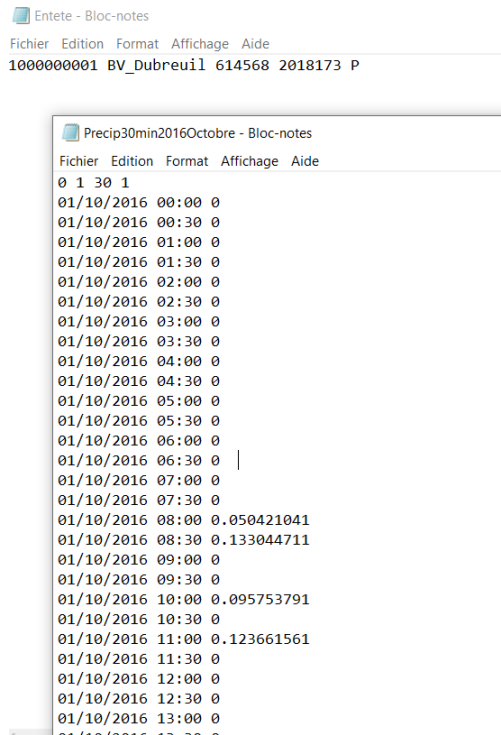


FIGURE 3.2 – Formats des fichiers d’entrée de Athys

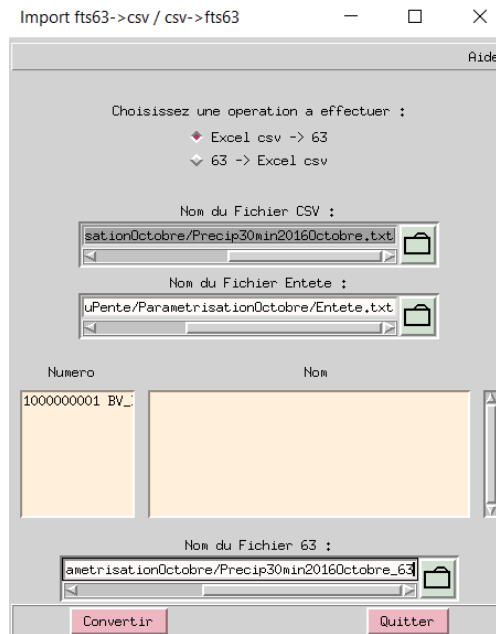


FIGURE 3.3 – Conversion des fichiers d’entrée dans le module Vishyr de Athys

3.2 Construction du modèle d'écoulement superficiel

3.2.1 Définition d'un modèle pluie-débit

Mercedes est le module qui modélise les écoulements superficiels. Dès lors, il nous servira à construire notre modèle hydrologique. Celui-ci utilise une série chronologique d'intensité de pluies collectées à une fréquence choisie sur un bassin versant sur une période donnée, comme sur la figure 3.4, pour établir un pronostique du volume total écoulé, de l'évolution du débit à l'exutoire en fonction du temps (figure 3.5), et en tenant compte du relief du terrain, la forme du réseau hydrique et des pertes hydrogéologiques. Des mesures de débit peuvent être intégrées dans le modèle, mais elles sont généralement plus complexes à mesurer que les précipitations. Par conséquent, la simulation se fait le plus souvent sur base de données de pluies disponibles.

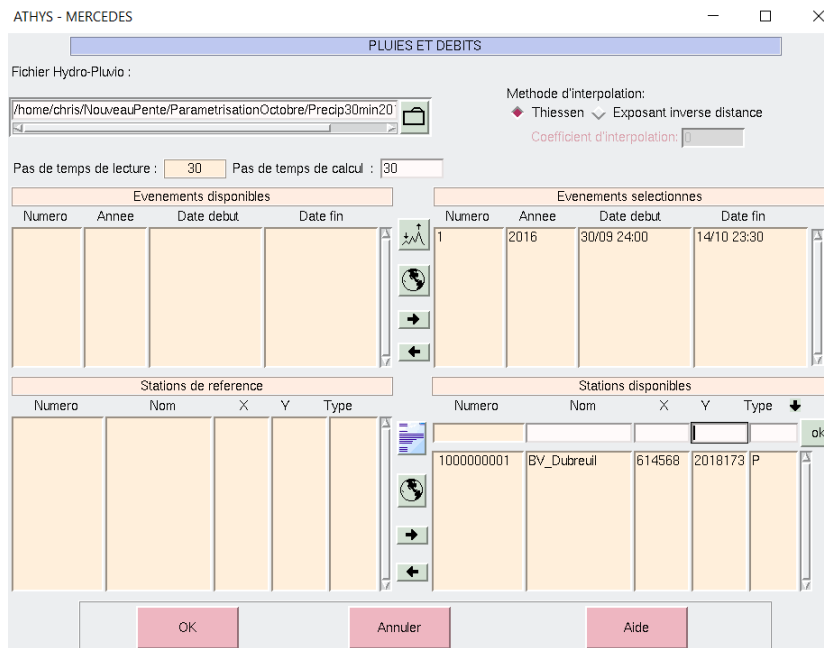


FIGURE 3.4 – Sélection des évènements de pluies dans le module Mercedes de Athys

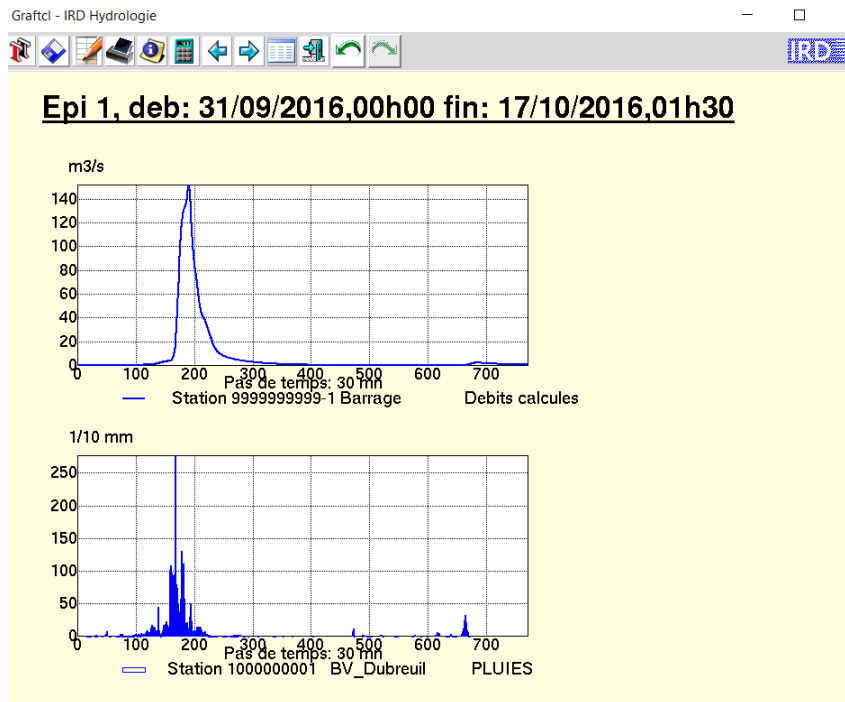


FIGURE 3.5 – Hyétogramme et hydrogramme simulés dans le module Mercedes de Athys

Le modèle est construit sur base de 2 fonctions : une fonction de production et une fonction de transfert. La fonction de production transforme les précipitations en pluies effectives, autrement dit disponibles pour qu'un écoulement en surface se produise. Pour ce faire, elle prend en considération les pertes par infiltration¹ dans le sol et par évapotranspiration². Il est possible d'appliquer différents types de fonction de production sur le maillage représentatif du bassin versant (MNT) pour tenir compte de l'hétérogénéité du sol[8]. Cependant, nous avons choisi d'appliquer une seule fonction de production sur l'entièreté du maillage, car la prise en compte du caractère non homogène du sol requiert une connaissance des paramètres physiques mesurés in situ.

La fonction de transfert sert d'une part à acheminer la pluie efficace à l'exutoire qui n'est autre que la crête de barrage. Ce ruissellement est influencé par le relief du terrain, la rugosité et la morphologie du réseau hydrique. D'autre part, elle peut représenter l'évolution du débit en fonction du temps à l'exutoire, appelé hydrogramme de crue.

1. Elles sont influencées par le couvert végétal et la perméabilité du sol.
 2. Elles sont influencées par le couvert végétal, la température, l'humidité relative, la radiation solaire et le vent.

3.2.2 Types de fonction de production

Fonction de production "SCS"[8]

Elle calcule la pluie efficace en tenant compte de la dynamique de rétention d'eau dans le sol par rapport aux précipitations tombées sur le bassin versant, et en considérant la quantité d'eau qui s'y exfiltre pour s'ajouter à l'écoulement superficiel de base comme nous le voyons sur l'image 3.6 issu du manuel Athys.

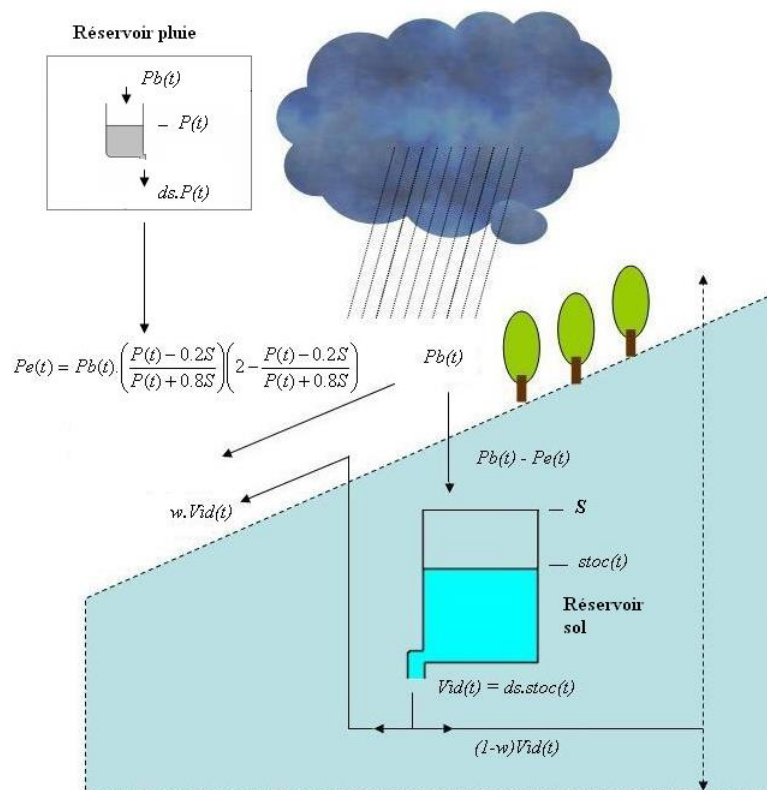


FIGURE 3.6 – Représentation de la fonction de production SCS

La fonction mathématique est la suivante :

$$P_e(t) = P_b(t) \cdot \left(\frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right)$$

- $P_b(t)$: précipitation brute écoulé au temps t en mm
- $P_e(t)$: pluie effective au temps t en mm
- S : capacité de rétention d'eau du sol en mm .

- $P(t)$: cumul de la pluie au temps t en mm
- ds : facteur de vidange du réservoir sol, exprimé en $jour^{-1}$. Il est physiquement proportionnel au niveau du réservoir.
- Ia/S : rapport entre le seuil de pertes initiales, à savoir celles par évapotranspiration et infiltration en mm , et la capacité maximale du réservoir sol en mm
- w : facteur adimensionnel de reprise de vidange. A la figure (**mettre la figure**) 3.11, le terme $wVid$ correspond à l'écoulement dit "retardé" car il s'agit de la quantité d'eau remontée en surface pour s'ajouter à l'écoulement superficiel. Le terme $(1 - w)Vid$ correspond à la quantité d'eau restante qui participe non seulement à l'évapotranspiration, mais également à alimenter les nappes souterraines.
- $\frac{dstoc(t)}{dt}$: variation de l'état hydrique du sol en mm/t .

Remarque : Nous avons opté pour la fonction « SCS » car les autres fonctions de production tel que « GreenAmpt » et « TopModel » nécessitent l'usage de paramètres physiques mesurés in situ et qui demeurent inconnus jusqu'à présent. De plus, les fonctions de production de type « Infiltration constante » et « Coefficient constant » représentent respectivement le rapport et la différence entre les précipitations brutes et efficaces sans tenir compte de la quantité d'eau remontée en surface. La fonction « Seuil constant » quant à elle modélise l'absence totale d'infiltration. Ces 3 fonctions ne sont donc pas adaptées pour modéliser au mieux le comportement global du bassin versant.

Piste de réflexion : Nous pourrions nous intéresser à l'application de différentes fonctions de production sur des zones cibles du bassin versant. Il faudrait donc faire des recherches supplémentaires sur la manière d'obtenir les variables citées plus haut, et décrire les méthodes de mesures sur site afin d'intégrer le caractère hétérogène de l'infiltration dans le sol.

3.2.3 Types de fonction de transfert

Fonction de transfert "Lag and Route" à maille indépendante[8]

Elle calcule l'hydrogramme élémentaire à l'exutoire produit par chaque maille élémentaire du bassin versant et les somme pour obtenir l'hydrogramme de crue finale. Les formules mathématiques utilisées sont :

$$\begin{cases} q_m(t) = 0, & \text{si } t < t_0 + T_m \\ q_m(t) = \frac{P_e(t_0)}{K_m} \exp\left(-\frac{t-(t_0+T_m)}{K_m}\right) \cdot A, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$Q_m(t) = A \cdot \int_{t_0}^{t-T_m} \frac{P_e(\tau)}{K_m} \cdot \exp\left(-\frac{t-T_m-\tau}{K_m}\right) d\tau$$

- P_e : pluie efficace déterminée la fonction de production
- A : surface de la maille élémentaire carrée régulière. Mercedes calcule automatiquement la superficie de chaque maille et donc également celle du bassin versant en les sommant. Pour ce faire, il suffit d'entrer les coordonnées géographiques du bassin versant et les MNT dérivés, à la figure 3.11, pour qu'Athys génère le bassin et puisse calculer sa superficie.
- T_m : temps de transfert ou de propagation entre la maille m et l'exutoire. Il est calculé sur base de la vitesse d'écoulement V_k et de la longueur l_k des mailles k comprises entre la maille m et l'exutoire. : $T_m = \sum \frac{l_k}{V_k}$
- V_k : calculé sur base de la pente³ de la maille k en mm/mm , de la superficie drainée⁴ par la maille k en km^2 et de μ . : $V_k = \mu I_k^\alpha S_k^\beta$
- α : coefficient adimensionnel de tarissement. Pour le déterminer, il faudrait des données de précipitations in situ. Beta est l'exposant adimensionnel lié à superficie de la maille. Celui-ci nécessite des recherches supplémentaires pour pouvoir le déterminer précisément. Etant donnée que ces 2 paramètres requièrent des mesures de pluies et des informations concernant la géologie du site dont on ne dispose pas, ils ont été posés à 0. Cette simplification implique que μ à la signification d'une vitesse exprimée m/s qui sera considérée comme étant constante sur l'ensemble du bassin versant. Ce paramètre peut être estimé en guise de première approximation sur base des formules empiriques du temps de concentration .
- K_m : temps de diffusion⁵ qui dépend de T_m . En effet, au plus la maille est éloignée, au plus le temps de diffusion est important. : $K_m(t) = K_0 T_m + K_1$
- $Q_m(t)$: sont les contributions élémentaires de la maille k à l'exutoire sur l'intervalle de temps $t > T_m + t_0$.

Il existe également la fonction de transfert « Onde cinématique » à maille interactive. Elle calcule à chaque pas de temps et sur chaque maille un bilan du volume stocké en tenant compte des apports amont, du stock initial au début du pas de temps et du volume écoulé vers l'aval. Les formules utilisées sont les suivantes :

3. Les pentes sont reprises dans le MNT des pentes du bassin.

4. Elle est déterminée à partir du MNT du réseau d'écoulements superficiels.

5. Le logiciel Athys utilise une relation linéaire entre le temps de diffusion et le temps de propagation. De plus, il stipule que dans le cas où la vitesse de propagation serait très grande (par exemple $V_k = \mu = 10000m/s$) T_m deviendrait petit et donc la relation linéaire entre $K_m(t)$ et T_m se réduit à $K_m = k_1$ exprimé en seconde. Dans la même idée, lorsque les vitesses de propagation sont faibles, $K_m = k_0 T_m$ où k_0 est adimensionnel.

$$Q = K \sqrt{S_0} R_h^{0.66} A$$

- K : coefficient de Manning-Strickler
- R_h : rayon hydraulique qui est le rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillé

Cette formule donne une meilleure interprétation physique de la dynamique de l'écoulement mais nécessite une connaissance précise de la rétention d'eau dans le sol, des zones de débordement du lit, de l'infiltration au cours de l'écoulement et requiert un taux d'échantillonnage (ou résolution spatiale) plus réduit ce qui augmente considérablement le temps de calcul[8]. Face au nombre considérable d'informations à connaître, et qu'ils seraient impossible de déterminer, nous avons choisi la fonction « Lag and route » à maille indépendante.

3.2.4 Identification des paramètres du modèle

Le modèle utilise les paramètres S , V_0 (ou μ), I_a/S , w , ds , K_0 , α et β . Pour rappel, α et β ont été fixé à 0. Les autres sont inconnus jusqu'à ce jour. Dès lors, nous avons posé une hypothèse sur les paramètres S et V_0 : ils ont été considérés comme étant approximativement égaux à ceux déterminés avec précision sur le bassin versant de Dory situé également dans le département Sud du site étudié. Par ailleurs, sur la carte géologique, à la figure 3.7, nous voyons que le type de sol est globalement approximativement identique à Dubreuil et Dory⁶, ce qui nous a amené à prendre ces valeurs. De plus, selon le manuel Athys, les paramètres I_a/S , w , ds et K_0 ont une influence minime sur les résultats finaux des simulations, ce qui implique que nous avons repris les valeurs proposées par Athys également en guise de première approximation. En vue de l'incertitude qui pèse sur la valeur de S et de V_0 , une analyse de sensibilité sera toutefois établie dans la partie suivante pour évaluer l'impact de leurs variations sur l'hydrogramme de crue.

Piste de réflexion : une recherche pourrait être faite afin de savoir comment déterminer la valeur de tous les paramètres et définir les méthodes de mesures.

6. BUREAU DES MINES ET DE L'ÉNERGIE D'HAÏTI, 18 juin 2020, <http://www.bme.gouv.ht/carte/index.html>

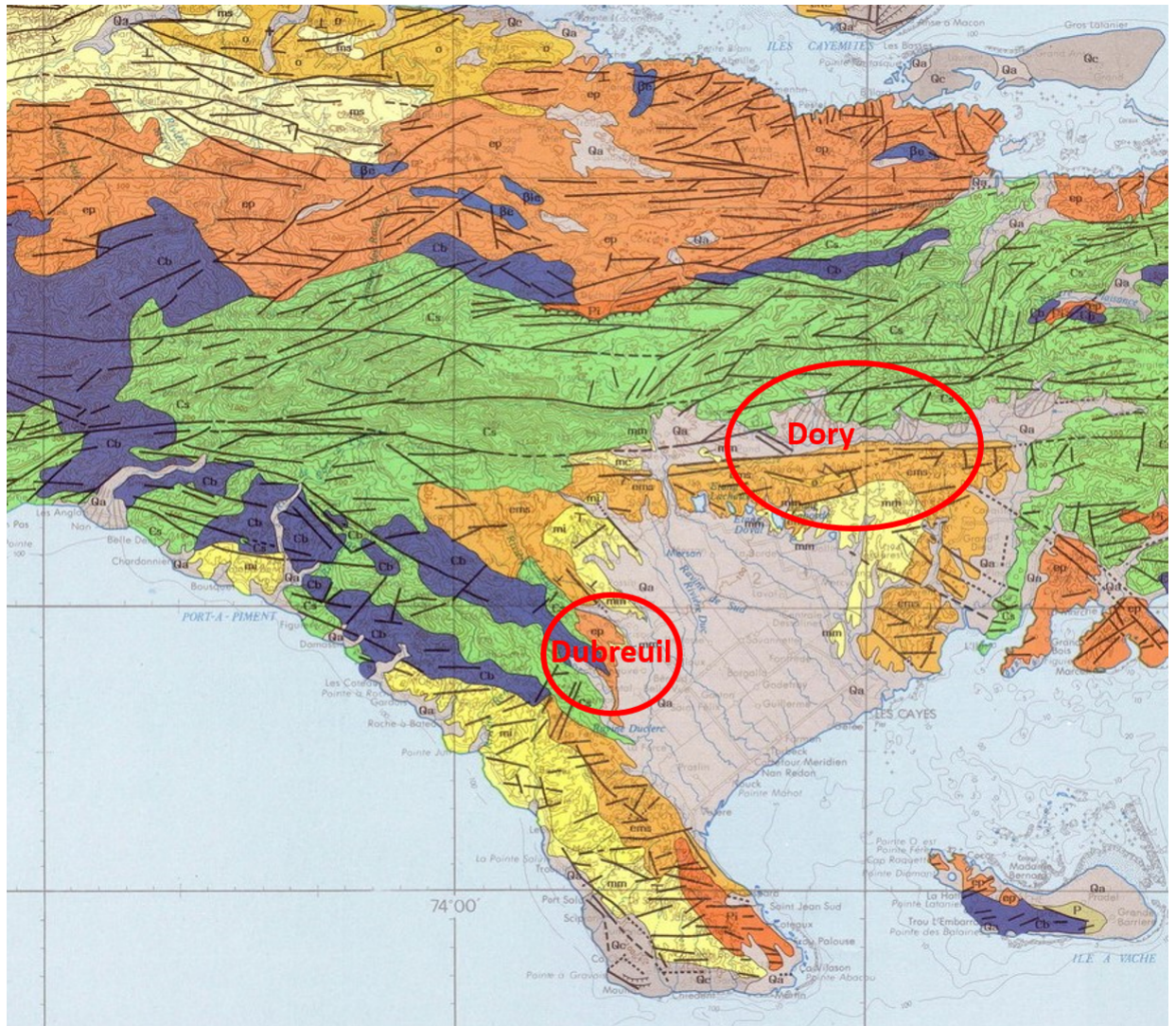


FIGURE 3.7 – Carte géologique du Département du Sud de Haïti

3.2.5 Fichiers d'entrée du modèle

Les fichiers à entrer dans Mercedes sont les suivants :

- La série chronologique des précipitations (sous format .txt ou .csv)
- Les modèles numériques de terrain dérivés notamment de ceux représentant : le relief *.alt* (figure 3.8), les pentes du terrain *.pen* (figure 3.9), le réseau de directions de drainage *.dr₁* et le réseau d'écoulement superficiel *.sbv* (figure 3.10). Nous pouvons également voir à la figure 3.11 que les coordonnées géographiques de l'exutoire ont été ajoutées.

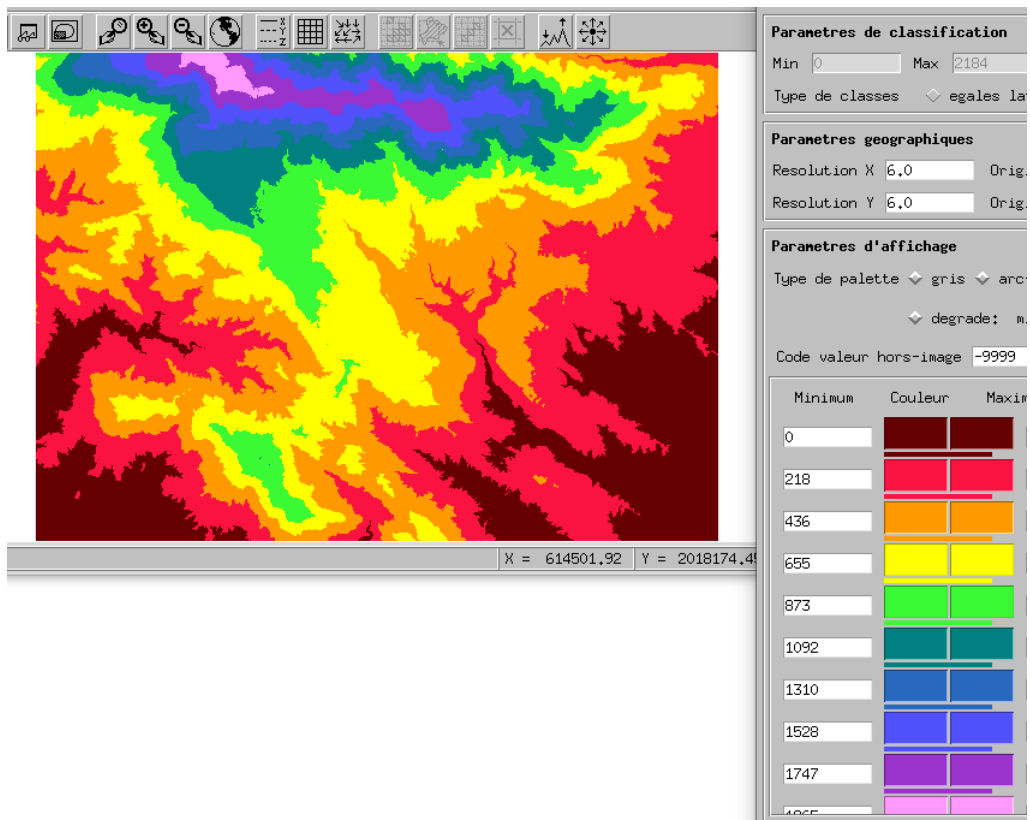


FIGURE 3.8 – MNT .alt à entrer dans le module Mercedes de Athys

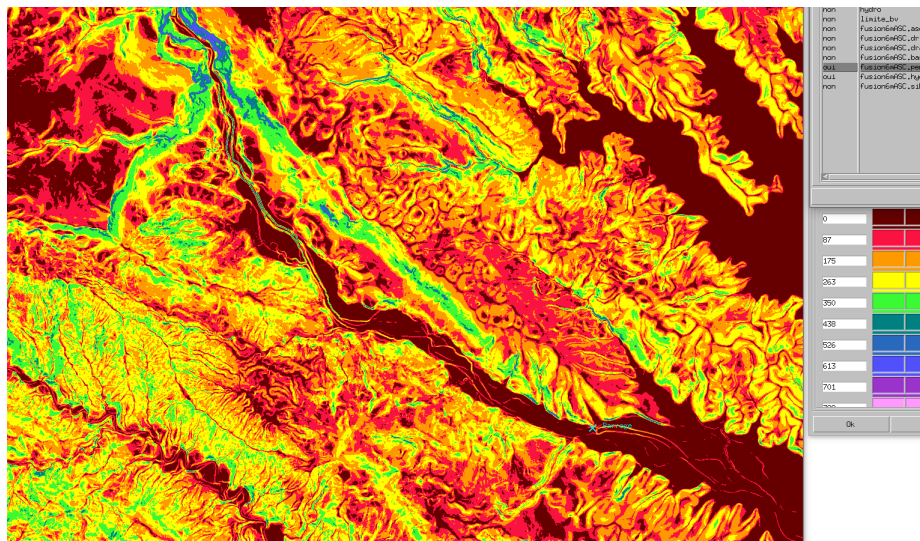


FIGURE 3.9 – MNT .pen à entrer dans le module Mercedes de Athys

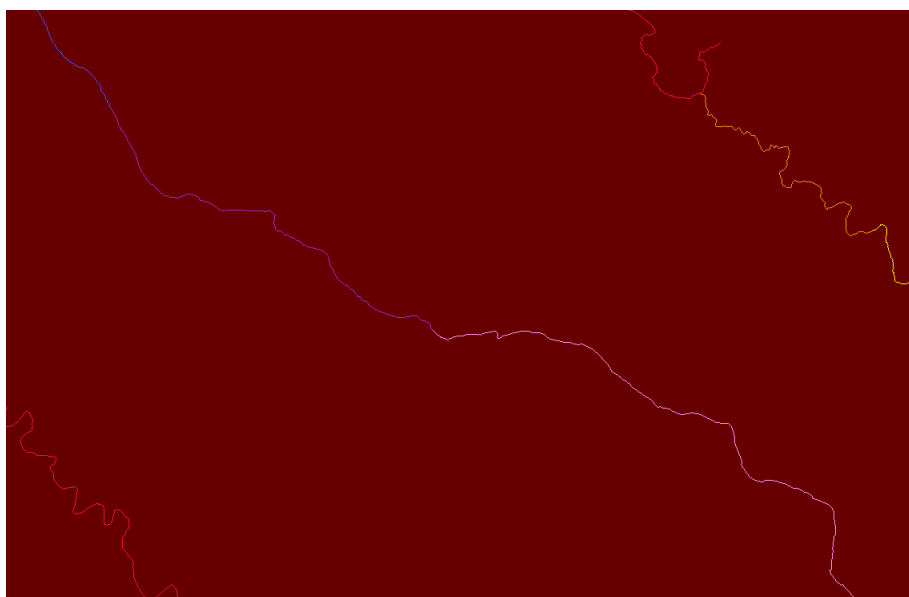


FIGURE 3.10 – MNT .sbv à entrer dans le module Mercedes de Athys

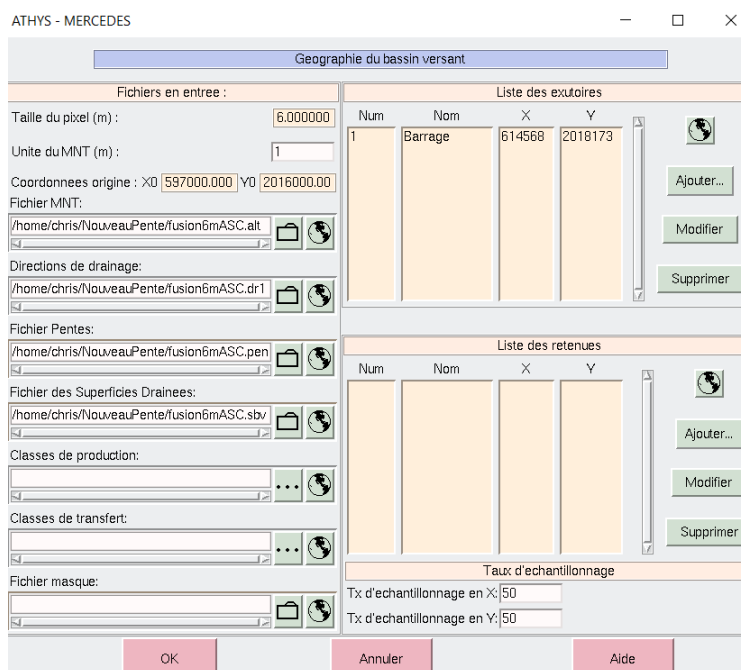


FIGURE 3.11 – Fenêtre de Mercedes indiquant les fichiers d'entrée et les coordonnées du bassin versant

3.2.6 Calage du modèle

Les options dans le logiciel permettant de caler le modèle sont[8] :

- Option « Taux d'échantillonnage » : la valeur proposée automatiquement par Athys est 50×50 . Il est possible de la réduire mais les résultats finaux demeurent quasi identiques. Cette affirmation est corroborée par le tutoriel d'Athys, notamment au moyen d'une image comparant 2 simulations à taux d'échantillonnage différent et à paramétrage des fonctions de production et de transfert similaire.
- Option « débit de base » : il est possible d'introduire dans le modèle le débit d'écoulé de base auquel s'ajoute les débits engendrés par les précipitations. Cependant, nous ne connaissons pas le débit de base que nous le considérerons par hypothèse comme inexistant.
- Option « Mode non continu/continu » : le mode non continu permet de considérer que le niveau d'eau dans le réservoir sol est constant lorsque les pluies se succèdent. Le mode continue considère que le niveau d'eau dans le réservoir varie en fonction de la succession des événements pluvieux par la formule $H_0 = H_1 \exp(-ds(t_0 - t_1))$. Etant donnée qu'il est difficile d'imposer une valeur initiale H_1 proche de la réalité, nous avons opté pour le mode non continu. Ce dernier ne nécessite pas la connaissance d'un niveau initiale mais plutôt de choisir un rapport I_a/S plausible qui n'est autre que la relation entre le seuil de perte initiale et la capacité du réservoir.
- Mode « Optimisation » : il consiste à calculer l'erreur entre les débits mesurés in situ et ceux calculés par le logiciel. Cependant, nous n'en ferons pas étant donné que nous ne disposons pas de données du terrain.

Piste de réflexion proposée : Il serait intéressant de réaliser des mesures sur site de débits pour caler au mieux notre modèle hydrologique et ensuite de choisir le(s) critère(s) d'optimisation proposé(s) dans le manuel Athys.

3.2.7 Analyse de sensibilité sur l'incertitude des paramètres des fonctions de production et de transfert

Nous avons établi une analyse de sensibilité sur l'incertitude sur les paramètres en les faisant varier tout en observant l'évolution de l'hydrogramme de crue. Ainsi, nous pouvons identifier les paramètres les plus influents pour le modèle. Pour ceux ayant l'influence la plus faible, nous nous contenterons de reprendre les valeurs proposées par le logiciel Athys.

Variation de S

Nous sommes partis de la valeur de S calculée avec précision dans la ville de Dory, et l'avons faite varier.

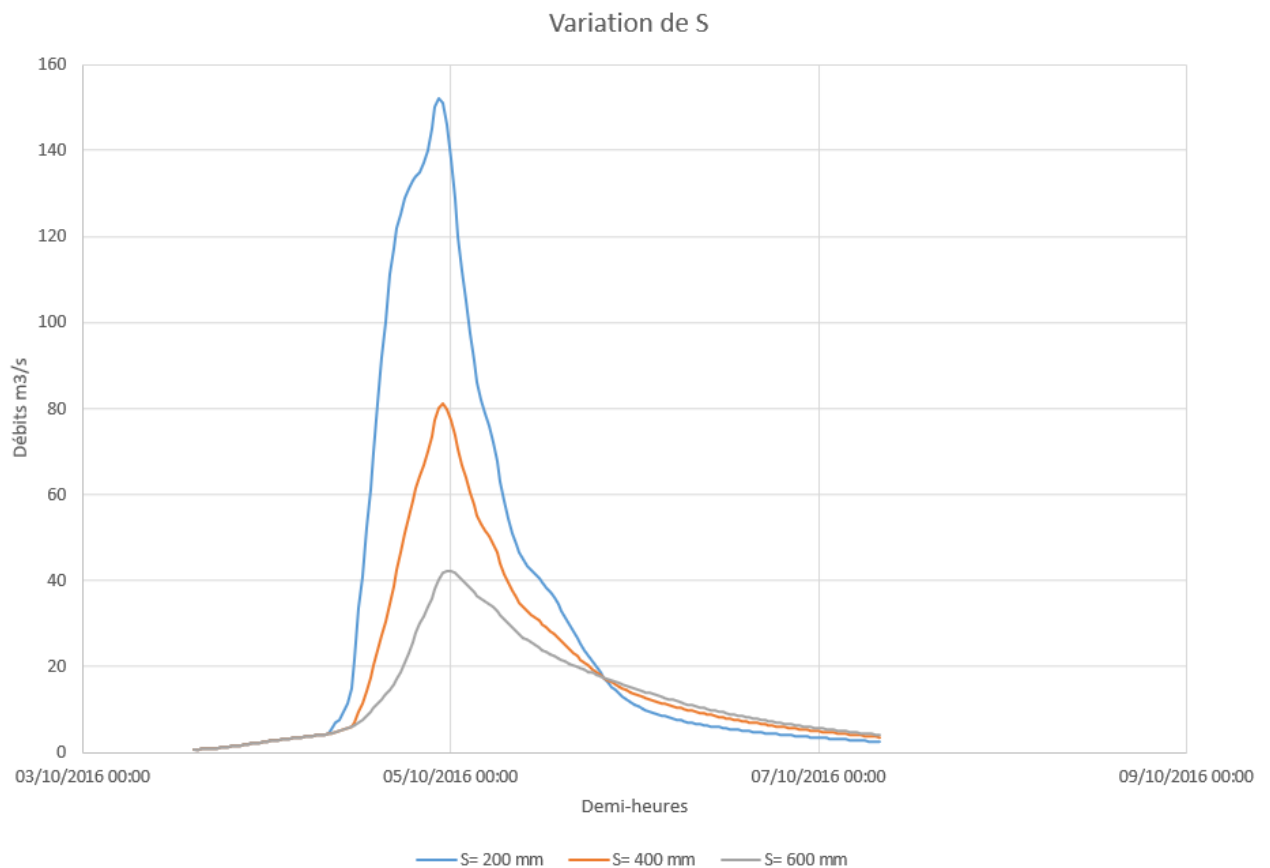


FIGURE 3.12 – Variation du paramètre S

Interprétation des résultats : S est le paramètre qui a le plus d'influence sur les résultats finaux. En effet, il joue un rôle important sur les volumes écoulés. Si S augmente, la capacité du réservoir sol augmente, et donc le volume écoulé à l'exutoire diminue.

Piste de réflexion proposée : Etant donné que S est le paramètre le plus influent, il serait intéressant de se pencher sur sa variabilité durant les saisons sèches et humides car la saturation d'eau dans sol fluctuerait certainement durant ces périodes-là.

Variation de V_0

Nous avons également repris la vitesse d'écoulement μ de Dory et procédé à une variation de cette valeur pour visualiser son impact sur les hydrogrammes. V_0 exprime la vitesse maximale atteinte à l'exutoire.

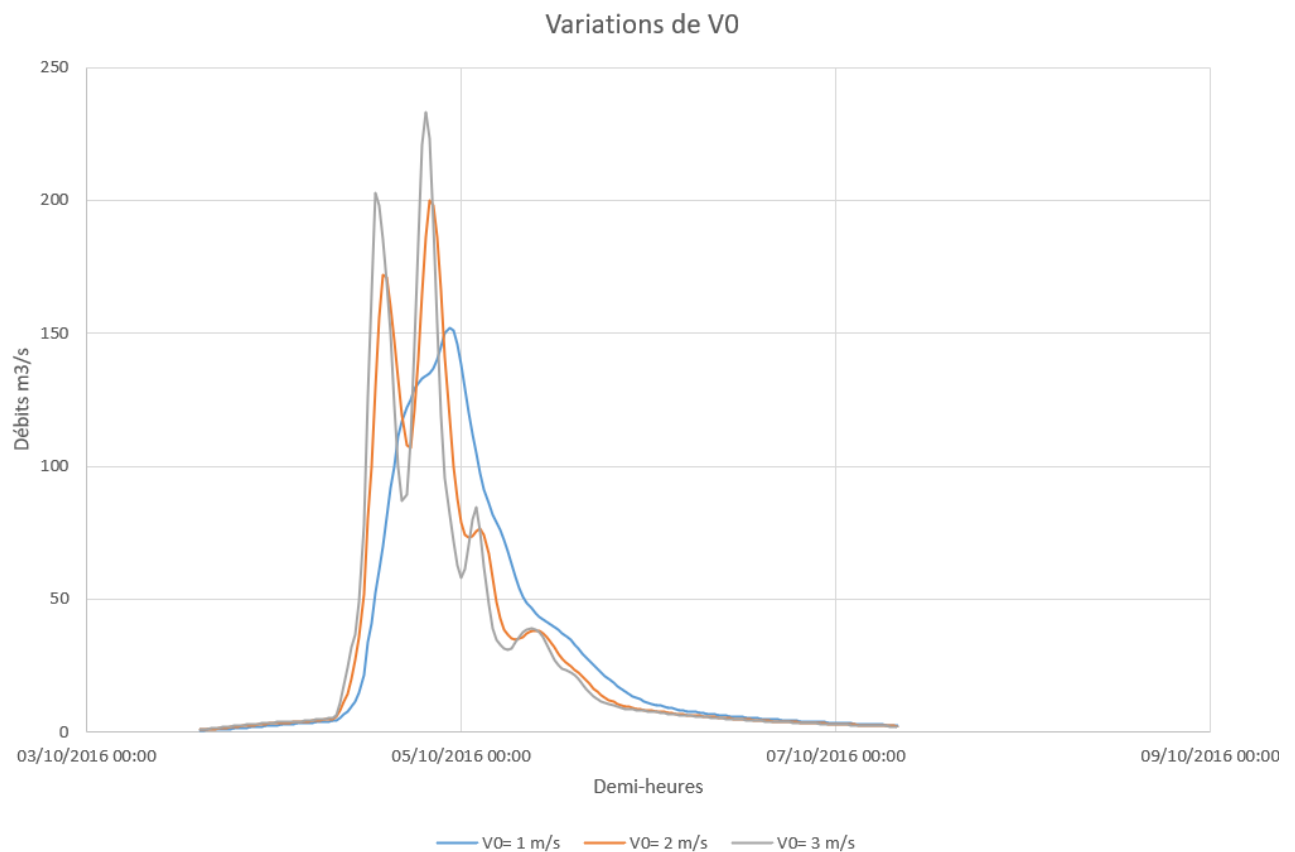


FIGURE 3.13 – Variation du paramètre V_0

Interprétation des résultats : V_0 a une influence moindre sur les hydrogrammes par rapport à S . En effet, nous le voyons en comparant l'écart entre les 3 courbes de la simulation

précédente et celle de notre simulation. Il a un effet sur le temps de montée et la position du maximum sans changer les volumes écoulés à l'exutoire. Lorsque la vitesse augmente, le temps de propagation diminue. L'écoulement se déroule plus rapidement à l'exutoire pour un même volume, et donc le temps de montée diminue. On le voit car la courbe est plus étroite et par conséquent vu que le volume est le même, le pointe de la courbe monte.

Variation de Ia/S

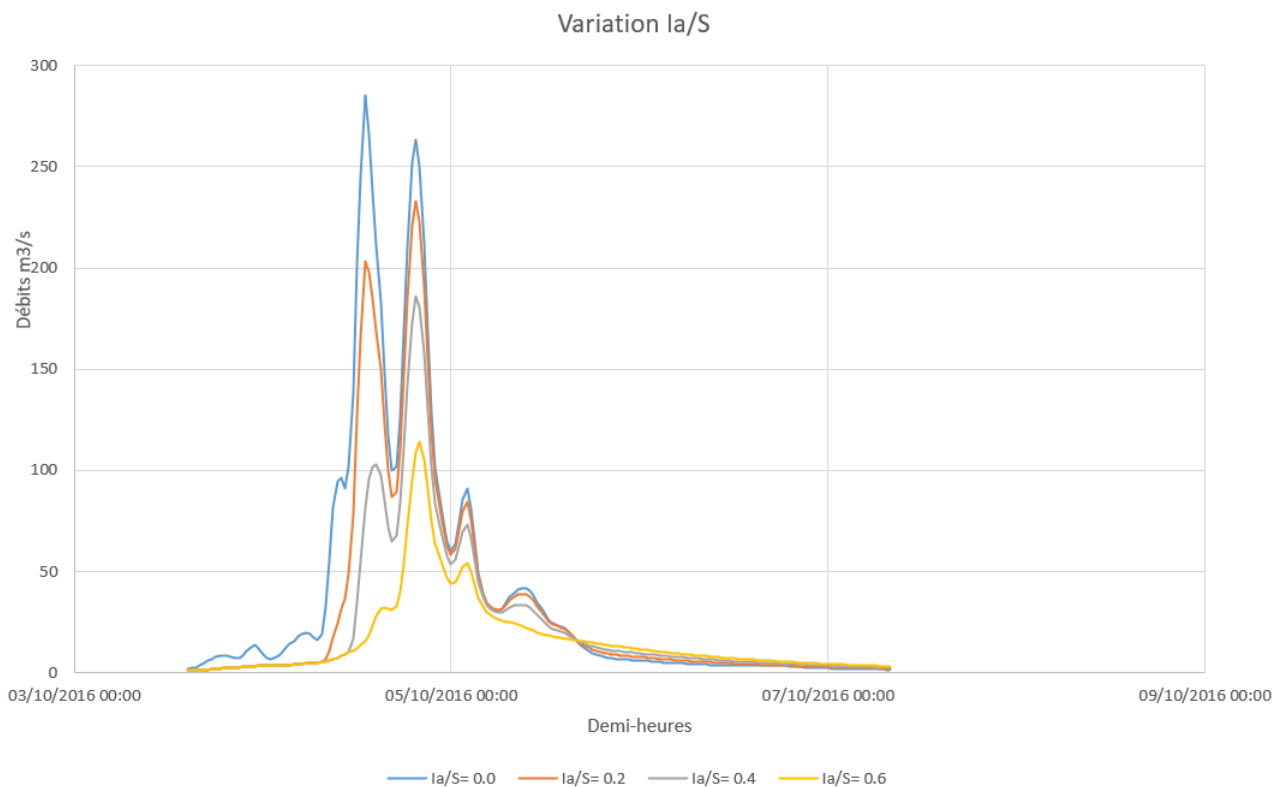


FIGURE 3.14 – Variation du paramètre Ia/S

Interprétation des résultats : Ia/S est pour rappel le rapport entre les pertes par infiltration/évapotranspiration et la capacité de ce réservoir. Il est un paramètre moins sensible face aux courbes obtenues d'après le manuel Athys. Néanmoins, nous avons voulu voir sa variabilité. Nous voyons que pour des valeurs de perte autour de 0.2, les courbes sont très proches. Une valeur de perte de 60% est un cas utopique.

Malgré que nous ayons choisi de faire varier les paramètres S et V_0 pour observer leur impact sur l'hydrogramme de crue, nous avons également faire des recherches

supplémentaires pour comprendre l'influence qu'ont les autres paramètres. Un rapport[9] réalisé par un chercheur de la Faculté Des Sciences Et Techniques Du Languedoc de l'Université Montpellier II, explicite la sensibilité de S , V_0 mais également de w , ds , K_0 :

- le variation de K_0 influence l'intervalle de temps où la pointe de l'hydrogramme s'étale.
- une augmentation de ds augmente le ruissellement retardé et donc augmentera le volume de pluies à venir qui s'ajoutera à la pluie efficace. Sur l'hydrogramme, on voit que les pointes qui suivent la première sont décalées vers le haut. Il fait partie des paramètres les moins sensibles.
- w influence la quantité d'eau exfiltrée. Si on augmente w , la pointe de l'hydrogramme de crue se déplace légèrement vers le haut mais cette influence est insignifiante sur les débits de crue. Il fait partie des paramètres les moins sensibles.

Suite à cette analyse de sensibilité, les paramètres finaux sont les suivants pour la simulation finale sont les suivants :

S (mm)	V_0 (m/s)	I_a/S (-)	w (-)	ds (j^{-1})	K_0 (-)	α (j^{-1})	β (-)
200	3	0.2	0.2	1	0.7	0	0

TABLE 3.1 – Paramètres finaux des fonctions de production et transfert

3.3 Résultats finaux de la simulation

Nous avons construit des tableaux de résultats ci-dessous :

Paramètres de sorties	2009	2010	2011
Volume tombé m^3	127979617.68	153701494.6	165623901.1
Volume ruisselé m^3	31611749.52	38906086.48	47617508.74
Débit max m^3/s	121.276	249.6819	174.6661
Date	23/12/2009	06/11/2010	10/10/2011
Durée de l'écoulement <i>heures</i>	8809	8809	8809

TABLE 3.2 – Résultats finaux de la simulation du modèle de 2009 à 2011

Paramètres de sorties	2012	2013	2014
Volume tombé m^3	179179904.2	87134440.32	108969220.8
Volume ruisselé m^3	52445774.43	17476214.8	22475713.26
Débit max m^3/s	257.58	7.6025	27.3469
Date	24/10/2012	03/11/2013	10/11/2014
Durée de l'écoulement <i>heures</i>	8833	8809	8809

TABLE 3.3 – Résultats finaux de la simulation du modèle de 2012 à 2014

Paramètres de sorties	2015	2016	2017
Volume tombé m^3	91586339.28	122513877.4	122513877.4
Volume ruisselé m^3	21573950.86	30380757.48	30139858.98
Débit max m^3/s	97.0964	233.19	120.481
Date	02/10/2015	04/10/2016	17/05/2017
Durée de l'écoulement <i>heures</i>	8809	8833	8809

TABLE 3.4 – Résultats finaux de la simulation du modèle de 2015 à 2017

Paramètres de sorties	2018	2019
Volume tombé m^3	96123151.44	102119803.20
Volume ruisselé m^3	19622511.08	22113086.47
Débit max m^3/s	20.5168	206.6253
Date	09/01/2018	21/11/2019
Durée de l'écoulement <i>heures</i>	8809	8809

TABLE 3.5 – Résultats finaux de la simulation du modèle de 2018 à 2019

Nous avons tracé la courbe représentant le rapport entre le volume de pluies nettes et brutes et nous constatons que la perte oscille entre 20% et 30%. Cela nous montre que la fonction de production de type "Infiltration constante" n'était pas adéquate pour la simulation. Nous avons également tracé les courbes de débits classés pour chaque année de 2009 à 2019, à la figure 3.16 pour voir les tendances d'une année à l'autre, ainsi qu'une courbe des débits classés sur 10 ans, à la figure 3.17, en fonction du pourcentage du nombre de demi-heures de dépassement sur 10 ans.

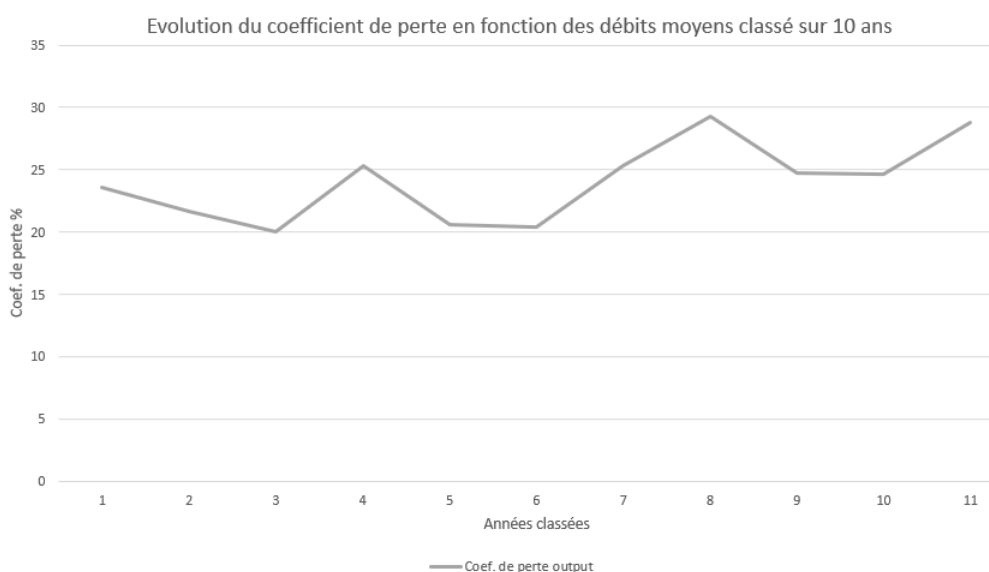


FIGURE 3.15 – Evolution du coefficient de perte de 2009 à 2019

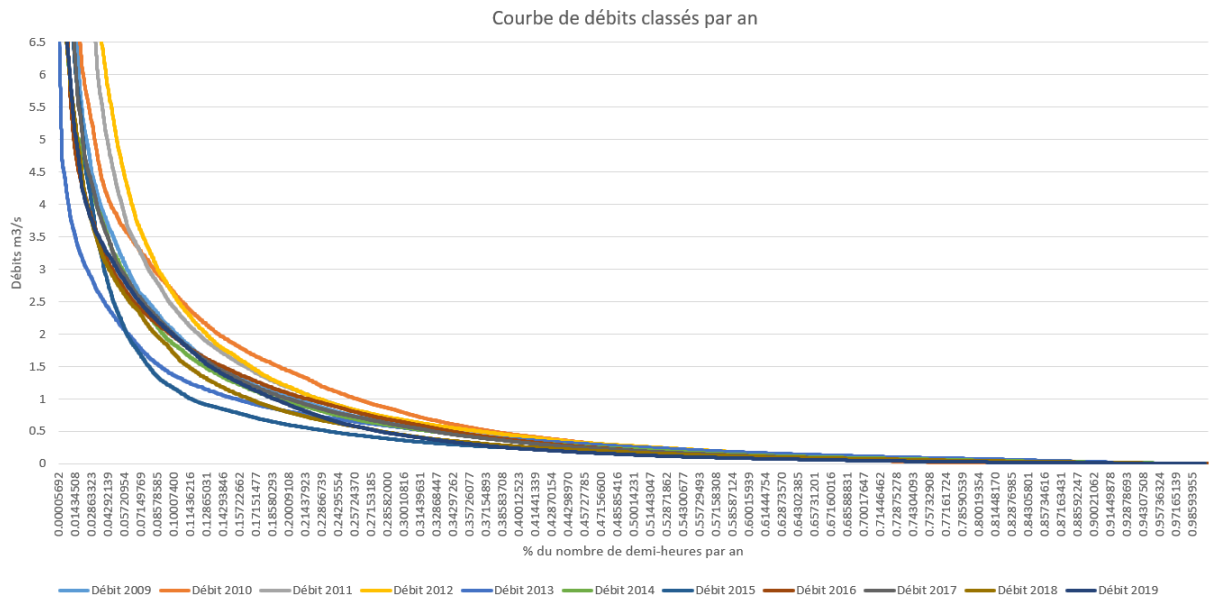


FIGURE 3.16 – Courbes des débits classés par an de 2009 à 2019

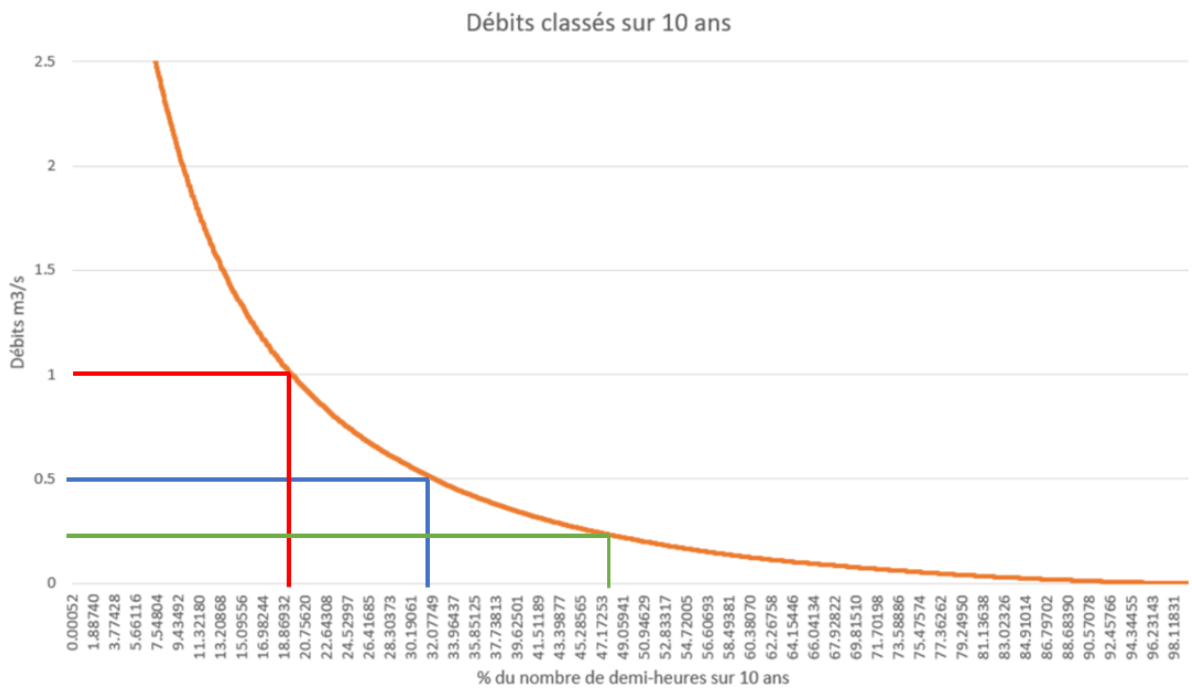


FIGURE 3.17 – Courbe des débits classés sur 10 années de 2009 à 2019

Chapitre 4

Modélisation de l'irrigation

Une certaine quantité d'eau est prélevée à l'amont du barrage par la population pour l'irrigation. Cependant, nous ne disposons pas des données concernant :

1. les mois de l'année durant lesquels l'irrigation est nécessaire.
2. les durées des périodes d'irrigation, notamment en heures et/ou en jours
3. le débit total soutiré qui peut être constant ou variable durant cet intervalle.

Pour tenir compte de l'impact de l'irrigation dans notre méthodologie de prédimensionnement, nous avons testé plusieurs approches.

Tout d'abord, nous avons établi un graphe représentant les tendances des mois pluvieux de 2009 à 2019 afin d'identifier les mois durant lesquels une irrigation serait nécessaire, figure 4.1.

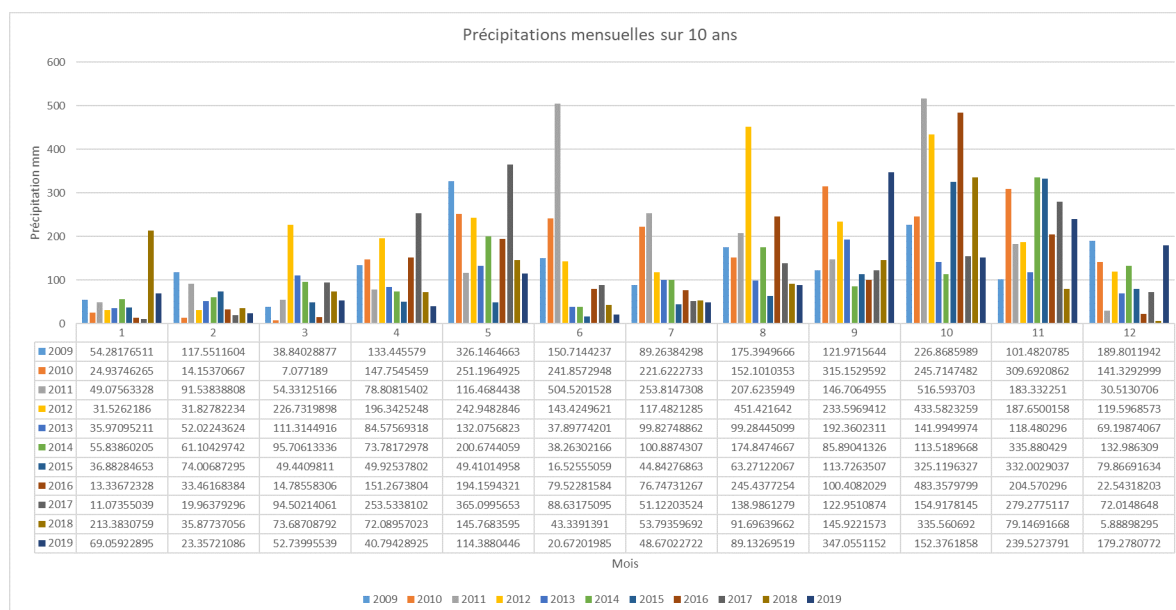


FIGURE 4.1 – Tendence des pluies mensuelles sur 10 années

Sur ce graphique, nous constatons que globalement les mois de janvier, février, mars, juin et décembre sont les plus "probables" à irriguer.

Il restait donc à estimer la valeur du débit d'irrigation. Pour cela, nous avons à disposition une courbe de tarage faite sur base des débits mesurés dans le canal d'irrigation qui se trouve à l'amont du barrage, et ce pour différentes hauteurs d'ouverture de la vanne d'irrigation. Durant l'expérience, la vanne a été ouverte jusqu'à une hauteur de 45cm car au-delà de cette valeur, l'eau était sur le point de déborder un peu plus à l'aval. Le débit correspondant à cette valeur était de $2.54m^3/s$.

Ces débits calculés pour le tarage sont peu représentatifs de ce qui est réellement soutiré durant plusieurs heures/jours et sur différents mois de l'année ; le débit soutiré reste fortement dépendants des besoins des cultures et des aléas climatiques. Néanmoins, cette approche nous donne des ordres de grandeurs de ce qui pourrait être prélevé pour irriguer. Nous avons ensuite établi plusieurs scénarios qui consistaient en plusieurs valeurs de débit d'irrigation à retirer de la courbe de débits classés de base, à savoir celle obtenue dans le modèle hydrologique. Pour chaque scénario, nous avons tracé une nouvelle courbe des débits classés nets. Nous constatons que sur chaque courbe, les débits nominaux¹ ou débits maximum pour lesquels des turbines doivent être dimensionnées étaient respectivement de 0.25, 0.5, $1m^3/s$. Nous nous retrouverons donc avec 4 courbes de débits classés nets et 3 débits nominaux, soit un total de 12 cas à traiter. Cette approche n'est pas

1. A un débit nominal correspond une et une seule turbine.

optimale. De plus, une information qui nous a été transmise et qui défait notre démarche, est que l'irrigation se produit tant en période sèche qu'humide. Dès lors, établir une tendance de mois pluvieux en vue de les distinguer des périodes sèches présente un intérêt limité, faute de données complémentaires et pertinentes.

Nous avons dès lors opté pour une seconde approche simplifiée. En effet, nous avons choisi de fixer arbitrairement de facto une hypothèse de débit d'irrigation raisonnable, à savoir $0.8m^3/s$, que nous avons appliqué toutes les demi-heures de 2009 à 2019. Désormais, nous obtenons une seule courbe de débits classés nets et 3 débits nominaux pour tenter de dimensionner les 3 turbines.

Toutefois, il serait intéressant de pousser la réflexion un peu plus loin concernant la modélisation de l'irrigation.

Piste de réflexion proposée : Nous pourrions récolter les données de débits et niveaux d'eau lors de l'irrigation durant 1 ans. Ainsi, nous identifierons les saisons sèche et humide, et les comparerons avec le graphique des tendances pluvieuses tracé sur base des données de GIOVANNI. Il faudra bien entendu prêter attention à la fréquence de mesures, à l'intervalle de temps de la prise de mesure pour pouvoir faire une comparaison.

De plus, si ces données sont prises suffisamment longtemps (durant plusieurs années), il sera possible de connaître l'évolution de l'irrigation en fonction du climat et des besoins des habitants.

Chapitre 5

Modélisation des niveaux d'eau

Un prédimensionnement d'une centrale hydroélectrique ne peut se faire sans la connaissance de la hauteur de chute d'eau. En effet, la puissance mécanique fournie par la centrale au travers de la turbine se détermine grâce à :

$$P = \eta \rho g Q H \text{ [W]}$$

- η : rendement manométrique¹ à savoir le rendement entre la puissance hydraulique fournie par le fluide et la puissance à l'arbre de la turbine.
- ρ : masse volumique de l'eau, en kg/m^3
- g : gravité en m/s^2
- Q : débit entrant dans la turbine m^3/s
- H : hauteur de chute d'eau, à savoir la différence entre le niveau d'eau à l'amont et l'aval du barrage.

Nous allons donc dans cette section voir comment nous déterminerons les niveaux amont et aval.

5.1 Détermination du niveau amont

Tout d'abord, nous choisissons de déterminer le niveau d'eau à l'amont en temps de turbinage. Nous avons pris une valeur de débit de $2m^3/s$ qui est la somme des débits nominaux dans le cas où nous choisirions d'installer 2 turbines. Ainsi nous considérons

1. Ce rendement prend en compte le rendement volumétrique de la machine. En effet, celui-ci est tenu compte des fuites d'eau dans la turbine, ce qui constitue une perte de puissance à l'arbre.

que cette quantité d'eau servira à alimenter les turbines et que tous les débits au-delà de $2m^3/s$ se déverseront naturellement sur l'infrastructure. Nous partons d'un débit de $2m^3/s$ pour déterminer la hauteur du niveau amont, en supposant que l'irrigation a déjà été faite. Nous prenons la formule utilisée pour dimensionner les déversoirs de type Creager, à la figure 5.1 qui calcule le niveau de la lame d'eau H en fonction de la largeur de crête L du déversoir, du débit déversé moyennant un certain coefficient μ dit coefficient de Creager :

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

- μ : coefficient adimensionnel de Creager
- L : largeur de la crête de barrage, en m
- g : gravité en m/s^2
- H : niveau de la nappe d'eau hauteur de chute d'eau déversée, en m

Q	2	m^3/s
L	55	m
μ	0.496	<i>ad.</i>
H	0.0649	m

TABLE 5.1 – Niveau d'eau à l'amont de la crête de barrage

Pour un débit, une largeur et un coefficient connus, nous obtenons une lame d'eau de $6.5cm$ pour une largeur de $55m$. Ce qui montre que le niveau amont peut être considéré comme égale au niveau de la crête de déversoir².

Piste de réflexion proposée : Nous pourrions prendre des mesures du niveau d'eau à l'amont en fonction du débit et vérifier l'hypothèse du modèle.

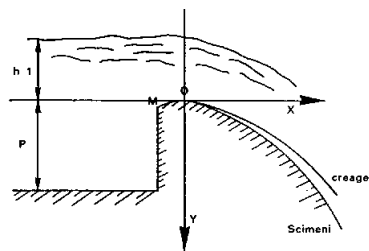


FIGURE 5.1 – Représentation du déversoir de Creager

². Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH) et de la FAO, 18 juin 2020, <http://www.fao.org/3/w2570f/w2570f0k.htm>

5.2 Détermination du niveau aval

Ensuite, nous devons déterminer le niveau d'eau à l'aval du barrage. A ce jour, aucune mesure n'a été recueillie pour connaître le niveau d'eau³ au bas du barrage en fonction du débit écoulé dans le cours d'eau. Pour pallier ce problème, nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS. Ce dernier simule des écoulements dans des cours d'eau et canaux [10]. Il nous sera dès lors possible de déterminer les niveaux des surfaces d'eau au terme de la simulation sur base d'un modèle géométrique du cours d'eau, de conditions frontières au niveau de la rivière et du type d'écoulement choisi. Nous allons décrire en quoi consiste chacun d'eux et leurs étapes pour y parvenir :

1. Modèle géométrique constitué de 4 éléments :
 - (a) Une *représentation géométrique du cours d'eau* qui est constituée non seulement du talweg qui le schématise, mais également des sections transversales au cours d'eau à l'aval du barrage avant de rencontrer le premier affluent. Pour y parvenir nous procéderons selon les étapes suivantes :
 - i. A l'aide du logiciel QGIS, nous avons tracé des sections transversales au cours d'eau. Au départ, nous en avons tracé 10. Il s'agissait des sections transversales qui ont été retracées sur QGIS sur base des sections transversales mesurées sur le terrain. Ensuite, nous avons choisi d'augmenter le nombre de sections à 30 pour nous permettre d'avoir la certitude de calculer au pied du barrage un niveau qui soit indépendant de la condition aux limites aval du domaine de calcul. Par la suite, il apparaîtra qu'une telle extension vers l'aval n'était pas indispensable, du fait que la pente moyenne de la rivière est assez élevée.
 - ii. Puis, nous importons ces sections sous format .csv dans le logiciel HEC-RAS pour en établir une représentation géométrique. HEC-RAS trace les sections dessinées dans QGIS et dessine automatiquement le talweg en reliant 2 points ayant la plus basse altitude de 2 sections transversales consécutives. Nous pouvons voir le résultat final à la figure 5.2

3. Les mesures du niveau de la surface d'eau se font à l'aide d'une échelle limnimétrique.

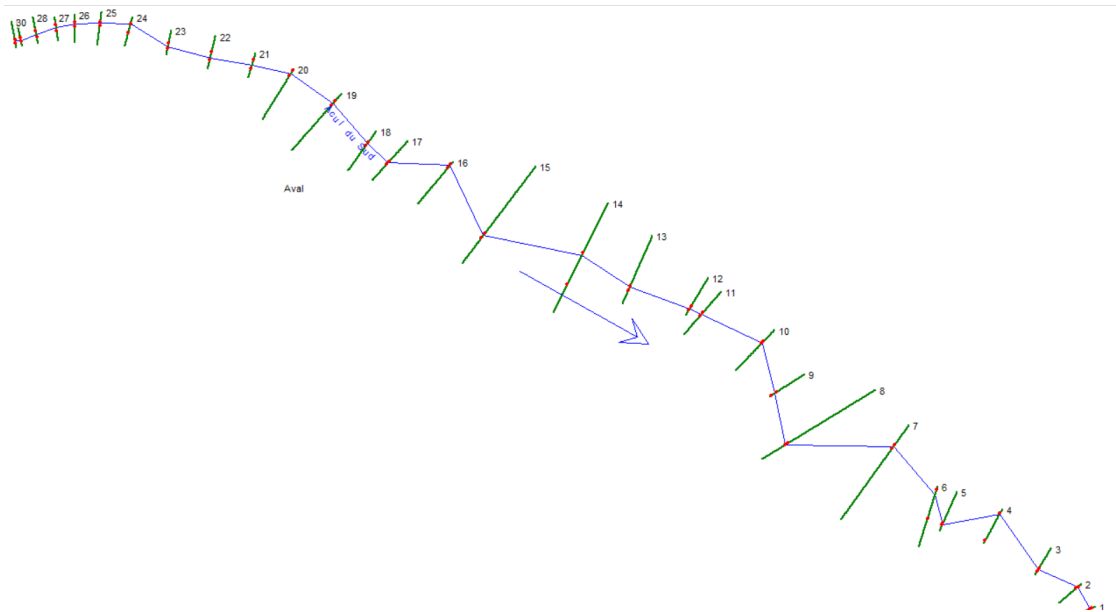


FIGURE 5.2 – Représentation géométrique du cours d'eau et de ses sections transversales

(b) De *paramètres géométriques de ces sections transversales*. Avant de les déterminer, voici quelques rappels utiles avant de définir les étapes pour y parvenir :

- i. A ce stade, il est bon de rappeler la définition du lit mineur et majeur : le lit mineur⁴ désigne l'endroit du cours d'eau qui contient les crues non inondantes ; le lit majeur⁵ par opposition au lit mineur est la partie qui sera inondée en période de grande crue.

Nous pouvons dès lors déterminer les limites des lits mineurs et majeur de chaque section. Pour ce faire, nous avons regardé le tracé fait par l'eau sur une image BING du cours d'eau à l'aval du barrage dans QGIS. Une autre méthode serait d'utiliser un calcul de ligne d'eau pour un débit moyen et de déterminer grâce à HEC-RAS l'emprise de la nappe d'eau. Une fois les limites identifiées pour chaque section, nous marquons chacune d'elle de 2 points rouges dans HEC-RAS, comme présenter à la figure 5.3.

- ii. Après avoir défini les limites des lits mineurs et majeurs, nous mesurons la distance entre eux sur QGIS. La distance entre 2 lits mineurs consécutifs a été mesurée sur base du talweg qui les séparent. Les distances

4. *Lit Majeur*, 6 juin 2020, https://fr.wikipedia.org/wiki/Lit_mineur

5. *Lit Majeur*, 6 juin 2020, https://fr.wikipedia.org/wiki/Lit_majeur

entre les lits majeurs consécutifs se mesurent par rapport aux extrémités droites et gauches des 2 sections. Nous entrons finalement toutes ces distances dans HEC-RAS.

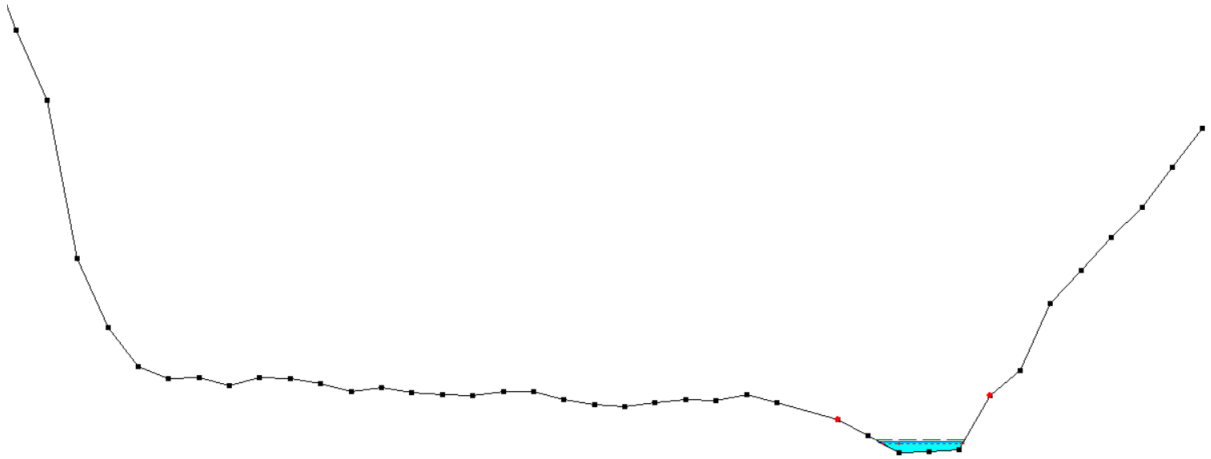


FIGURE 5.3 – Limite entre les lits majeur et mineur d'une section transversale à l'aval du barrage

(c) D'un choix de la *rugosité* :

- i. A l'étape précédente, nous avons défini les limites de ces lits car celles-ci permettent de prendre en compte différentes valeurs de rugosité⁶. En effet, la rugosité du lit mineur et majeur n'est pas constante. De plus, le lit majeur présente plus d'obstacles à l'écoulement (végétation, débris, etc.), et donc une rugosité plus grande que celle du lit mineur. Dans notre cas, nous ferons l'hypothèse que la rugosité est constante sur tous les lits car ils sont couverts de sédiments grossiers comme nous le constatons sur une image BING du cours d'eau. Nous avons donc entré dans HEC-RAS une valeur du coefficient de rugosité de Manning n de 0.03 pour toutes les sections. Pour définir la valeur exacte de la rugosité, il faut avoir à

6. Rappelons que la rugosité influence le débit et donc la vitesse comme nous pouvons le voir dans la formule $Q = \frac{1}{n} \frac{S_0^{1/2} * A(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}}$ où h est le niveau d'eau. Lorsque la vitesse est différente sur les segments de périmètre mouillée, il y a au sein de la section une couche de cisaillement. Cependant, aucune mesure n'a été faite pour la définir avec précision. Nous considérerons que la rugosité est homogène, ce qui implique que la vitesse moyenne à la section est la même que sur les parois du cours d'eau, et qu'il n'y a pas de couche de cisaillement.

disposition des mesures sur site. Cependant, aucune n'est disponible à ce jour.

- (d) D'un choix du *coefficient de contraction et d'expansion* des sections du cours d'eau.

Les coefficients de pertes de charge proposés par HEC-RAS liés à une contraction (convergent) et une expansion (divergent) sont 0.1 et 0.3 respectivement. Ils correspondent aux valeurs usuelles, à savoir 0.1 et 0.2. Le fait de changer la valeur du coefficient d'expansion de 0.3 à 0.2 ne change pas les valeurs finales des niveaux d'eau.

2. Conditions frontières :

Deux conditions frontières sont à fixer : l'une étant le niveau d'eau à la section la plus à l'aval du barrage (la section 1, voir la figure 5.2), et l'autre est le(s) débit(s) à l'aval du barrage, qui constitue(nt) la condition amont du tronçon considéré.

- (a) *Fixons la condition liée au niveau d'eau :*

Nous devons définir la condition frontière qui n'est autre qu'un niveau d'eau pris à la section la plus en l'aval du cours d'eau, autrement dit à la section 1. Grâce à cela, la simulation nous donnera le niveau d'eau pour chaque section et pour un débit choisi. Il reste possible d'entrer dans le logiciel plusieurs valeurs de débit ; nous aurons ainsi plusieurs niveaux d'eau pour la section 1 mais aussi pour chaque section transversale. Nous choisissons l'hypothèse d'imposer arbitrairement un niveau d'eau de 89m à la section 1 en vérifiant que le choix d'un autre niveau (par exemple 88m ou 90m) n'affecte pas la ligne d'eau à l'amont du tronçon. Nous avons constaté que nous tendions vers une valeur asymptotique, dite "niveau pseudo-uniforme"⁷ à la section 30 peu importe le niveau imposé à l'aval et ce pour un même set de débits.

- (b) *Fixons un ou plusieurs débits constant(s) tant en amont qu'en aval du barrage pour connaître les niveaux d'eau à chaque section transversale :*

Les débits ont été obtenus grâce au modèle hydrologique. Si nous calculions la chute disponible pour chaque débit demi-horaire nous aurions 192, 805 valeurs à déterminer. Face à ce nombre considérable de données à traiter, nous avons opté pour la construction d'une fonction qui interpolera un nombre restreint de débits choisis et de niveaux d'eau correspondantes calculées par HEC-RAS. Au départ nous avons choisis aléatoirement des débits ayant les valeurs suivantes : 0.25 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 50 ; 100 ; 200 ; 257m³/s. Nous

7. Nous parlons de niveau d'eau pseudo-uniforme car le canal n'est pas prismatique.

avons ensuite prêté attention aux niveaux obtenus à la section 30, à savoir celle étant la plus proche du barrage, et nous constatons que la différence entre deux niveaux consécutifs est grande. En effet, elle pouvait aller jusqu'à 1m de haut. Par conséquent, pour rendre la fonction d'interpolation plus précise, nous avons augmenté le nombre de débit à entrer comme paramètre dans HEC-RAS pour réduire la différence entre deux niveaux d'eau consécutifs. Nous l'avons réduite de sorte à avoir une différence de maximum 10cm. Nous obtenons dès lors 56 débits et niveaux d'eau. Ainsi nous pouvons tracer une courbe qui interpole ces points dans un graphe "hauteur d'eau – débits". Cette courbe a été discrétisée par des petits segments de droites pour trouver l'ensemble des hauteurs de chute pour tous les débits classés. La courbe finale est à la figure 5.4

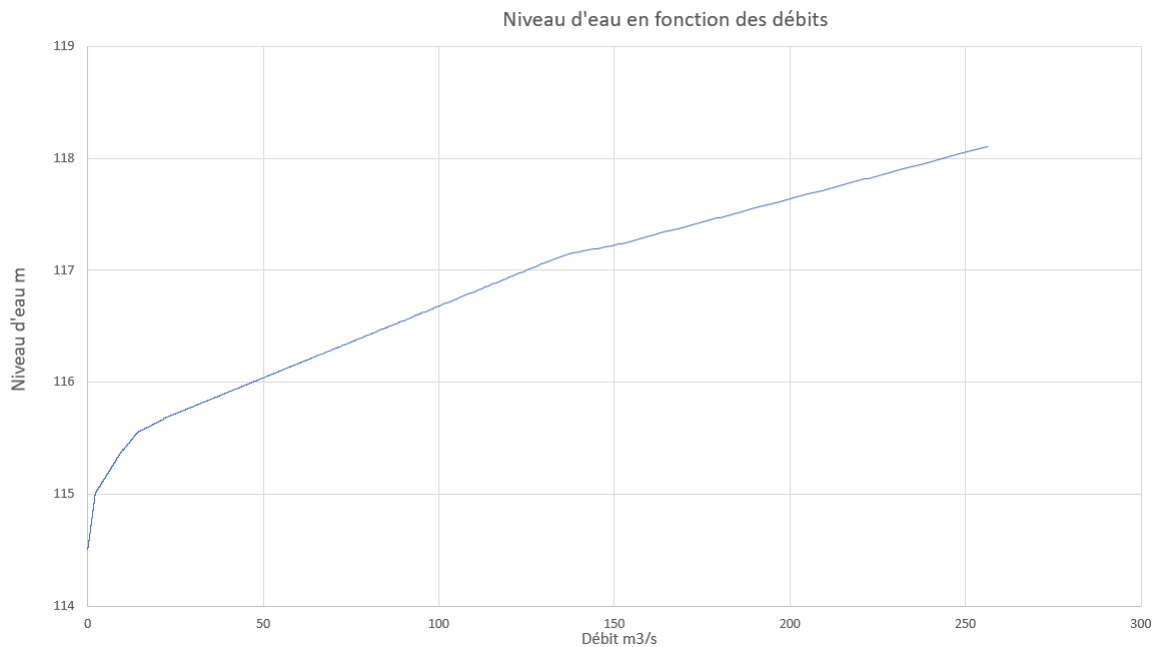


FIGURE 5.4 – Niveau d'eau en fonction des débits classés obtenus après irrigation

3. Choix du type d'écoulement :

Nous imposons dans HEC-RAS que l'écoulement soit mixte. En effet, l'écoulement peut passer de l'état subcritique à supercritique et inversement dans le cours d'eau. Pour rappel, lorsque le niveau d'eau est inférieur à la profondeur critique⁸, l'écoulement est dit supercritique ou torrentiel, à l'inverse il est subcritique ou fluvial.

4. Lancement de la simulation :

Après avoir lancé la simulation sur HEC-RAS, nous obtenons les résultats à la figure 5.5 et une représentation de l'écoulement du cours d'eau à la figure 5.7. Nous nous sommes focalisés sur les petits débits car ils sont plus fréquents comme nous pouvons le constater sur la courbe des débits classés.

Nous avons donc des hauteurs de niveau d'eau au bas du barrage pour des débits écoulés durant 30min. Grâce à cela, nous pouvons calculer la hauteur de chute d'eau qui n'est autre que la différence entre le niveau d'eau à l'amont et à l'aval du barrage, comme nous le voyons à la figure 5.6.

Piste de réflexion proposée : Nous pourrions prendre des mesures du niveau d'eau à l'aval du barrage et les comparer avec les profondeurs d'eau obtenues dans HEC-RAS.

8. Une profondeur d'eau critique est définie comme étant la profondeur telle que pour une énergie spécifique donnée, le débit est maximal.

Une énergie spécifique est définie comme suit : prenons une molécule d'eau située à la surface de la rivière. Cette molécule a une énergie potentielle $h \cos(\phi)$ (où h est le niveau d'eau, ϕ est l'angle d'inclinaison du sol par rapport à un repère galiléen) et une énergie cinétique $\alpha \frac{V^2}{2g}$ (où α est le coefficient de distribution des vitesses)

HEC-RAS Plan: 13 River: Acul du Sud Reach: Aval

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Aval	30	PF 1	0.10	114.50	114.59	114.57	114.60	0.005249	0.40	0.25	3.60	0.49
Aval	30	PF 2	0.25	114.50	114.64	114.60	114.66	0.005711	0.58	0.43	3.95	0.55
Aval	30	PF 3	0.50	114.50	114.70	114.65	114.73	0.006608	0.76	0.65	4.31	0.63
Aval	30	PF 4	1.00	114.50	114.77	114.72	114.82	0.008109	1.03	0.98	4.80	0.73
Aval	30	PF 5	1.25	114.50	114.79	114.75	114.86	0.008956	1.14	1.10	4.98	0.77
Aval	30	PF 6	2.50	114.50	114.88	114.87	115.01	0.013101	1.60	1.56	5.59	0.97
Aval	30	PF 7	3.25	114.50	114.93	114.93	115.09	0.013724	1.76	1.85	5.95	1.01
Aval	30	PF 8	4.13	114.50	114.99	114.99	115.17	0.013207	1.86	2.22	6.38	1.01
Aval	30	PF 9	5.00	114.50	115.04	115.04	115.24	0.012776	1.94	2.57	6.76	1.01
Aval	30	PF 10	6.25	114.50	115.11	115.11	115.33	0.012188	2.06	3.04	7.41	1.00
Aval	30	PF 11	7.50	114.50	115.17	115.17	115.41	0.011246	2.15	3.53	8.17	0.98
Aval	30	PF 12	8.75	114.50	115.23	115.23	115.48	0.010492	2.22	4.04	8.87	0.96
Aval	30	PF 13	10.00	114.50	115.29	115.29	115.55	0.009812	2.27	4.57	9.55	0.94
Aval	30	PF 14	11.30	114.50	115.36	115.36	115.61	0.008413	2.25	5.41	13.90	0.89
Aval	30	PF 15	12.50	114.50	115.44	115.44	115.66	0.006552	2.12	6.83	20.24	0.80
Aval	30	PF 16	15.00	114.50	115.53	115.53	115.73	0.005750	2.12	8.80	26.58	0.76
Aval	30	PF 17	17.50	114.50	115.60	115.60	115.79	0.005246	2.14	10.84	31.76	0.73
Aval	30	PF 18	20.00	114.50	115.66	115.66	115.84	0.004618	2.11	13.02	34.10	0.70
Aval	30	PF 19	22.60	114.50	115.70	115.70	115.89	0.004733	2.19	14.29	35.54	0.71
Aval	30	PF 20	25.00	114.50	115.73	115.73	115.93	0.004938	2.28	15.29	36.73	0.73
Aval	30	PF 21	27.50	114.50	115.75	115.75	115.97	0.005168	2.37	16.24	37.84	0.75
Aval	30	PF 22	29.90	114.50	115.76	115.76	116.00	0.005925	2.55	16.45	38.07	0.80
Aval	30	PF 23	32.40	114.50	115.77	115.77	116.04	0.006403	2.67	17.03	38.72	0.84
Aval	30	PF 24	35.00	114.50	115.86	115.86	116.07	0.004809	2.45	20.82	43.26	0.73
Aval	30	PF 25	39.90	114.50	115.90	115.90	116.13	0.005011	2.56	22.63	43.73	0.75
Aval	30	PF 26	50.00	114.50	115.98	115.98	116.24	0.005315	2.75	26.11	44.44	0.78
Aval	30	PF 27	54.90	114.50	116.02	116.02	116.29	0.005415	2.83	27.69	44.57	0.80

FIGURE 5.5 – Résultats de la simulation sur HEC-RAS

Légende :

- Min ch el : minimum channel elevation, niveau du thalweg
- W.S. El : water surface elevation calculated from energy equation, niveau d'eau
- Crit W.S. : Critical water surface elevation. Water surface corresponding to the minimum energy on the energy versus depth curve, profondeur critique
- E.G. Elev : energy gradeline for calculated WS Elev, ligne d'énergie spécifique
- E.G. Slope : slope of the energy grade line, ligne des pertes de charges
- Vel Chnl : Average of flow in the main channel, vitesse dans le lit mineur
- Flow Area : total area of cross section active flow, surface mouillée
- Top Width : largeur supérieure de la section mouillée
- Froude : nombre de Froude qui indique la présence d'un écoulement supercritique lorsqu'il est proche de 1, et donc la présence d'un ressaut pour revenir à un écoulement subcritique
- Profile : les débits
- River station : vu comme un point de mesure au niveau de la section du cours d'eau

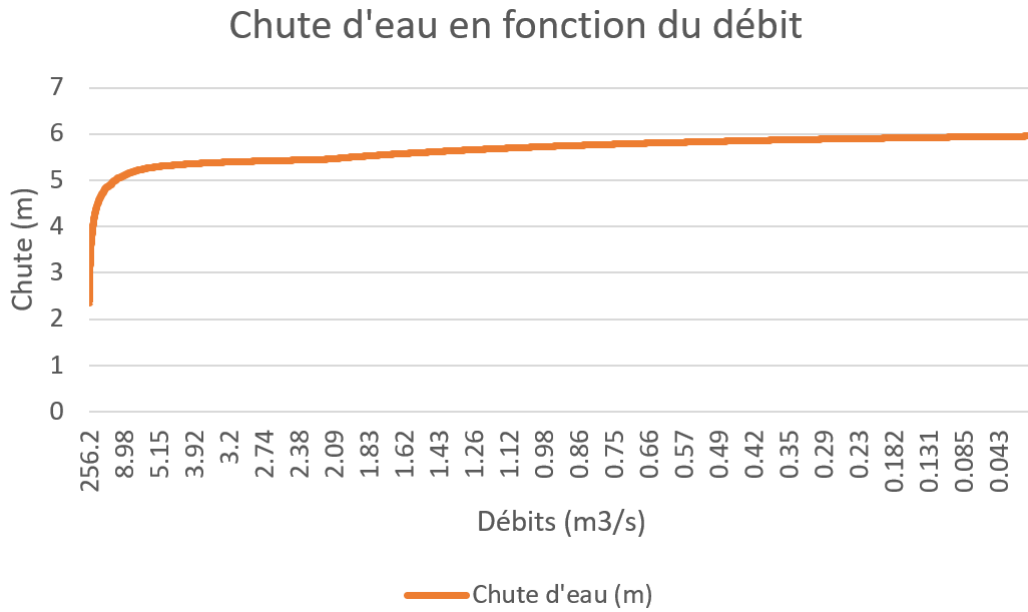


FIGURE 5.6 – Hauteur de chute d'eau en fonction des débits classés obtenus après irrigation

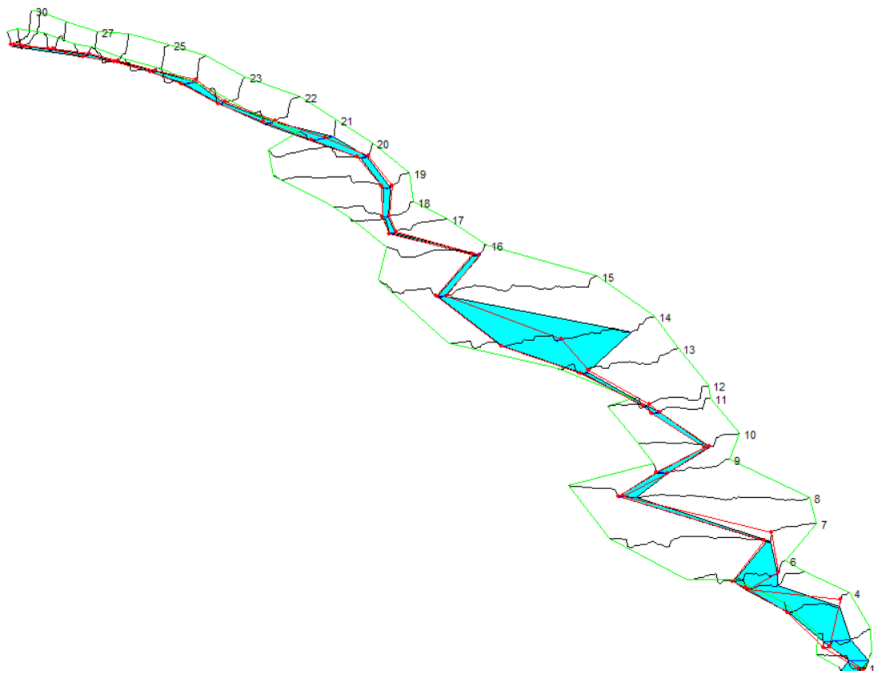


FIGURE 5.7 – Simulation de la rivière d'Acuil du Sud en aval du barrage de Dubreuil

Chapitre 6

Infrastructure

6.1 Dimensions de l'infrastructure

Les dimensions de l'infrastructure, à la figure 6.1, 6.3 et 6.4 sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Mesures de l'infrastructure	Valeurs	Unités
Largeur crête barrage	55	<i>m</i>
Hauteur barrage	6.5	<i>m</i>
Largeur radier	20.27	<i>m</i>
Inclinaison parement	17	<i>degré</i>
Longueur parement	20.37	<i>m</i>
Hauteur déversoir	3.08	<i>m</i>
Largeur déversoir	3.63	<i>m</i>
Différence crête barrage et crête déversoir	28	<i>cm</i>

TABLE 6.1 – Dimensions du barrage



FIGURE 6.1 – Barrage de Dubreuil

6.2 Capacité du déversoir

Un déversoir a pour but de recueillir les débits de crues pour éviter d’inonder les plaines. Toutefois à Dubreuil, le déversoir existant est de faible dimension que pour pouvoir récolter le débit de crue maximal après irrigation à savoir $256.2m^3/s$. Nous avons donc voulu connaître la capacité maximal du déversoir existant en utilisant à nouveau la formule de Creager¹, présentée à la section précédente, figure 6.2.

Sachant que nous connaissons les dimensions du déversoir, L la largeur de la crête de déversoir et H niveau d’eau égale à la hauteur du déversoir en période de crue, nous pouvons déterminer le débit Q .

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

- μ : coefficient adimensionnel de Creager
- L : largeur de la crête de barrage, en m
- g : gravité en m/s^2
- H : niveau de la nappe d’eau m

H	3.08	m
L	3.63	m
μ	0.496	<i>ad.</i>
Q	43.1	m^3/s

TABLE 6.2 – Débit maximal dans le déversoir

1. Comité interafricain d’études hydrauliques (CIEH) et de la FAO, 18 juin 2020, <http://www.fao.org/3/w2570f/w2570f0k.htm>

Nous obtenons donc un débit de $43.1m^3/s$.

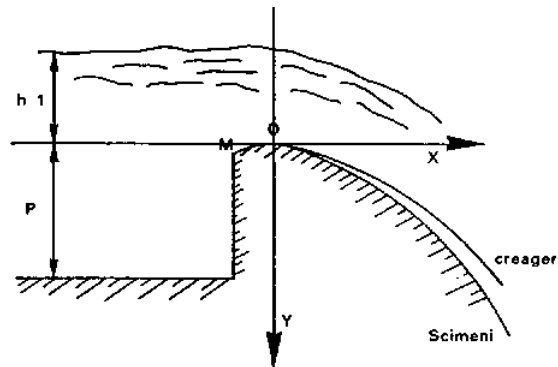


FIGURE 6.2 – Représentation du déversoir de Creager



FIGURE 6.3 – Barrage et déversoir



FIGURE 6.4 – Déversoir de Dubreuil

Chapitre 7

Etude de faisabilité pour l'installation d'une centrale microhydroélectrique

7.1 Choix des turbines

Nous avons à notre disposition la courbe des débits classés nets, à savoir celle dont le débit prélevé pour l'irrigation a été pris en considération. Sur base de cette courbe, nous avons choisi 3 débits nominaux pour lesquels 3 turbines seraient construites : $0.25m^3/s$; $0.5m^3/s$; $1.0m^3/s$.

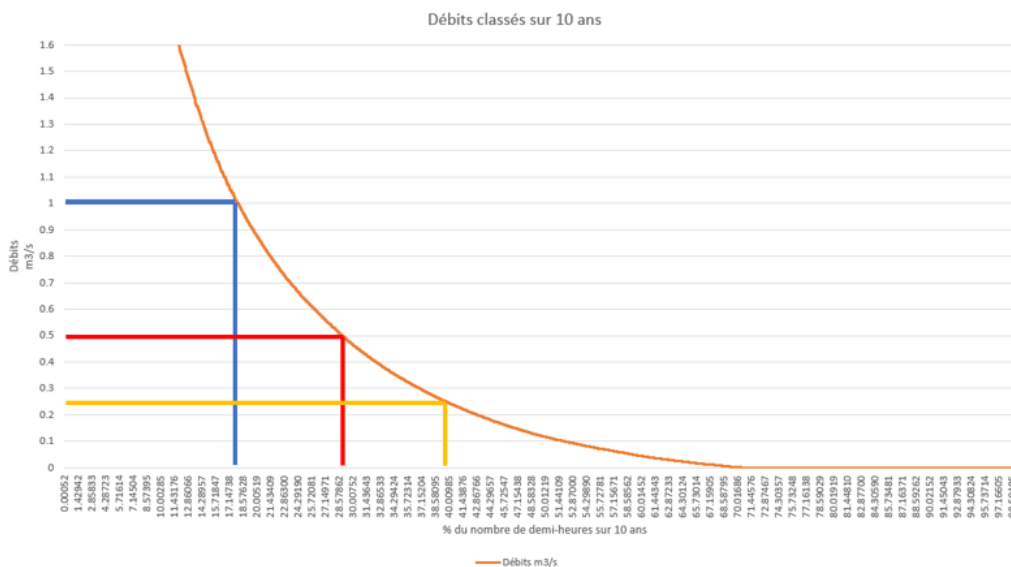


FIGURE 7.1 – Courbe des débits classés obtenus après irrigation

Chacun d'eux représente le débit maximal pour lequel chacune des turbines fonctionnera. Dès lors, les débits réellement turbinés correspondront à des valeurs inférieures ou égales aux débits nominaux.

De plus, nous avons calculé précédemment les hauteurs de chute d'eau pour n'importe quels débits issus de la courbe des débits classés nets, et par conséquent, nous connaissons également les hauteurs de chute d'eau pour ces débits nominaux. A ce stade-ci, nous sommes en mesure de déterminer les types de turbines qui conviendraient à notre site étudié en regardant la courbe ¹ $H - Q$. En effet, pour de faibles débits et hauteur de chute d'eau correspondantes, nous voyons que les turbines Vis d'Archimède et Banki-Michell sont les deux candidats possibles.

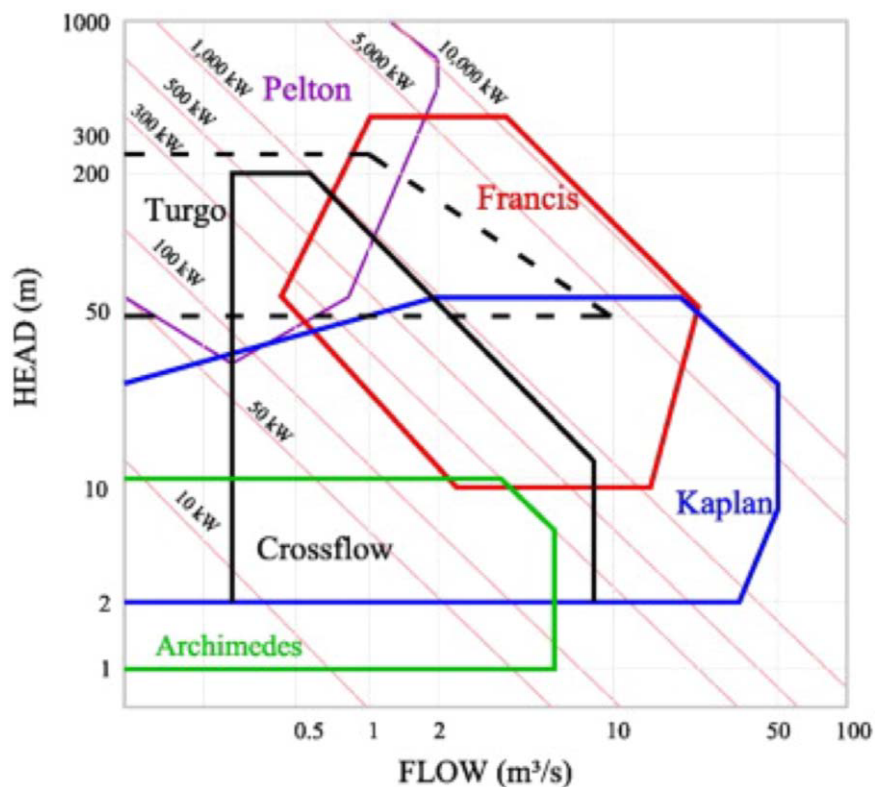


FIGURE 7.2 – Diagramme $H - Q$ pour la Vis d'Archimède

1. *Pico hydropower (PHP) development in Malaysia : Potential, present status, barriers and future perspectives*, 2017, 18 juin 2020, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117310249>

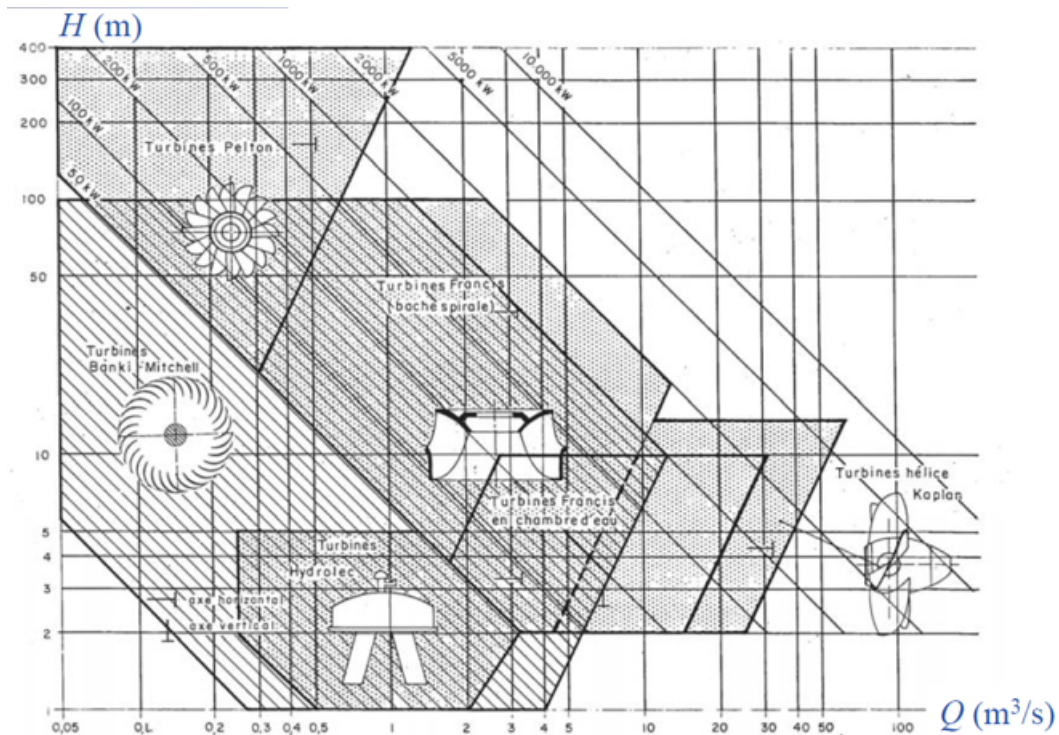


FIGURE 7.3 – Diagramme $H - Q$ pour la Banki-Michell

7.2 Détermination de la puissance et de la capacité de l'installation

Afin d'estimer le potentiel de ces deux types de turbines, nous devons comparer leurs productibilités exprimées en kWh/an . Pour évaluer ces dernières, nous avons dû dans un premier temps calculer le rendement en fonction du $Q/Q_{nominal}$, où Q est le débit que la nature nous fournit et $Q_{nominal}$ est le débit maximal choisi pour le design. Les courbes de rendement tant pour la Banki-Michell que la Vis d'Archimède ont été discrétisées par des segments de droites pour ainsi obtenir une valeur de rendement pour tout rapport $Q/Q_{nominal}$.

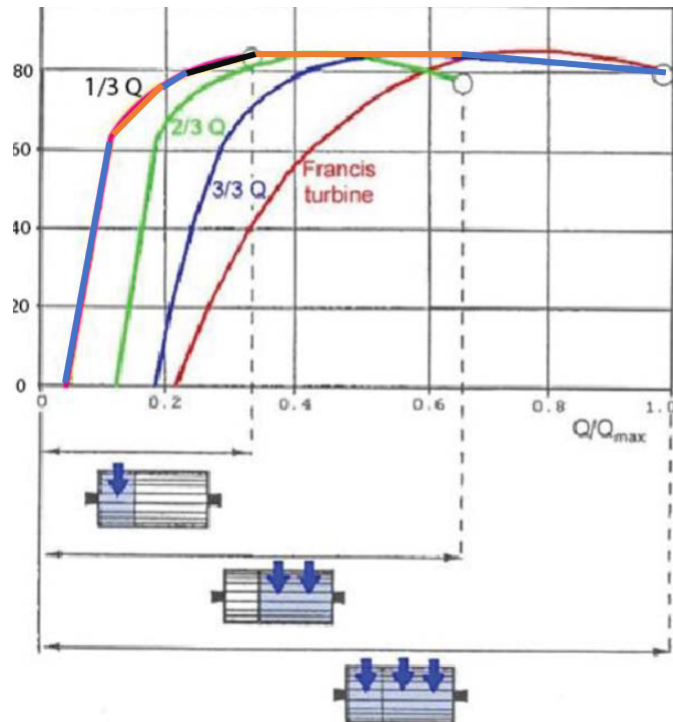


FIGURE 7.4 – Rendement manométrique de la turbine Banki-Michell

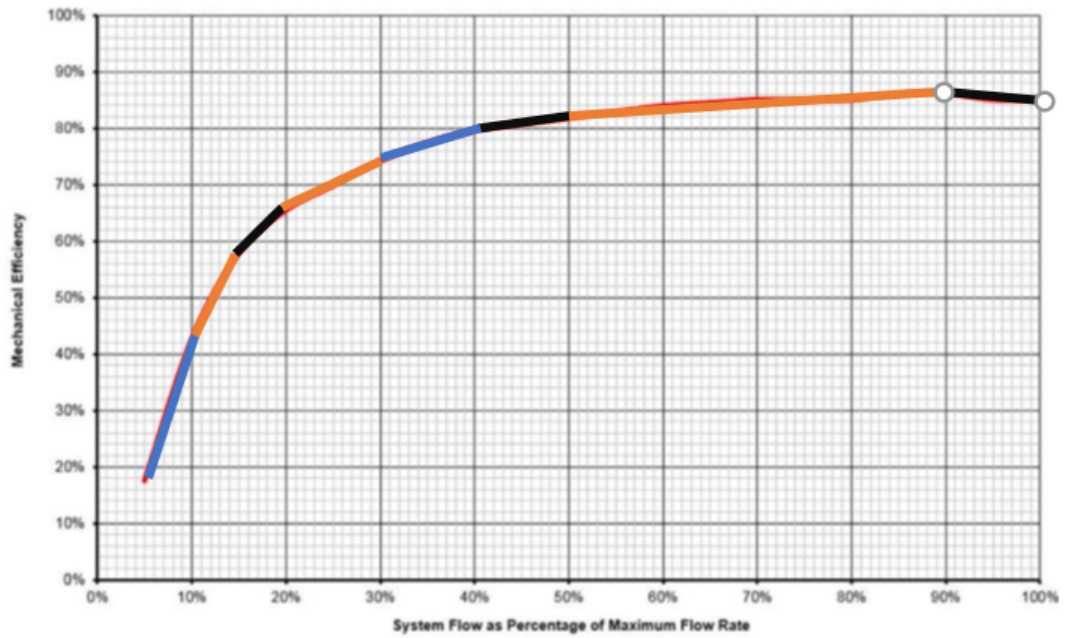


FIGURE 7.5 – Rendement manométrique de la turbine Vis d'Archimède

Maintenant que nous disposons d'un ensemble de valeurs pour les débits de turbinage, de hauteurs de chute d'eau, et de rendements, nous sommes capables de calculer les puissances dit instantanées (exprimées en kW et évaluée toutes les demi-heures allant de 2009 à 2019) grâce à la formule² : $P_{kW} = 10^{-3}\eta\rho gHQ$. Nous obtenons les graphes ci-dessous pour les 2 types de turbines.

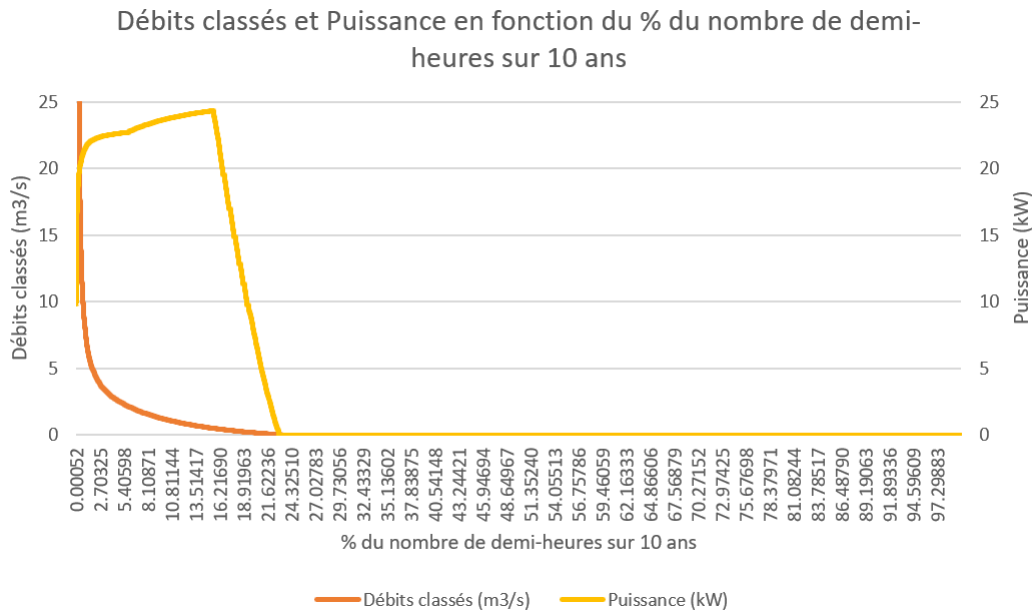


FIGURE 7.6 – Débits classés obtenus après irrigation et Puissance en fonction du temps pour la Vis d'Archimède

2. Dans cette formule, η est pour rappel le rendement manométrique. Il représente le rapport entre la puissance fournie par le fluide et celle qui est disponible à l'arbre de la turbine. Par conséquent, il tient compte des pertes hydrodynamiques (cisaillement et recirculation), des pertes par frottement entre le fluide et la machine, ainsi que les fuites au sein de celle-ci. Par ailleurs, nous ne prenons donc pas en compte le rendement de l'alternateur. En effet, il aurait fallu disposer d'une courbe de rendement du groupe « turbo-alternateur » qu'on aurait dû discrétiser, à l'instar de la courbe de rendement manométrique. Cependant, elle dépend du fabricant.

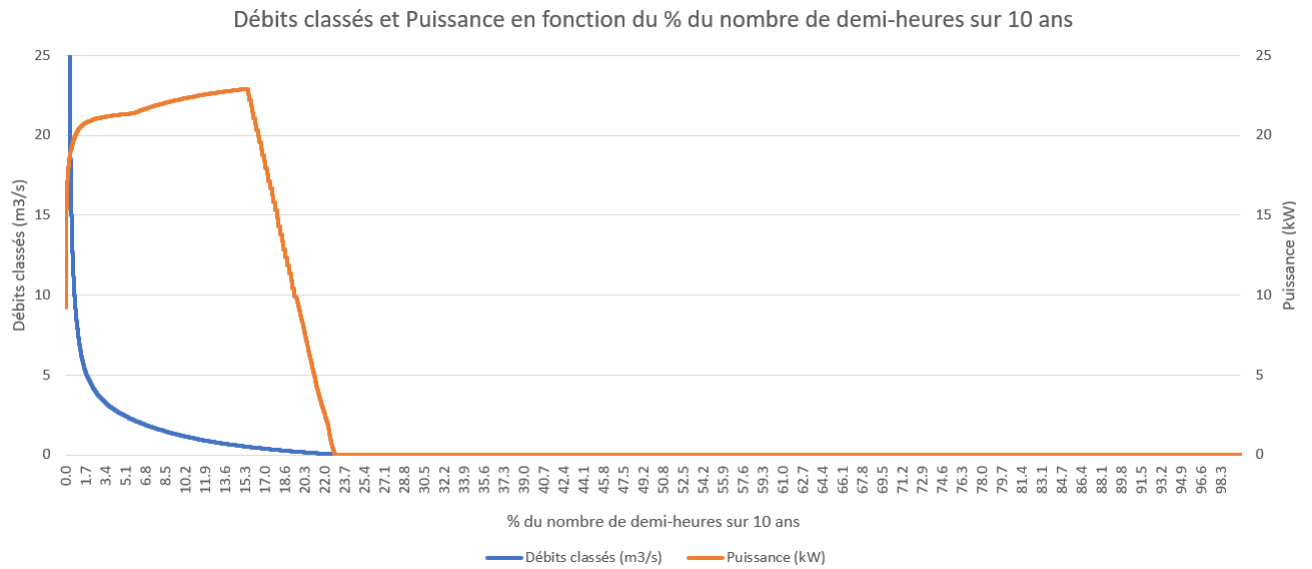


FIGURE 7.7 – Débits classés obtenus après irrogation et Puissance en fonction du temps pour la Banki-Michell

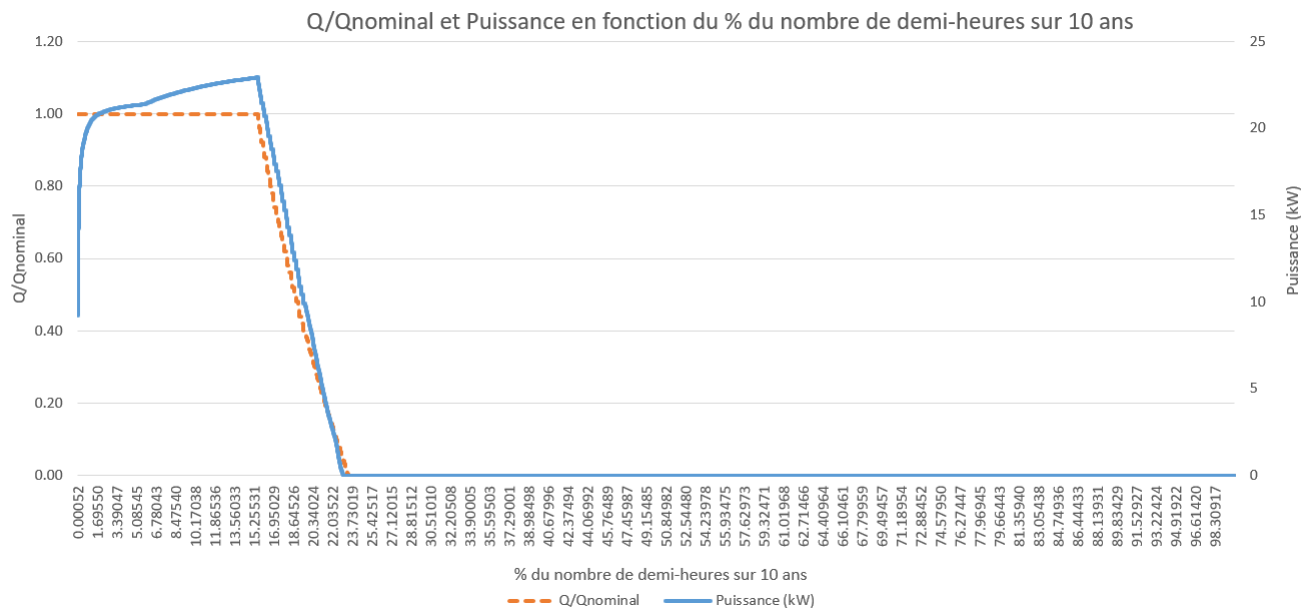


FIGURE 7.8 – $Q/Q_{nominal}$ et Puissance en fonction du temps pour la Banki-Michell

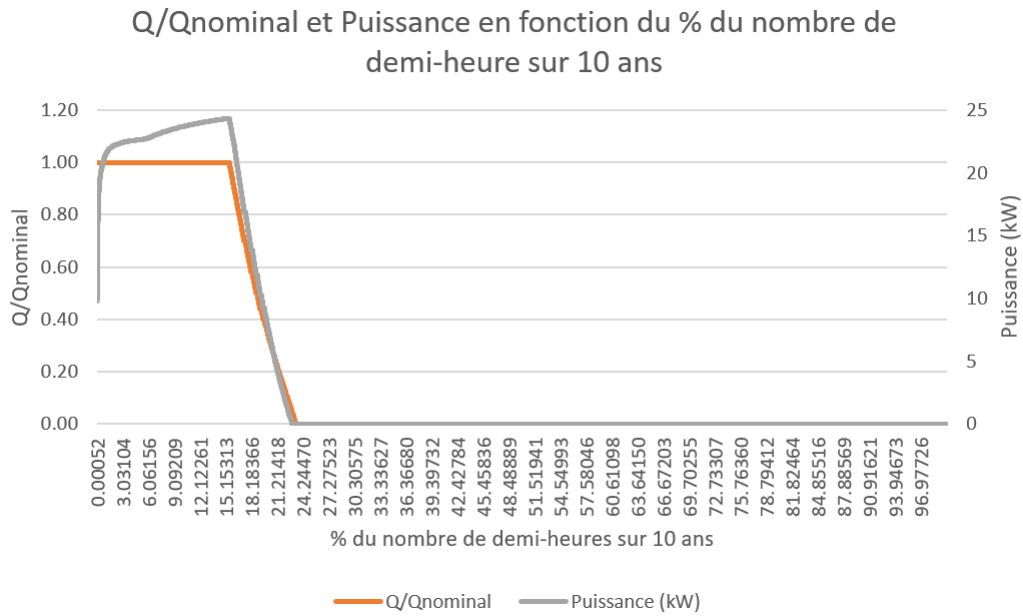


FIGURE 7.9 – $Q/Q_{nominal}$ et Puissance en fonction du temps pour la Vis d’Archimède

A présent, nous pouvons calculer la productibilité des deux types de turbines pour les 3 débits nominaux choisis, en sommant les puissances instantanées sur 10 ans et en les divisant par 2 pour les avoir en kWh puis par 1000 pour les avoir en MWh .

Débit nominal choisi	0.25	m^3/s
Débit min avec η à 70%	0.062	m^3/s
Rendement	85%	—
Niveau d’eau	114.56	m
Chute d’eau	5.90	m
Capacité par an	23, 567	kWh

TABLE 7.1 – Résultats finaux de la Vis d’Archimède pour un débit nominal de $0.25m^3/s$

Débit nominal choisi	0.5	m^3/s
Débit min avec η à 70%	0.123	m^3/s
Rendement	85%	—
Niveau d'eau	114.62	m
Chute d'eau	5.84	m
Capacité par an	42,278	kWh

TABLE 7.2 – Résultats finaux de la Vis d'Archimède pour un débit nominal de $0.50m^3/s$

Débit nominal choisi	1.0	m^3/s
Débit min avec η à 70%	0.25	m^3/s
Rendement	85%	—
Niveau d'eau	114.73	m
Chute d'eau	5.72	m
Capacité par an	70,098	kWh

TABLE 7.3 – Résultats finaux de la Vis d'Archimède pour un débit nominal de $1.00m^3/s$

$Q_{nominal} = 0.25m^3/s$	236 MWh
$Q_{nominal} = 0.50m^3/s$	423 MWh
$Q_{nominal} = 1.0m^3/s$	701 MWh

TABLE 7.4 – Récapitulatif des capacités de l'installation avec une Vis d'Archimède

Débit nominal choisi	0.25	m^3/s
Débit min avec η à 80%	0.06	m^3/s
Rendement	80%	—
Niveau d'eau	114.558	m
Chute d'eau	5.89	m
Capacité par an	22,172	kWh

TABLE 7.5 – Résultats finaux de la Banki-Michell pour un débit nominal de $0.25m^3/s$

Débit nominal choisi	0.50	m^3/s
Débit min avec η à 80%	0.12	m^3/s
Rendement	80%	—
Niveau d'eau	114.6165	m
Chute d'eau	5.8395	m
Capacité par an	40, 173	kWh

TABLE 7.6 – Résultats finaux de la Banki-Michell pour un débit nominal de $0.50m^3/s$

Débit nominal choisi	1.0	m^3/s
Débit min avec η à 80%	0.24	m^3/s
Rendement	80%	—
Niveau d'eau	114.733	m
Chute d'eau	5.723	m
Capacité par an	67, 713	kWh

TABLE 7.7 – Résultats finaux de la Banki-Michell pour un débit nominal de $1.00m^3/s$

$Q_{nominal} = 0.25m^3/s$	222 MWh
$Q_{nominal} = 0.50m^3/s$	402 MWh
$Q_{nominal} = 1.0m^3/s$	677 MWh

TABLE 7.8 – Récapitulatif des capacités de l'installation avec une Banki-Michell

Pour pouvoir faire un choix opportun entre les deux turbines, d'autres paramètres devront être pris en considération en plus des débits minimum interceptés et du temps de turbinage, tels que les coûts d'acquisition des équipements électromécaniques, y compris les coûts de maintenance préventive et corrective, la fiabilité des équipements (données des fournisseurs), la disponibilité des pièces détachées, les coûts indirects liés au raccordement au réseau, les coûts des travaux de génie civil propres à chaque design de turbine, ce qui dépasse ici largement le cadre de ce mémoire. Pour cette raison, nous avons trouvé plus judicieux de proposer 3 types de Banki-Michell et 3 types de Vis d'Archimède dont les caractéristiques sont reprises dans les tableaux ci-dessus. Les turbines ayant les plus grandes productibilités sont incontestablement les turbines numéro 3 qui seraient donc celles pour lesquelles nous opterions. Nous constatons que les productibilités des deux turbines sont presque similaires. De plus, chacune d'elles peut

théoriquement admettre des débits faibles avec un rendement de l'ordre 80% et 70%, à savoir pour la Banki-Michell et la Vis d'Archimède respectivement. Par "théoriquement", nous entendons que les débits minimum admissibles seront fixés selon le design de la machine et dépendent du fabricant. En outre, le temps de turbinage réel n'est pas évoqué pour les mêmes raisons explicitées précédemment.

Piste de réflexion : nous pourrions évaluer l'opportunité d'utiliser 2 turbines au lieu d'une seule. Le choix de la seconde turbine, en plus de celles ayant un débit nominal de $1m^3/s$ tant pour la Banki-Michell que pour la Vis d'Archimède, résulterait d'un compromis entre le temps de turbinage supplémentaire, la capacité additionnelle ajoutée au réseau, les besoins de la population, les coûts, et la rentabilité du projet. Le choix de 2 turbines assure un fonctionnement continu en cas de mise hors-service d'une des turbines existantes. Cependant, ce choix dépend aussi des capitaux investis dans le projet et la durée de l'amortissement jugée acceptable ou non.

7.3 Similitude et divergence des turbines

Les deux turbines présentent des similitudes et des divergences.

7.3.1 Vis d'Archimède

- Le rendement diminue à charge partielle si la vitesse de rotation est fixe. Pour maintenir un rendement élevé et intercepter des débits faibles, il faudrait travailler avec une vitesse de rotation variable ce qui augmente le coût de la turbine
- L'infrastructure plus simple que la Banki-Michell
- Le passage des débris se fait entre les pâles
- Une passe à poissons est mise en place pour préserver la faune

7.3.2 Banki-Michell

- Le rendement reste élevé à charge partielle
- La vitesse de rotation fixe (pour la fréquence)
- L'infrastructure plus complexe car il faut amener l'eau dans l'injecteur
- L'effet centrifuge éjecte les débris obstruants

7.4 Architecture des turbines

7.4.1 Vis d'Archimède

Nous pouvons voir à la figure³ 7.10 que la Vis hydrodynamique dispose de plusieurs éléments externes et essentiels à son bon fonctionnement tels que : une grille, une vanne de régulation, des armoires électriques, un multiplicateur, d'auge et le déflecteur, d'une passe à poisson, d'un générateur et la Vis hydrodynamique. Chacun d'eux jouent un rôle important[11] :

- La grille permet de protéger la turbine de sédiments grossiers et autres éléments susceptibles de s'y infiltrer. Il est possible de poser la grille par-dessus de la turbine par mesure de sécurité.
- La vanne de régulation contrôle les débits entrants de tel sorte à ne pas dépasser les débits nominaux choisis.
- Les armoires électriques permettent d'effectuer un raccord au réseau.
- Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation de l'arbre de sortie de la turbine d'un certain facteur de multiplication avant l'accouplement au générateur dont la vitesse de rotation est régie par la fréquence du réseau électrique ($60Hz$).
- L'auge est le demi-cylindre voire parfois un cylindre fermé dans lequel siège la Vis d'Archimède et le déflecteur permet de contenir l'eau qui est projetée lorsque la vis est en mouvement. Ce dernier est utilisé que lorsque l'auge est un demi-cylindre.
- La passe à poissons pour permettre à la faune de remonter ou de descendre la rivière.
- Le générateur assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les générateurs synchrones sont utilisés lorsque la vitesse de rotation de la turbine est variable, dans le cas contraire le générateur asynchrone sera utilisé.
- Vis

3. *Étude mécanique et électrique*, 18 juin 2020, <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2240>

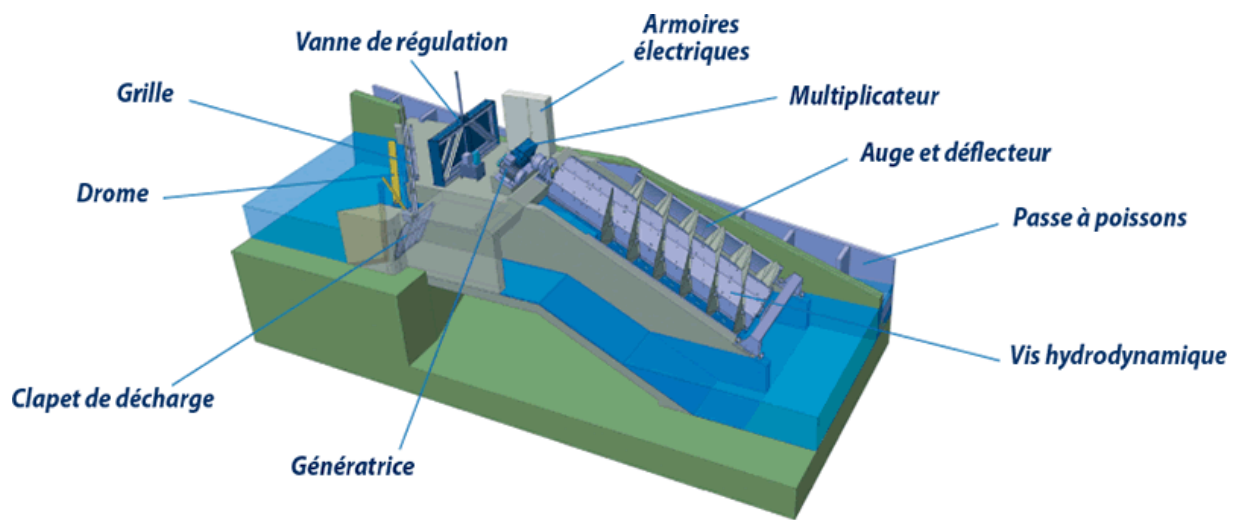


FIGURE 7.10 – Architecture de la Vis d’Archimède

7.4.2 Banki-Michell

Comme nous pouvons le voir sur la figure⁴ 7.11, elle est composée de :

- une conduite d'arrivée de sorte que le jet entre de la manière la plus optimal dans la machine.
- une aube directrice du distributeur
- un bâti (ou boîtier)
- une roue
- une vanne de purge
- de palliers
- un tube d'aspiration
- une grille, non visible sur la figure, est également mise pour pouvoir protéger la turbine des éventuels éléments obstruants

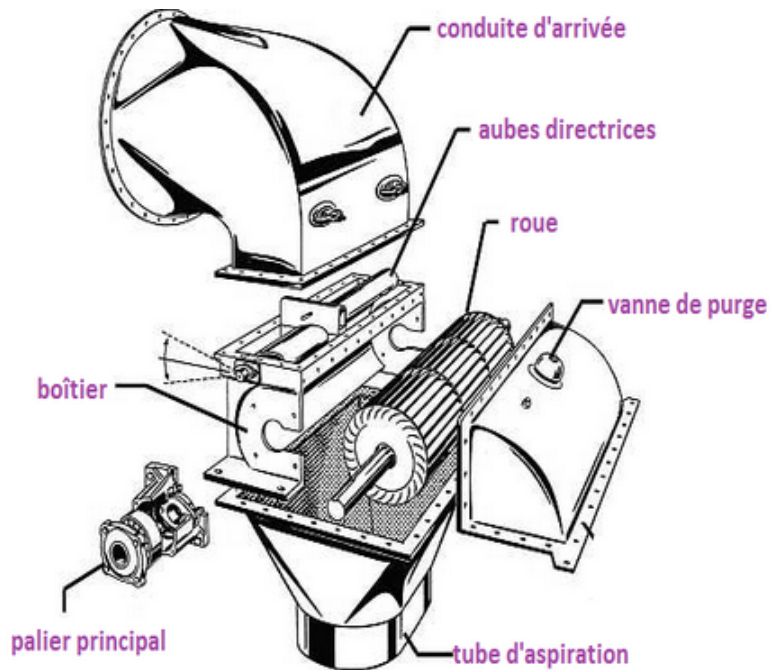


FIGURE 7.11 – Architecture de la Banki-Michell

4. *Étude mécanique et électrique*, 18 juin 2020, <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2240>

7.5 Fonctionnement des turbines

7.5.1 Vis d'Archimède

Le mouvement de rotation de l'axe de la Vis résulte du gradient de pression exercée sur la surface mouillée de part et d'autre d'une pôle. Cette différence de pression est inhomogène à cause de la forme la pôle, comme nous pouvons le voir à la figure⁵ 7.12. La zone rouge est le lieu où les pressions appliquées sur les parties supérieure et inférieure se compensent partiellement, dP est donc constant. La partie commençant aux extrémités de la zone rouge jusqu'à la zone bleu représente l'endroit où le delta de pression vaut $dP = \rho g dh$. Si dh augmente, dp augmente et donc la vitesse de l'écoulement au sein de la turbine aussi[11]. Nous pouvons voir à la figure⁶ 7.13 une représentation de ce gradient de pression et de dh au niveau de la Vis d'Archimède.

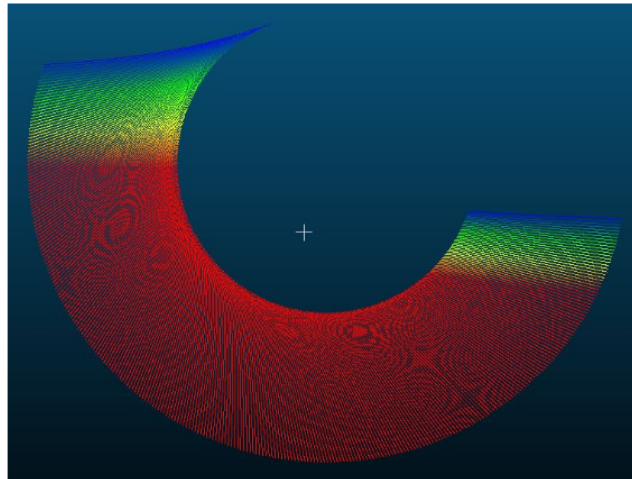


FIGURE 7.12 – Evolution du gradient de pression exercé sur une pôle de la Vis d'Archimède

5. *Etude expérimentale et optimisation des performances hydrauliques des vis d'Archimède utilisées dans les micro centrales hydroélectriques. Construction hydraulique. Université de Strasbourg, 2015., 18 juin 2020, https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01355570/file/Dellinger_Guilhem_2015_E_D269.pdf <http://hm.f.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2240>*

6. *Etude expérimentale et optimisation des performances hydrauliques des vis d'Archimède utilisées dans les micro centrales hydroélectriques. Construction hydraulique. Université de Strasbourg, 2015., 18 juin 2020, https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01355570/file/Dellinger_Guilhem_2015_E_D269.pdf <http://hm.f.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2240>*

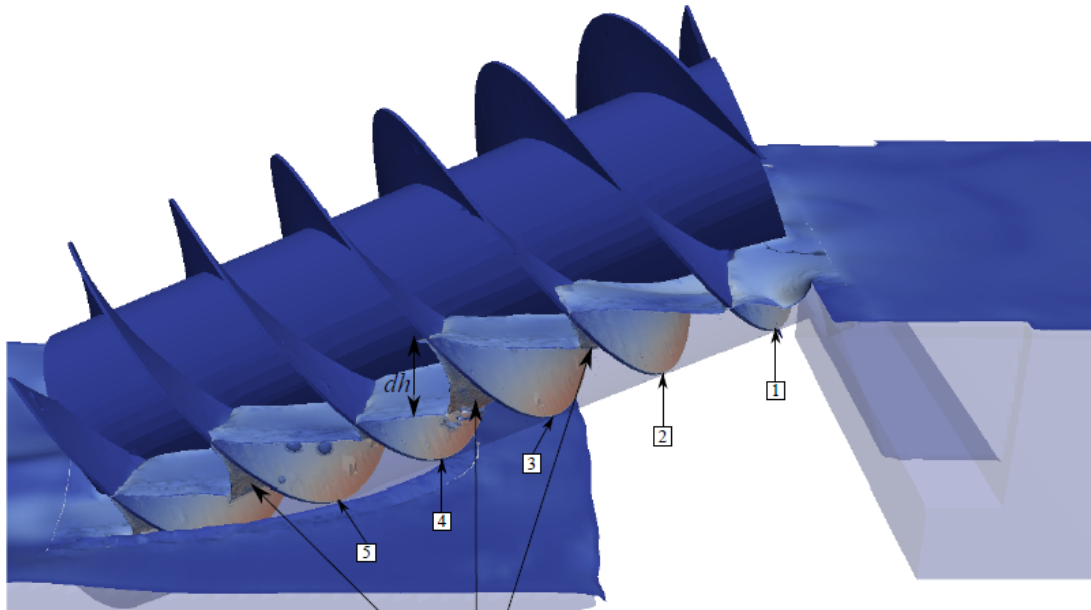


FIGURE 7.13 – Représentation de l'écoulement au sein de la Vis d'Archimède

7.5.2 Banki-Michell

Le fluide orienté grâce à l'injecteur arrive au niveau de l'aube supérieure du rotor de telle sorte que la vitesse relative w_1 y soit tangentielle, comme nous pouvons le voir sur la figure ⁷. Il traverse la roue pour ressortir au niveau de l'aube inférieure avec une vitesse relative w_4 qui lui est presque tangentielle. Nous pouvons voir la trajectoire de l'écoulement ainsi que son orientation grâce aux triangles de vitesse à la figure 7.14. Cette orientation en plus du double passage au sein de l'aubage rotorique permettent de convertir un maximum d'énergie cinétique en énergie mécanique. Nous pouvons voir la manière dont l'écoulement se fait à la figure ⁸ 7.15.

L'aube directrice du distributeur contrôle les débits à l'entrée de la turbine pour veiller à ce que le débit nominal choisi ne soit pas dépassé. De plus, la Banki-Michell peut fonctionner à charge partielle tout en ayant un rendement élevé, et ce pour autant que cette charge soit distribuée sur une partie de la turbine au moyen d'une vanne directrice réglée par un opérateur. Nous voyons la distribution du débit à la figure ⁹ 7.16. Fonctionner à faible débits tout en maintenant un rendement élevé est un atout pour notre cas d'étude.

7. *Étude mécanique et électrique*, 18 juin 2020, <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2240>

8. *Étude mécanique et électrique*, 18 juin 2020, <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2240>

9. *Étude mécanique et électrique*, 18 juin 2020, <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2240>

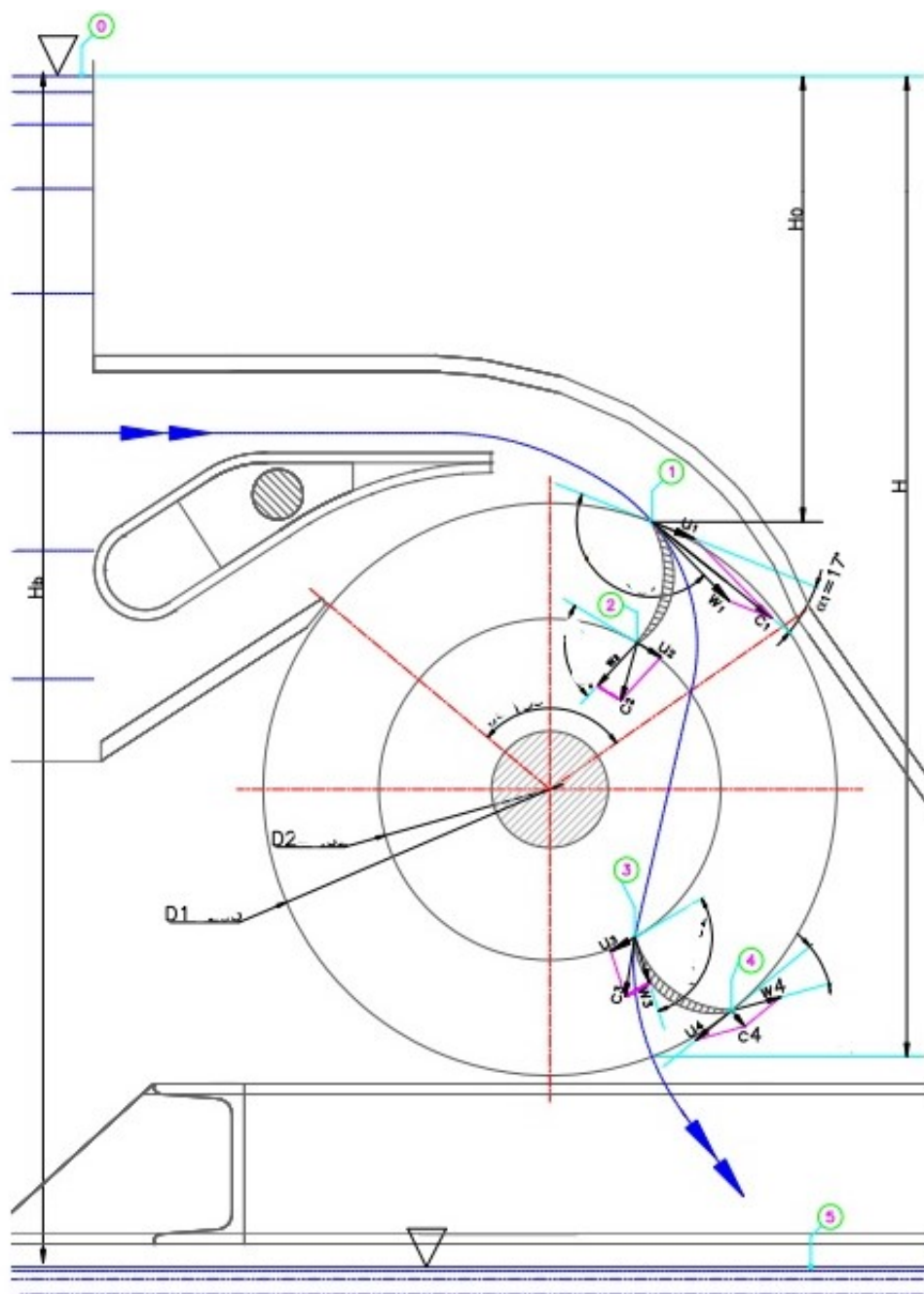


FIGURE 7.14 – Représentation de l'évolution des triangles de vitesses au sein de la Banki-Michell

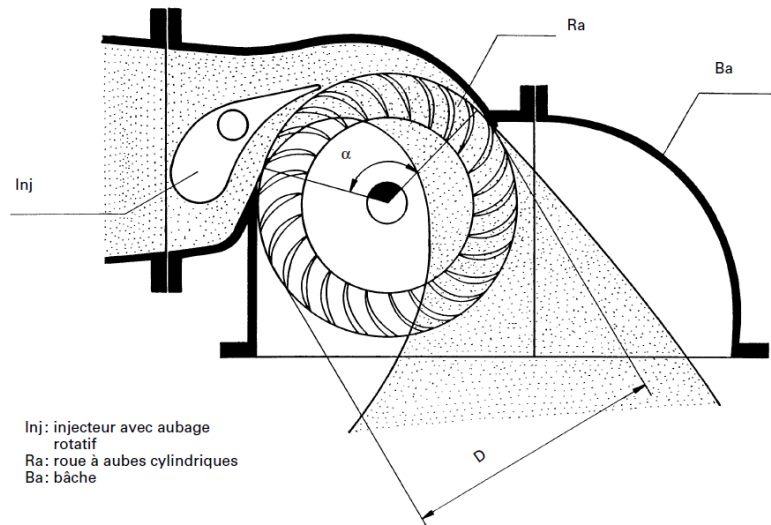


FIGURE 7.15 – Représentation de l’écoulement au sein de la Banki-Michell

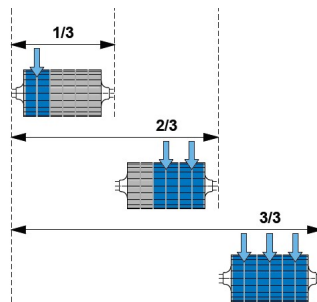


FIGURE 7.16 – Répartition du débit sur la Banki-Michell

Piste de réflexion : Nous pourrions nous pencher sur le problème de cavitation qui pourrait survenir dans certaines conditions. Il nous a été informé par JLA Hydro que pour une telle chute et un tel débit, les problèmes de cavitation ne se produisent pas. Cependant, il serait nécessaire de voir dans quelles conditions ils surviendront.

7.6 Dimensionnement final des turbines

Les détails des dimensions suggérées des turbines Vis d’Archimède et Banki-Michell se trouvent à l’annexeA, annexeB et annexeC.

Chapitre 8

Estimation des coûts de l'installation et niveau de consommation en électricité

8.1 Coûts

Dans une phase de prédimensionnement, l'évaluation des coûts est primordiale car l'enveloppe budgétaire conditionne les décisions finales entre le choix des contractants et ceux des équipementiers. Dès lors, il faut procéder à une estimation des coûts associés aux principales disciplines du projets (i.e. génie civil, montage, commissioning); l'achat d'équipement (turbines, autres équipements électromécaniques); les coûts de raccord aux lignes de transport et de distribution d'électricité; les coût de financement et taxes; les coût d'ingénierie (étude et design); les contingences (provisions pour aléas). De plus, il faut prendre en considération le coût lié à l'obtention de permis pour utiliser l'eau disponible, utiliser le barrage à des fins énergétique, générer de l'électricité et de la commercialiser[12]. Cela nécessite donc un accord entre le Ministère de l'Agriculture, le Ministère des Travaux Publics, Transport et Communication et EDH.

Nous nous sommes focalisés sur l'estimation des coûts liés aux équipements électromécaniques dans le but d'avoir un ordre de grandeur. Ces coûts ont été évalués à partir des renseignements fournis par les entreprises qui ont été contactées pour fournir les dimensions des turbines. Les coûts de raccordement ont été estimés quant à eux sur base d'un projet de micro-hydroélectricité réalisé en zone rurale dans un autre pays en voie de développement. Néanmoins ces coûts dépendent fort du contexte économique du pays et seront donc pris comme ordre de grandeur. Ils sont présentés aux annexes A et D.

Le coût d'opérations et de maintenance (e.g. formation, nombre de personnel, stock de pièces détachées, . . .) doit aussi être bien analysé en amont du projet.

Piste de réflexion proposée : Certaines formules empiriques ont été établies par des chercheurs permettant d'évaluer les coûts des équipements électromécaniques sur base de la puissance et de la hauteur de chute d'eau. Il serait intéressant de construire ce type de modèle en Haïti sur base des projets en hydroélectricité déjà aboutis et de diverses capacités en terme de puissance. Des documents proposent notamment une méthodologie pour construire loi empirique, le lien est en note en bas de page¹. Un second lien qui établit une comparaison entre les lois empiriques existantes est également en note en bas de page².

8.2 Raccordement au réseau et aux habitations

Le raccordement au réseau et aux habitations est un point qui dépasse le cadre de notre travail mais qui est essentiel et doit être approfondi ; ce dernier conditionne en effet fortement le coût global du projet et sa rentabilité selon la distance au réseau. D'autres solutions off-grid pourraient être envisagées comme par exemple des panneaux photovoltaïques avec batteries et onduleurs.

Piste de réflexion : Nous pourrions analyser la manière dont le raccord se fait entre la centrale hydroélectrique et les habitations, ainsi que la manière dont les conversions se font précisément pour atteindre une fréquence de 60Hz, pour conserver la puissance, pour diminuer le courant et augmenter le voltage jusqu'à la connexion finale. Nous pourrions également réfléchir aux différentes façons de maintenir le facteur de charge le plus élevé possible pour augmenter la puissance et donc limiter les pertes par effet Joule. De plus, nous pourrions rechercher le type de circuit utile pour la population à Dubreuil : de type capacitif et/ou de type inductif selon les besoins.

Nous noterons également que l'obtention du permis de raccordement par la société de distribution locale reste un élément essentiel à dérisquer en amont du projet, ainsi que l'obtention des droits de passage auprès des propriétaires des terrains concernés. Cela peut être compliqué dans des environnements où il n'y a pas de cadastre établi par les autorités publiques. Un aspect important est aussi d'analyser l'option d'enterrer ou non les lignes pour des questions de sécurité des populations. Le choix du matériel est aussi

1. Approach for Cost Determination of Electro-Mechanical Equipment in RoR Shp Projects : <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=4953>

2. Estimation of the cost of electro-mechanical equipment for small hydropower plants – review and comparison of methods, <http://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20171901023>

critique, pour éviter les vols notamment. La sécurité doit être traitée comme un risque prioritaire dans tout projet de construction. Nous voyons ainsi qu'il est nécessaire de procéder à une analyse et évaluation de l'ensemble des parties prenantes aux projets (population, consommateurs/ménages, équipementiers, contractants, autorités publiques, sociétés de distribution d'électricité,...). Il faut bien les identifier selon leur niveau d'influence et l'impact que le projet a sur eux, et de définir une stratégie appropriée (campagne de communication/information, engager des travailleurs du chantier parmi la population locale,...)

8.3 Coût de production et niveau de consommation d'électricité

Un tableau récapitulatif a été préparé et reprend les informations utiles pour calculer les coûts de production et de consommation d'électricité, et la consommation estimée par ménage, annexe F.

Piste de réflexion : Il serait intéressant d'évaluer la rentabilité du projet sur base de l'énergie produite et ajoutée au réseau et voir si elle suffit pour alimenter les ménages en électricité et durant combien de temps. Du côté de la demande, il est impératif de connaître les courbes de projection de consommation journalière et hebdomadaire ainsi qu'annuelle (saisonnalité); les distributeurs d'électricité devraient nous donner une telle information. Cela est aussi vrai pour la production, il peut y avoir des différences saisonnières importantes selon les périodes de l'année et la pluviométrie dans la région. Il est aussi important d'anticiper les évolutions de la demande et de projeter les besoins de consommation et la capacité d'extension du réseau.

Chapitre 9

Evaluation de l'impact environnemental et social d'une installation

Les impacts environnementaux et sociaux sont également important à évaluer même en phase de pré-projet.

9.1 Impact environnemental

Les critères, leurs pondérations et le tableau reprenant les impacts environnementaux dans diverses situations sont directement issue de l'article "Modelling the feasibility of retrofitting hydropower to existing South African dams"[12] :

Critères :

- A_e : surface que l'impact dit environnemental va altérer
- D_e : durée sur laquelle s'étend l'impact environnemental. Les impacts qui perdurent sur le long terme seront les plus dangereux.
- S_e : gravité des dommages sur l'environnement
- V_e : vulnérabilité de l'espace impacté (terres, écosystèmes)

$$Importance = (A_e + D_e + S_e)V_e$$

Chaque critère est pondéré de 1 à 5 avec 5 qui est le cas le plus grave. Ci-dessous les tableaux de l'article qui évalent l'impact dans différents cas.

Value	Importance	Prevention measures
3-6	Almost insignificant	None – project can continue as planned
7-18	Low	Unlikely – may be required on a small scale
19-27	Medium	Possibly before project can continue
28-48	High	Necessary before project can continue
49-75	Very high	Large-scale changes are compulsory

FIGURE 9.1 – Pondérations des critères de l’impact environnemental

Process	Affected party	Nature of impact	Minimum importance	Maximum importance
Geological surveying	Wildlife	Noise	Insignificant	Medium
Removal of existing vegetation	Natural vegetation	Modifying natural habitat	Insignificant	Medium
Road upgrading or expansion	General public*	Opportunity creation	Low	High
	Wildlife	Modifying natural habitat	Low	Very high
	Vegetation	Noise	Low	Very high
Excavation and earth-moving	Local hydro-geology	Modifying natural habitat	Insignificant	Medium
	Local geology	Modifying groundwater movement	Low	Very high
Dredging of watercourse	Aquatic habitats	Slope stability	Low	High
Temporary river diversion	Aquatic habitats	Modifying natural habitat	Low	High
Use of construction equipment	Wildlife	Modifying natural habitat	Low	Very high
	General public	Noise	Low	High
Presence of humans on site	Wildlife	Noise	Insignificant	Medium
	General public	Noise	Insignificant	Medium

Note: * Positive effects.

FIGURE 9.2 – Impact environnemental durant la construction

Table 10 Importance of environmental effects likely to occur during operation				
Process	Affected party	Nature of impact	Minimum importance	Maximum importance
Generation of renewable energy	General public*	Reduction of pollutants	Low	Very high
Permanent structures in riverbed	Aquatic habitats	Modifying natural habitat	Low	Very high
	General public	Negative visual impact	Low	High
Permanent river diversion	Aquatic habitats	Modifying natural habitat	Low	Very high
New overhead power lines	General public	Negative visual impact	Low	Very high
	Wildlife	Negative visual impact	Low	Very high
Alteration of flow rates	Aquatic animals	Modifying natural habitat	Low	Very high
	Vegetation	Modifying natural habitat	Low	Very high
	Farmers	Irrigation	Low	Very high
	General public	Altering recreational activities	Low	Very high
Operation of electromechanical components	General public	Noise	Insignificant	Medium
	Wildlife		Insignificant	Medium

Note: * Positive effects.

FIGURE 9.3 – Impact environnemental durant le temps opérationnel de l’installation

9.2 Impact social

Les impacts sociaux ont été considérés de la même manière que les impacts environnementaux dans ce même article[12] :

Critères :

- P_s : population affectée
- D_s : durée sur laquelle s’étend l’impact qui s’effectue sur la population. Les impacts qui perdurent sur le long terme seront les plus dangereux.
- S_s : gravité des dommages (changement du mode de vie)
- V_s : vulnérabilité de la population affectée

$$Importance = (P_s + D_s + S_s)V_s$$

Chaque critère est pondéré de 1 à 5 avec 5 qui est le cas le plus grave. Ci-dessous les tableaux de l’article qui évalent l’impact dans différents cas.

Value	Importance	Prevention measures
3-6	Almost insignificant	None – project can continue as planned
7-18	Low	Unlikely – may be required on a small scale
19-30	Medium	Likely before project can continue
31-48	High	Necessary before project can continue
49-75	Very high	Large-scale changes are compulsory

FIGURE 9.4 – Pondérations des critères de l'impact social

Process	Affected party	Nature of impact	Minimum importance	Maximum importance
Road upgrading or expansion	Local community	Damage to cultural and historical heritage sites	Low	Very high
Excavation and earth moving	Local community	Damage to cultural and historical heritage sites	Low	Very high
	Immediately adjacent residents	Noise	Insignificant	Medium
Dredging of watercourse	Local community	Damage to cultural and historical heritage sites	Low	High
Temporary river diversion during construction	Local community	Damage to cultural and historical heritage sites	Low	High
	Dependent farmers	Change in available flow	Low	Very high
	Community adjacent to river	Change in available flow	Low	Very high
Use of construction equipment	Immediately adjacent residents	Noise	Insignificant	Medium
	Local community	Loss of traditional values and practices	Low	Very high
Operation of electromechanical components	Immediately adjacent residents	Noise	Low	High
Permanent structures in riverbed	Local community	Loss of cultural and historical heritage sites	Low	High
	Community adjacent to river	Change in available flow	Low	Very high
Permanent river diversion	Local community	Loss of cultural and historical heritage sites	Low	High
	Dependent farmers	Change in available flow	Low	Very high
	Community adjacent to river	Change in available flow	Low	Very high
New overhead power lines	Local community	Loss of cultural and historical heritage sites	Low	Very high
Alteration of flow rates	Community adjacent to river	Health related problems	Low	Very high
Influx of workers from other areas	Local community	Loss of traditional values and practices	Low	Very high

FIGURE 9.5 – Impact social

Conclusion

Au travers de ce mémoire, nous avons détaillé pas à pas les étapes qui nous ont permis d'obtenir un premier prédimensionnement d'une installation microhydroélectrique à Dubreuil. Les données de base qui nous ont été fournies étaient les données topographiques du site que nous avons analysées et traitées sur QGIS et Athys. Le point d'amorçage de ce travail a été l'obtention de données satellitaires de pluviosités car aucune banque de données de pluies sur site n'a été établie à ce jour. Nous avons pu les convertir sur le logiciel Athys en écoulement superficiel, moyennant des hypothèses sur les pertes par infiltration et évapotranspiration, et sur le débit de base, pour évaluer les débits s'écoulant au niveau de la crête de barrage. Ainsi, une courbe des débits classés a pu être tracée sur 10 années. De cette courbe a pu découler plusieurs modèles. En effet, nous l'avons utilisée pour faire non seulement une modélisation de l'irrigation, mais également pour modéliser le niveau d'eau amont et aval du barrage sur le logiciel HEC-RAS. Par ailleurs, nous avons pu évaluer le débit maximal dans le déversoir, dimensionner les turbines et estimer approximativement leurs coûts.

Cette méthodologie offre donc une possibilité d'évaluer un prédimensionnement avec un nombre restreint de données. Les approches ainsi développées peuvent être transposables sur d'autres sites que celui de Dubreuil. De nombreuses pistes de réflexions ont été proposées tout au long de ce travail dans le but de compléter le plus précisément possible la méthodologie pour pouvoir in fine la valider.

Table des figures

1.1	Localisation du MNT initial sur Bing	5
1.2	MNT initial	6
1.3	MNT caractérisant l'écoulement superficiel	6
1.4	MNT caractérisant les directions de drainage	7
1.5	MNT caractérisant le réseau de pente	7
1.6	Bassin versant et réseau d'écoulement superficiel	8
1.7	Bassin versant et réseau d'écoulement superficiel (zoom)	8
1.8	Réalisation de la carte finale sur QGIS	9
1.9	Profil en long du terrain en amont et en aval du barrage	10
2.1	Pluviomètre	12
2.2	Pluviographe à 2 augets basculeurs	13
2.3	Format des fichiers de sortie de GIOVANNI	14
2.4	Sélection des paramètres d'entrée sur GIOVANNI	15
2.5	Représentation de la maille du satellite sur GIOVANNI	16
2.6	Calcul de l'erreur entre les données de précipitations mensuelles de 2 satellites	18
2.7	Simulation finale de la série chronologique des précipitations sur GIOVANNI	19
3.1	Hyétoqramme issu du module Vishyr de Athys	20
3.2	Formats des fichiers d'entrée de Athys	21
3.3	Conversion des fichiers d'entrée dans le module Vishyr de Athys	21
3.4	Sélection des évènements de pluies dans le module Mercedes de Athys	22
3.5	Hyétoqramme et hydrogramme simulés dans le module Mercedes de Athys	23
3.6	Représentation de la fonction de production SCS	24
3.7	Carte géologique du Département du Sud de Haïti	28
3.8	MNT .alt à entrer dans le module Mercedes de Athys	29
3.9	MNT .pen à entrer dans le module Mercedes de Athys	29

3.10	MNT .sbv à entrer dans le module Mercedes de Athys	30
3.11	Fenêtre de Mercedes indiquant les fichiers d'entrée et les coordonnées du bassin versant	30
3.12	Variation du paramètre S	32
3.13	Variation du paramètre V_0	33
3.14	Variation du paramètre Ia/S	34
3.15	Evolution du coefficient de perte de 2009 à 2019	37
3.16	Courbes des débits classés par an de 2009 à 2019	38
3.17	Courbe des débits classés sur 10 années de 2009 à 2019	38
4.1	Tendance des pluies mensuelles sur 10 années	40
5.1	Représentation du déversoir de Creager	43
5.2	Représentation géométrique du cours d'eau et de ses sections transversales	45
5.3	Limite entre les lits majeur et mineur d'une section transversale à l'aval du barrage	46
5.4	Niveau d'eau en fonction des débits classés obtenus après irrigation . .	48
5.5	Résultats de la simulation sur HEC-RAS	50
5.6	Hauteur de chute d'eau en fonction des débits classés obtenus après irrigation	51
5.7	Simulation de la rivière d'Acul du Sud en aval du barrage de Dubreuil .	51
6.1	Barrage de Dubreuil	53
6.2	Représentation du déversoir de Creager	54
6.3	Barrage et déversoir	54
6.4	Déversoir de Dubreuil	55
7.1	Courbe des débits classés obtenus après irrigation	56
7.2	Diagramme $H - Q$ pour la Vis d'Archimède	57
7.3	Diagramme $H - Q$ pour la Banki-Michell	58
7.4	Rendement manométrique de la turbine Banki-Michell	59
7.5	Rendement manométrique de la turbine Vis d'Archimède	59
7.6	Débits classés obtenus après irrigation et Puissance en fonction du temps pour la Vis d'Archimède	60
7.7	Débits classés obtenus après irrigation et Puissance en fonction du temps pour la Banki-Michell	61
7.8	$Q/Q_{nominal}$ et Puissance en fonction du temps pour la Banki-Michell . .	61
7.9	$Q/Q_{nominal}$ et Puissance en fonction du temps pour la Vis d'Archimède	62

7.10	Architecture de la Vis d'Archimède	67
7.11	Architecture de la Banki-Michell	68
7.12	Evolution du gradient de pression exercé sur une pôle de la Vis d'Archimède	69
7.13	Représentation de l'écoulement au sein de la Vis d'Archimède	70
7.14	Représentation de l'évolution des triangles de vitesses au sein de la Banki-Michell	71
7.15	Représentation de l'écoulement au sein de la Banki-Michell	72
7.16	Répartition du débit sur la Banki-Michell	72
9.1	Pondérations des critères de l'impact environnemental	77
9.2	Impact environnemental durant la construction	77
9.3	Impact environnemental durant le temps opérationnel de l'installation .	78
9.4	Pondérations des critères de l'impact social	79
9.5	Impact social	79

Liste des tableaux

3.1	Paramètres finaux des fonctions de production et transfert	35
3.2	Résultats finaux de la simulation du modèle de 2009 à 2011	36
3.3	Résultats finaux de la simulation du modèle de 2012 à 2014	36
3.4	Résultats finaux de la simulation du modèle de 2015 à 2017	36
3.5	Résultats finaux de la simulation du modèle de 2018 à 2019	37
5.1	Niveau d'eau à l'amont de la crête de barrage	43
6.1	Dimensions du barrage	52
6.2	Débit maximal dans le déversoir	53
7.1	Résultats finaux de la Vis d'Archimède pour un débit nominal de $0.25m^3/s$	62
7.2	Résultats finaux de la Vis d'Archimède pour un débit nominal de $0.50m^3/s$	63
7.3	Résultats finaux de la Vis d'Archimède pour un débit nominal de $1.00m^3/s$	63
7.4	Récapitulatif des capacités de l'installation avec une Vis d'Archimède .	63
7.5	Résultats finaux de la Banki-Michell pour un débit nominal de $0.25m^3/s$	63
7.6	Résultats finaux de la Banki-Michell pour un débit nominal de $0.50m^3/s$	64
7.7	Résultats finaux de la Banki-Michell pour un débit nominal de $1.00m^3/s$	64
7.8	Récapitulatif des capacités de l'installation avec une Banki-Michell . . .	64

Bibliographie

- [1] National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Energy Snapshot Haïti, 2015*. 16 juin 2020. URL : <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64121.pdf>.
- [2] Boston University Institute of SUSTAINABLE ENERGY. *Assessment of Haiti's electricity sector, 2018*. 16 juin 2020. URL : <https://core.ac.uk/download/pdf/286679084.pdf>.
- [3] SIBELGA. *Energide.be, 2020*. 16 juin 2020. URL : <https://www.energide.be/fr>.
- [4] Jean Edouard PAUYO. *Haïti Transport et Distribution de l'Electricité, 2017*. 16 juin 2020. URL : https://www.copenhagenconsensus.com/sites/default/files/electricity_grid_pauyo_french.pdf.
- [5] WBI. *Wallonie-Bruxelles International*. 16 juin 2020. URL : <https://www.wallonie.be/fr/acteurs-et-institutions/wallonie/autres-acteurs-publics-de-la-region-wallonne/wallonie-bruxelles-international-wbi>.
- [6] QGIS. *Documentation de QGIS 2.8*. 1^{er} juin 2020. URL : <https://docs.qgis.org/2.8/fr/docs/index.html>, 2016.
- [7] M. HEGDE. *GIOVANNI, 2020*. Version 4.34. 3 juin 2020. URL : <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
- [8] Agnès CRES François-Noel CRES CHRISTOPHE BOUVIER Anne CRESPIY. *Modélisation pluie-débit distribuée avec le logiciel ATHYS. Application au Gardon à Anduze. Manuel de formation, 2020, HydroSciences Montpellier*. 15 juin 2020. URL : <http://www.athys-soft.org/Formation\%20ATHYS\%20-\%20Manuel\%202020\%20-\%20FR.pdf>.

- [9] Mabrouk ABAZA. *Régionalisation des paramètres hydrologiques d'un modèle de prévision des crues, 2009-2010*. 15 juin 2020. URL : https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-09/010063034.pdf.
- [10] CEIWR-HEC GARY W. BRUNNER. *HEC-RAS River Analysis System, 2016. Version 5.0*. URL : <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>.
- [11] Guilhem DELLINGER. *Etude expérimentale et optimisation des performances hydrauliques des vis d'Archimède utilisées dans les micro centrales hydroélectriques. Construction hydraulique. Université de Strasbourg, 2015*. 20 mai 2020. URL : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01355570/file/Dellinger_Guilhem_2015_ED269.pdf.
- [12] SJ van Vuuren CL Blersch M van DIJK. *Modelling the feasibility of retrofitting hydropower to existing South African dams, 2011*. 20 mai 2020. URL : https://www.researchgate.net/publication/262543596_Modelling_the_feasibility_of_retrofitting_hydropower_to_existing_South_African_dams.

Appendices

Annexe A

Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède

A.1 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède

Thesis Design



Date : Wednesday, June 10, 2020
To : Mrs. Christiane Nlandu
Email address : christiane.nlandu@gmail.com
Phone Number : +32 489 86 18 69
No. of pages : 13
Your ref. : Archimedes Screw Master Thesis

P.O. Box 79, 8560 AB Balk
Meerweg 26, 8561 AV Balk
The Netherlands
T. +31 514 608 282
F. +31 514 604 485
www.spaansbabcock.com

Our quotation:	Our tender:
Q2016095 Rev0	CG 20-087

Contact person Bert Boersma Function Technical Sales Manager Direct dial +31 514 608 288 E-Mail b.boersma@spaansbabcock.nl

Subject : Off Grid Hydro Thesis

Dear Mrs. Nlandu,

Please find attached most answers to questions including a budget price of the components we were able to offer.

1	Introduction.....	3
2	Price sheet / Scope of supply.....	4
3	Terms and conditions	10
4	Datasheets	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
5	Curves.....	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
6	Examples	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
7	References.....	13

We trust this document is according to your expectations, nevertheless please do not hesitate to contact us if you should require further information or clarification.

Yours faithfully,
Spaans Babcock BV

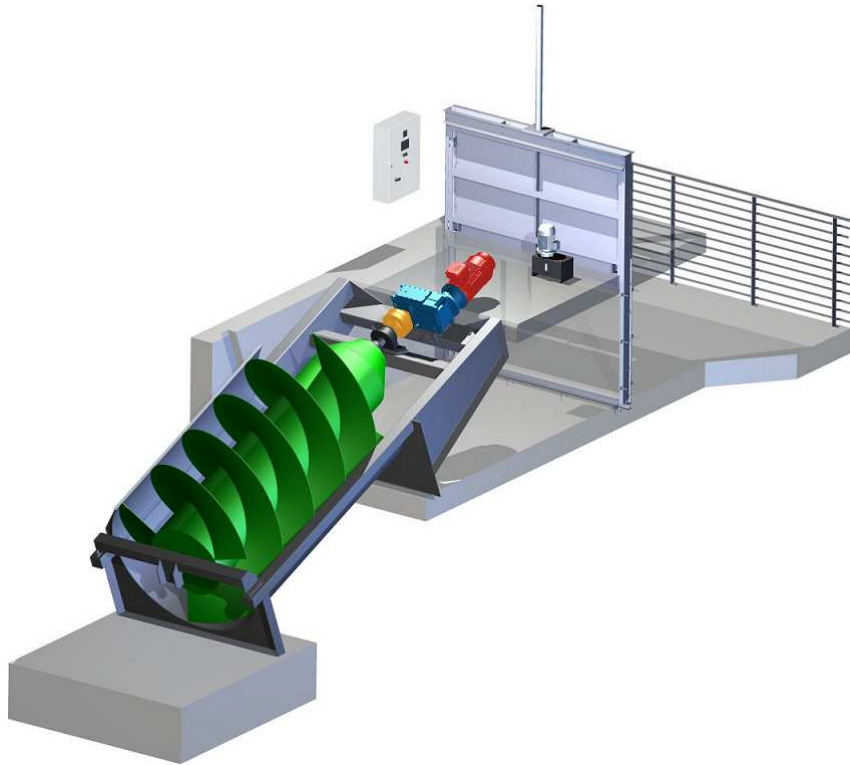
Bert Boersma
Technical Sales Manager

ABN AMRO BANK - IBAN NL11ABNA0242335268 - BIC-Swift code: ABNANL2A
Chamber of Commerce Leeuwarden Nr. 34004868 - EORI Nr.: NL001031077



A.2 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède

SPAANS BABCOCK SCREW GENERATOR



Typical Archimedean screw generator with compact style trough

A.3 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



Ref.: Q2016095 Rev0/CG 20-087

Date: 10-06-2020

1 Introduction

This offer is based on the email you have send the 09-06-2020.

This design is based on the following data:

Head	=	5.72m
Flow	=	1.0m ³ /s
Power installed	=	42kW
Power output	=	55kW

Control panel is an off-grid design. Excess power is being dumped with the use of heaters. These heaters are included. No transformer is included and also not the cabling is included.

We have offered a compact system which is very easy to install, plug and play. Also the amount of civils required is not much and very easy to make.

Maintenance is minimum with the use of an Archimedean screw.

The lower bearing is of an ECO type. Which means that this bearing is not grease or oil fed by a pump and piping system. This will give no risk of leakage or any other defect on the pump system which reduces the risk of failure or environmental risk.

The control of the turbine gate is done completely automatic. During an emergency shutdown routine, the gate will shut down quickly. The turbine gate can control the upstream water level before the gate by controlling the flow through the gate automatically.

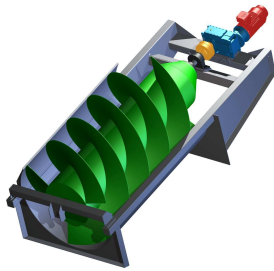

At this moment in time we do not have a known flood level. In order to finalise the design, we require this level so we can design the drive in such way it will not damage during a flood if there is any.

The coating used is of marine quality. It is an environmentally friendly coating which is not abrasive. 300-micron dry film thickness epoxy coating is used to protect steel part for a very long time even in harsh environments which is not the case for run in river projects.

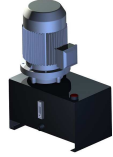


A.4 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède

2 Price sheet / Scope of supply

2.1 Delivery

Pos	Product	Description	Delivery
010		<p>1x Compact screw generator, Type STM2000-SL Compact screw generator with integrated drive system and self supporting through.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Capacity : 1000 l/s - Drop : 5,72 m - Diameter : 2000 mm - Installed power : 55 kW - Output power : 42 kW (at the generator clamps) <p>Scope of supply: General arrangement drawing according Spaans Babcock standard, Detail engineering / Design, Project Management.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Screw generator in Steel, with lifting lugs, epoxy coated - Steel tough liner, epoxy coated - Side profiles in Steel, epoxy coated - ECO lower bearing, greased for life* - Upper bearing with first fill of grease - Gearbox including first fill of oil - Gearbox base plate - Direct transmission (gearbox-generator) with safety guard - Emergency brake - Premium efficiency electric generator - Flexible coupling with safety guard <p>Application of anti-corrosion system, Quality Control in accordance with Spaans Babcock Quality Manual, standard Spaans Babcock Operation and Maintenance manual in English.</p>	Inclusive
020		<p>1x Intake gate</p> <ul style="list-style-type: none"> - Width : 2400 mm - Height : 1600 mm - Stroke : 1200 mm <p>Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Shutter and frame are steel with epoxy coating or is galvanised. - Gate frame to be grouted into rebate - Shutter with roller guide and 3-sided sealing - Including hydraulic cylinder - Prepared for hydraulic hosing 	Inclusive

A.5 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède

030		<p>1x Hydraulic power pack</p> <p>Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hydraulic actuator for intake gate - Automatic steered by the control panel - Including reservoir, pump and valves 	Inclusive
040		<p>Barscreen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Width : 2500 mm - Height : 1500 mm - Spacing : 150 mm <p>Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Security screen for mammals and large debris - Either horizontal or vertical bars - Galvanised steel. 	Inclusive
050		<p>1x Control panel</p> <p>Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Designed for off-grid operation; - Automatic start, stop and control of the generator and auxiliary equipment in the scope of Spaans Babcock; - Not limited for displaying of data like, power, operating hours etc; - Software, connection schedule, documentation in the English language; - Anti condensation heaters inside panel; - Service power socket 110V; - One level sensor is included. 	Inclusive
070		<p>Transport</p> <p>Delivery DAP Haiti Harbour, not unloaded according to Incoterms 2020.</p>	Excluded
080		<p>Installation, system integration and commissioning</p> <p>Mechanical installation 1 man from Spaans Babcock BV in combination with one fitter supplied by client. Included is one visit of 2 weeks during mechanical installation and commissioning.</p> <p>commissioning and system integration of the control panel.</p> <p>Mechanical commissioning Electrical commissioning</p> <p>Travelling time is included.</p> <p>Exclusive craneage, electrical cabling and grid connection.</p>	Inclusive

A.6 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



Total of the above	€152.500,00
---------------------------	--------------------

2.2 *Obligation of the client (not limited to)*

- Transport;
- Craneage;
- Airport - Site transfers of Spaans Babcock personnel;
- Electrical cabling (interconnecting);
- Hydraulic oil, hosing/piping;
- Internet connection;
- Grid connection;
- High voltage cabling;
- Mains protection relay (phase shift, over/under voltage and over/under frequency) DNO dependant;
- Power factor corrector (if required)
- Certified power meter (export) usually supplied by the electricity purchaser)
- Transformer;
- All civil engineering, materials and works;
- All necessary planning and licenses.

A.7 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



2.3 Functional description

Pos 010 Trough

Compact system: This design contains not only a screw and trough but fabricated water inlet and a discharge section which together form a prefabricated generating station. All foundations are included like the drive and bearing foundation and the total machine will be delivered usually in one piece. With the prefabricated inlet and outlet, it is possible to include the gate and bar screen in the design. Installation of the screw generator can be done in one day. Because only minimal support is necessary, this trough construction gives a small amount of civil cost but a higher mechanical cost. When no existing civils can be used, significant overall cost savings are possible.

Lower Bearing

For Spaans screw generators we offer our ECO-type lower bearing; this is a totally enclosed bearing, sealed and greased for long life. This bearing does not require an external grease lubricator.

- No Grease pump,
- No grease and electricity consumption
- No maintenance
- Environmentally friendly
- Fish Friendly

Drive unit

- All parts including electrical generator with gearbox, brake, couplings, bearings and necessary guarding are usually pre-mounted where possible and aligned, and delivered to site as a complete drive foundation package.
- The drive unit is equipped with an emergency brake which, for security reasons, is sized to stop the screw.
- The gearbox is delivered with first fill of oil.
- Drive unit is delivered with foundation frame for installation. After installation the drive foundation is grouted by the civil contractor.

Pos 020 Turbine gates

This is a professionally built turbine gate to industrial standards offering a very robust construction and long-life time. The turbine gate will open under hydraulic pump pressure and will shut quickly upon an urgent shutdown routine or power failure (failsafe close). The hydraulic unit will be controlled by the electrical control panel. We have included for the hydraulic unit with motor and pump. The turbine gate will be fabricated from mild steel, shot blasted to SA2.5 and coated with 2 x 150 microns of black epoxy or is galvanised. The gate is designed to hold the head of water on the upstream side of the generator. It is designed to have minimal clearances and allow a very small percentage of leakage into the screw inlet chamber.

Pos 030 Hydraulic unit

The hydraulic unit is steered by the control panel.

Pos 040 Barscreen

The barscreen is made out of steel and hot dip galvanised. The reason for this screen is mammal safety and the protection of the equipment against large debris.

A.8 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



2.4 Environment

It should be noted that all electrical and mechanical equipment will transmit noise and heat. We take these issues very seriously and design our equipment to minimise noise / disturbance levels as much as possible.

Noise

Noise is emitted from the electrical equipment, generator and gear arrangement within the control room. We can provide all relevant figures of the electrical equipment, generator and gear arrangement, to allow for the design of this control room to be sure such nuisance noise can be reduced.

The water flowing through the turbine will also produce noise, as will the effects of the flights in the lower section of the screw, particularly at low flow and low head conditions. We can offer covers and noise reduction designs to minimise these effects in areas of particular concern. Variable speed operation as described above will reduce this noise.

Since all sites are different this needs to be considered on a per site basis. Some noise precautions could decrease power output slightly.

Heat

A certain amount of heat will be emitted in the control building from the generator, gear unit, bearing and control system depending upon the individual design. If the client is providing the control room over the drive then provision needs to be made for adequate ventilation to limit heat build-up. Buildings should be designed to be a maximum of 30 Degrees Celsius when equipment is operating at full power. As a guide, you should allow approximately 10% of the output power as heat that needs to be removed.

A.9 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



Ref.: Q2016095 Rev0/CG 20-087

Date: 10-06-2020

2.5 Standards

The work will be carried out in accordance with a number of standards including:

Scope of supply

General arrangement drawing according Spaans Babcock standard
Detail engineering / Design Project Management

Assembly

Pre-assembly of the drive unit
Application of anti-corrosion system

Safety

Depending on the scope of supply, the applicable CE information will be supplied. In case of partial delivery, the client must ensure that health and safety requirements of the whole system and surrounding area are secured.

ISO9001 Manufacture

Welding methods according EN 15614-1, welders qualified according, ASME IX and AWS.
Quality Control in accordance with Spaans Babcock Quality Manual

Manual

Our screw generator come with a standard Spaans Babcock Operation and Maintenance manual in English, German, Dutch, French or Spanish

Grid connection

The offered screw generator requires connection to the public grid.

Output

The mentioned output is the theoretical output at the generator terminals under the design conditions. The actual output is based on the real site conditions, cabling and the electrical installation. We can therefore not give any guarantees for the generated power.

A.10 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



Ref.: Q2016095 Rev0/CG 20-087

Date: 10-06-2020

3 Terms and conditions

In addition to below conditions, the terms and conditions of Orgalime S2012 with supplement S2012 S shall be exclusively applicable. A copy of these conditions can be downloaded via following link:
http://www.spaansbabcock.com/wp-content/uploads/2017/11/General_Terms_and_Condtions_Orgalime_S2012.pdf and
http://www.spaansbabcock.com/wp-content/uploads/2017/11/Orgalime_S12_Suppl_Cond_for_Supervision.pdf
Unless otherwise agreed in writing, applicable law is Dutch law under the jurisdiction of a Dutch judge.

3.1 Validity

2 months after date of quotation. Please note that our material costs can fluctuate due to the world steel prices, therefore the final pricing will be based on steel prices at the time of order placement.

3.2 Price basis

Net, excl. VAT, other taxes and duties.

Prices are calculated on the basis of time/days as described in the scope of supply. Any additional time over and above this will be charged extra.

3.3 Terms of payment

a) 30% of order amount with order, within 7 days after invoice
b) 30% of the order value at half-way manufacturing, within 14 days
c) 40% of the order value at delivery ex works, within 14 days
b) and c) of the payments against an irrevocable L/C confirmed by an acceptable first-class bank of our own choice, all costs borne by opener. The L/C shall be opened immediately with the order. The parts or equipment remain the property of the vendor until full payment has been received.

3.4 Delivery time

Total Ex Works delivery time is 18-20 weeks based on the following conditions:

- After receipt of the signed and accepted order, the general arrangement drawings will be supplied in 12-15 working days;
- The client has to approve these drawings within two weeks. (Should approval take more time and/or major revisions are to be implemented, delivery time may have to be rescheduled);
- Manufacturing and purchasing will start after drawing approval, payments received as under §3.3 and received and accepted L/C.

3.4.1 Terms of delivery (unless specifically included in our offer)

FCA Balk according Incoterms 2020.

3.4.2 Transfer risk

The purchaser shall assume risk for the goods or parts thereof on departure from Balk, responsibility for insurance therefore passes on departure.

In the event that the site is not ready to receive the equipment on the agreed delivery date, the equipment will either be delivered and offloaded for storage at the site with any additional costs for this being borne by the client and an invoice raised, or delivered into storage and invoiced against a vesting certificate, storage charges would then be applicable in accordance with our standard rates which are available on request. In this case, we consider the goods as being delivered as in §3.4.1.

3.5 Liability

We shall not accept liability for any damages, including any consequential losses, and for (stagnation) associated with the installation, testing, etc.

Any work done or any services rendered by third parties shall only be paid upon submission of an order signed by Spaans Babcock.

3.6 Quality assurance / Control / Inspection / Testing and Certificates

Spaans Babcock will exercise full and adequate assurance / control which will include; handling, engineering and inspection of the goods before and during manufacturing as well as assembling according to the Spaans Babcock standard ISO 9001 QA/QC-plan and procedures.

A.11 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



Ref.: Q2016095 Rev0/CG 20-087

Date: 10-06-2020

3.7 Guarantee

Offered equipment is guaranteed during a period of 12 months after start-up with a maximum time limit of 18 months after notice ready for shipment, whichever expires first. However, this guarantee is only valid when installation has been checked by a Spaans supervisor. Also, claims shall only be considered if the equipment has been operated in accordance with the details included in our Operation & Maintenance Manuals.

Any guarantee claims made under this clause will not be valid if the failure or damage is caused by any system, product or service, which does not form part of the Spaans Babcock scope of supply under the contract, this includes, but is not limited to, electrical control panel, electrical connections, gate(s), hydraulic unit(s). Any failure, non-performance or faulty design of such systems, products or services may cause serious damage or excessive wear to items supplied by Spaans Babcock, including, but not limited to, gearbox, generator, couplings, brake, bearings.

3.8 Design conditions

The design as well as the design parameters of the solution offered is based upon information obtained from the client. Should the client fail to provide any data, information (design parameters), necessary to design the system, all calculations, values, data, made by Spaans Babcock in order to perform the contract, shall be for the account and exclusive risk of the client and fall outside the responsibility of Spaans Babcock.

If any changes are required in the design or design parameters, Spaans Babcock will requote based on the latest information received. For any changes in the parameters and equipment design requested or deemed necessary after signing of the contract, all costs related to such modifications will be charged to the client.

All our equipment is designed to operate in the following conditions, unless specifically detailed in our quotation:

- A well-ventilated area (wind speed >2m/s)
- Protected from direct sunlight
- Ambient temperature between 0 and 40 °C
- Altitude above sea level between 0 and 1000m

For optimum performance it is essential that the plant operates according to the design parameters and the plant is operated and maintained in accordance with instructions and the Operations and Maintenance Manual provided by Spaans Babcock.

* Mentioned expected output is an expected peak load at design conditions

3.9 Documents and drawings

In case of an order a GA (general arrangement) drawing will be prepared and sent for approval. Comments, if any, will be incorporated in the final GA drawing. Any alternations in the general arrangement drawing, which cause a change in our scope of supply will be notified, together with the resulting change in price.

The GA drawing contains the following:

- Lay-out of the ordered equipment
- Overall dimensions
- Foundation loading data

3.10 Changes in work

The client may, prior to shipment, by written request, make reasonable changes in the drawings, designs, specifications, methods of shipment or packing, or time or place of delivery or require additional or reduced work. If any such changes cause an increase or decrease in the cost of, or the time required for, performance hereunder, the purchaser shall be liable to the seller for any such increases in cost, or Seller shall be liable to Purchaser for any such decrease in cost, and a prompt and equitable adjustment shall be made to any shipping or delivery schedules previously agreed to by the parties.

3.11 Assignment

Spaans Babcock shall have the right to assign or novate the contract, in whole or in part, to any of its affiliates or any third party.

3.12 Force majeure

Force majeure clause as mentioned in the above-mentioned Terms and Conditions are applicable, this includes possible delay in delivery caused by a pandemic situation such as the corona virus.

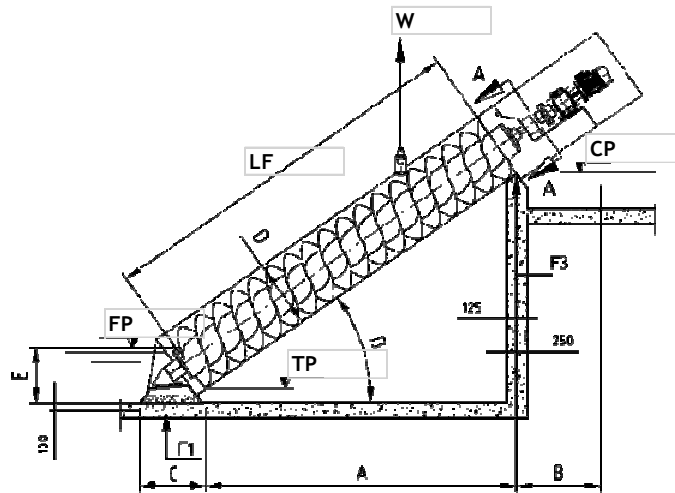
A.12 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



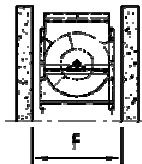
Ref.: Q2016095 Rev0/CG 20-087

Date: 10-06-2020

4 Sketch



"A-A"



Capacity: 1000 l/s
Rated power: 55 kW

Sketch not to scale!

Pumping point (Max.) (PP)	10 m	A	7800 mm
Chute point (CP)	9,21 m	B	1850 mm
Filling point (FP)	4,28 m	C	1050 mm
Touch point (TP)	3,49 m	Diameter (D)	1970 mm
Length of flights (LF)	9500 mm	E	900 mm
Inclination (B)	37 °	F	1530 mm
F1	91 kN		
F3	130 kN	Weight (W)	14630 kg

© Spaans Babcock 2020. All above mentioned data are mean values and based on the Spaans Babcock standard design and cannot be seen as strictly binding. We reserve the right to modify our technical specifications.

A.13 Dimensionnement et prix de la Vis d'Archimède



Ref.: Q2016095 Rev0/CG 20-087

Date: 10-06-2020

5 References

few references below

Low Wood

Client: Land Owner
Trough Type: Semi Compact
Date: Feb 2011
Output [kW]: 2x217
Flow rate[m³/s]: 8.000
Head [m]: 7.2
Turbine D [m]: 2x3



Tees White Water

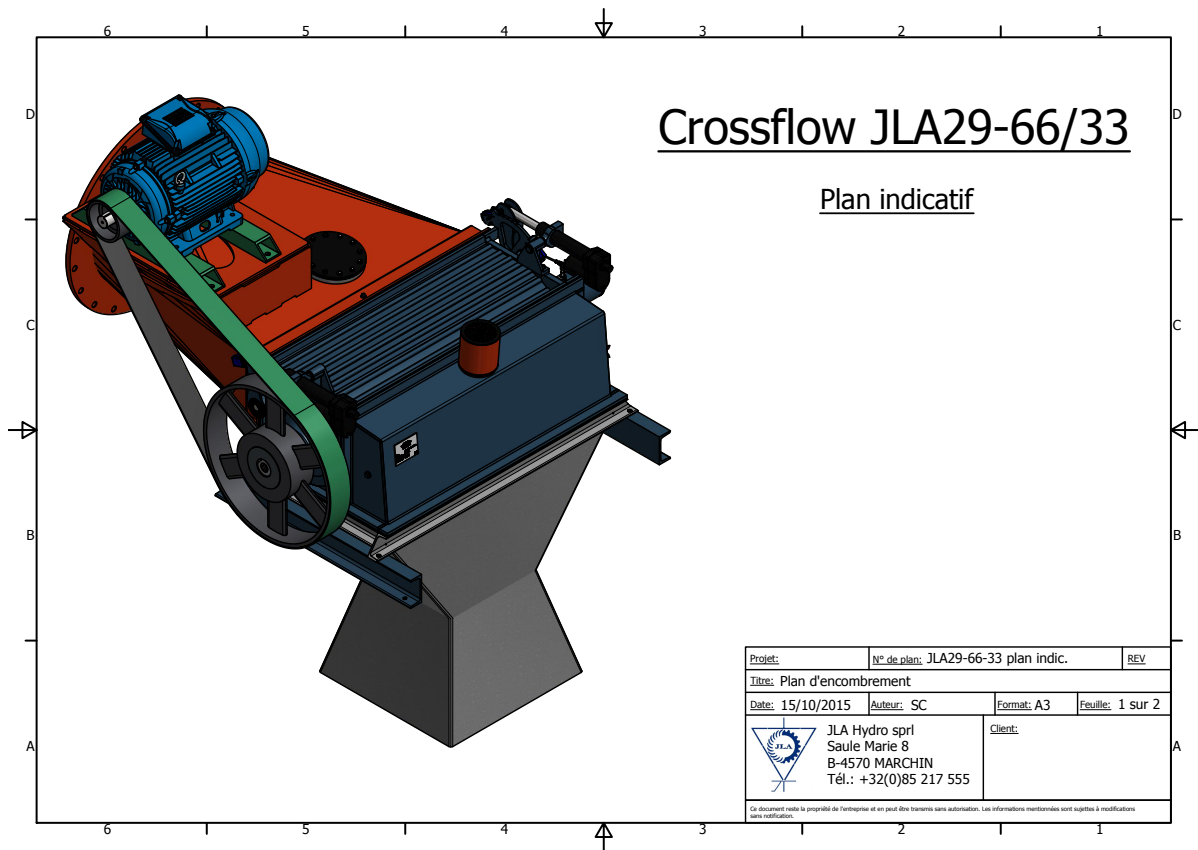
Client: Contractor
Trough Type: Semi Compact
Date: Mar 2010
Output [kW]: 4x109
Flow rate [m³/s]: 14
Head [m]: 4.14
Turbine D [m]: 4x3.1



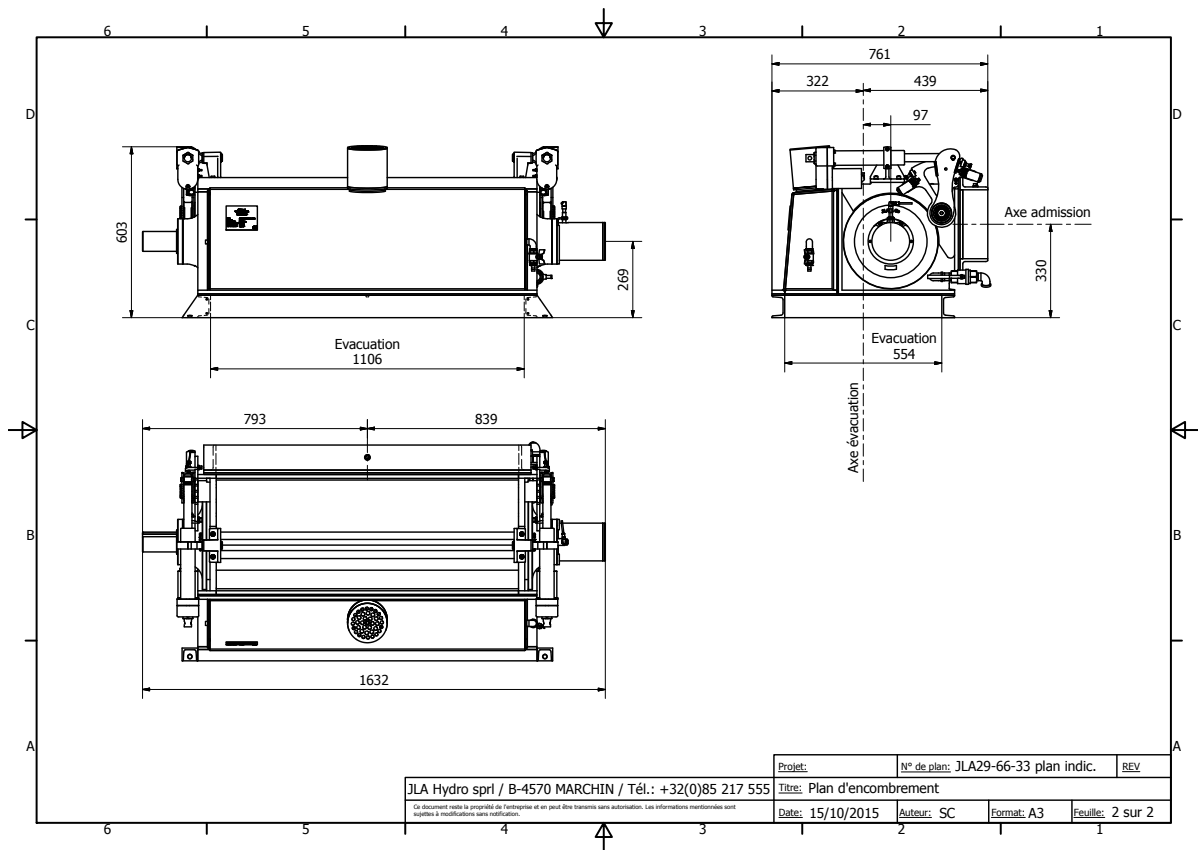
Annexe B

Dessin technique de la Banki-Michell JLA29-66-33

B.1 Dessin technique de la Banki-Michell JLA29-66-33



B.2 Dessin technique de la Banki-Michell JLA29-66-33



Annexe C

Calcul de puissances des Banki-Michell

C.1 Calcul de puissances des Banki-Michell

Dimensionnement de Banki-Michell JLA Hydro sprl

Cas 1 : Débit nominal de 1.0 m3/s

Référence turbine	JLA52-36/71-11DH	
Données techniques		
Hauteur de chute	5.72	m
Débit nominal	1000	l/s
Puissances		
	<u>Débit</u>	<u>Pmec</u>
	1000	44.3
	916	42.2
	785	36.6
	524	23.8
	346	15.3
	262	12.1
	175	7.6
	139	5.4
		<u>Pelec</u>
		41.4
		39.4
		34.3
		22.3
		12.8
		10.1
		6.3
		4.5
Vitesse de rotation	175	tr/min
Vitesse d'emballlement	315	tr/min

Cas 2 : Débit nominal de 0.5 m3/s

Référence turbine	JLA52-33/66-7DH	
Données techniques		
Hauteur de chute	5	m
Débit nominal	504	l/s
Puissances		
	<u>Débit</u>	<u>Pmec</u>
	504	19.0
	390	15.6
	260	10.3
	195	7.2
	130	5.1
	104	3.9
	78	2.7
		<u>Pelec</u>
		6
		3.7
		1.6
		1.1
		0.4
		0.3
		0.2
Vitesse de rotation	292	tr/min
Vitesse d'emballlement	525	tr/min

Annexe D

Estimation du coût de Banki-Michell JLA29-66-33

D.1 Estimation du coût de Banki-Michell JLA29-66-33

Coût associé à la JLA 29-66/33

Distance de Dubreuil au réseau HT à Chantal	8.8	km
Ligne (sans les poteaux)	7000	€/km
Lignes considérées	61600	€
Transformateur	7500	€
Accessoires	5000	€
Prix entretien	inconnu	
Tableau électrique	inconnu	
1x : Kit d'outillage	5000	€
2x : Turbines + Accessoires + Chaudronneries d'admission/d'évacuation	70000	€
2x : Châssis + alternateur + transmission	50000	€
1x : Groupe hydraulique de gestion des vannes	4000	€
1x : Armoire électrique avec régulation de fréquence	35000	€
1x : Banc de charges	6000	€
1x : Armoire électrique avec régulation de fréquence	35000	€
Si le site est connecté, on passe de 41000€ à :	20000	€
Prix de l'installation	30000	€
Prix du transport	6000	€
Bilan total	335100	€

Annexe E

Zone Electrique

E.1 Zone Electrique

ELECTRIFICATION

Zones électrifiées

LEGENDE

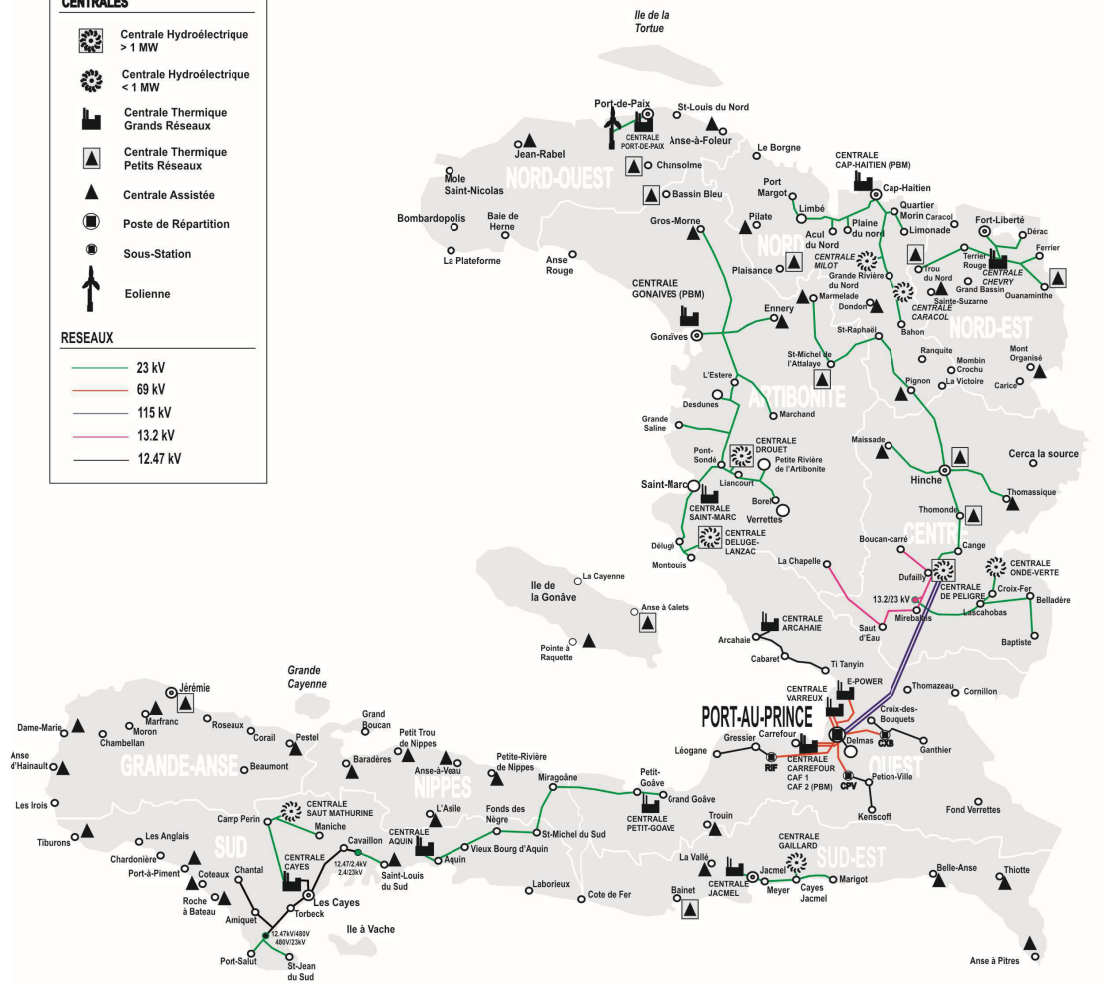
- Chef Lieu de Département
- Villes Principales
- Villes et Villages

CENTRALES

- Centrale Hydroélectrique > 1 MW
- Centrale Hydroélectrique < 1 MW
- Centrale Thermique Grands Réseaux
- Centrale Thermique Petits Réseaux
- Centrale Assistée
- Poste de Répartition
- Sous-Station
- Eolienne

RESEAUX

- 23 kV
- 69 kV
- 115 kV
- 13.2 kV
- 12.47 kV



ELECTRICITE D'HAÏTI

Mai 2015

Annexe F

Coûts et consommation en électricité

F.1 Coûts et consommation en électricité

Coûts et consommation en électricité

Information sur la région du Sud (Cayes)

Ligne HT	12.47	kV
Voltage en Haïti	110	V
Capacité installée	11600	kW
Capacité effective	7200	kW (ou 7600kW selon certaines sources)
Peak load	8000	kW (ou 21246 selon certaines sources)
Consommateurs actifs	18546	-
Consommateurs inactifs	16574	-
Consommateurs totaux	35120	-

Tarifs pour les consommateurs

		(0.25\$/kWh si de nouvelles de technologies sont utilisées)
Coût de l'électricité chargé par EDH	0.350	\$/kWh
Tarif moyen électricité (résidentiel)	0.28	\$/kWh
Coût de l'électricité payé par les consommateurs résidentiels	0.120	\$/kWh
Coût de l'électricité payé par les consommateurs résidentiels	0.126	\$/kWh

Consommation moyenne d'un ménage

Consommation d'un ménage	600	kWh/ménage
--------------------------	-----	------------

Coût de production d'électricité

Coût de production de l'hydroélectricité	0.05	\$/kWh
Coût de production d'électricité avec groupe électrogène min	0.4	\$/kWh
Coût de production d'électricité avec groupe électrogène ma	2	\$/kWh
Coût des producteurs indépendants pour EDH	0.073	\$/kWh
Coût moyen électricité des nouvelles centrales	0.0879	\$/kWh

F.2 Coûts et consommation en électricité

Coût maintenance		
Entretien des lignes	0.01	\$/kWh
Coût du gasoil		
Coût gasoil	59.175	HTG/liter
Remarques intéressantes d'une des sources d'informations		

The grid is completed by a 7.2/12.47 kV distribution line of 900 km and a 2.4/4.16 kV distribution line of 20 km. The total length of transmission and distribution lines for the Metropolitan Region is of about 1029 km.

Because there is no large distance between the power plants and the distribution area in other regions, the voltage level of transmission and distribution lines is generally the same.

Generally it is 13.2/23 kV, but for some power plants and grids of the same region, voltage levels are 7.2/12.47 kV or 2.4/4.16 kV.

Sources
Haiti Energy Sector Development Plan 2007 - 2017, Ministry for Public Works, Transportation and Communications
http://www.bme.gouv.ht/energie/National_Energy_Plan_Haiti_Revised20_12_2006VM.pdf

Energy Snapshot Haiti
<https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64121.pdf>

Assessment of Haiti's electricity sector
<https://core.ac.uk/download/pdf/286679084.pdf>

HAÏTI TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITE

F.3 Coûts et consommation en électricité

https://www.copenhagenconsensus.com/sites/default/files/electricity_grid_pauyo_french.pdf

Haiti Gasoline prices, liter, 15-Jun-2020

https://www.globalpetrolprices.com/Haiti/gasoline_prices/

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl