

# Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

## Travail de bachelor Diplôme 2017

*Jennifer Rohrer*

*Concept de régulation d'une turbine  
hydroélectrique par débit fortement variable*

- *Professeur*  
Davide Pavanello
- *Expert*  
Pierre-Alain Gabbud
- *Date de la remise du rapport*  
18.08.2017

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.  
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

Filière / Studiengang <b>ETE</b>	Année académique / Studienjahr <b>2016/2017</b>	No TD / Nr. DA <b>er/2017/77</b>
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student <b>Jennifer Rohrer</b>  Professeur / Dozent <b>Davide Pavanello</b>	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <sup>1</sup> <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte ( <i>données complètes</i> ) <b>Pierre-Alain Gabbud</b> DPE Electrotechnique SA, Rue du Manège 25, CP 290, 3960 Sierre Tél +41 (0) 27 452 30 00 <a href="mailto:pierre.alain.gabbud@dpe.ch">pierre.alain.gabbud@dpe.ch</a>	

Titre / Titel <b>Concept de régulation d'une turbine hydroélectrique par débit fortement variable</b>
Description / Beschreibung  L'usine hydroélectrique du Domaine de Beudon n'exploite à présent qu'une partie de sa capacité installée de turbinage à cause d'un mode de fonctionnement exclusivement manuel. Le travail proposé vise à concevoir et mettre en service un système de régulation qui permette à l'usine de fonctionner en mode automatique, suivant le débit saisonnier.  Objectifs / Ziele – Etat des lieux du fonctionnement manuel actuel et définition des fonctionnalités automatiques souhaitées – Analyse des paramètres (grandeurs à mesurer) et du hardware nécessaires à la régulation – Mise en place d'un set minimum de mesures permanentes (en collaboration avec un deuxième diplômé). – Spécification et installation du hardware nécessaire à la régulation – Monitoring à distance des kWh produits

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum  Responsable de l'orientation / filière <i>Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:</i>  .....   <sup>1</sup> Etudiant / Student :  <i>J. Roh</i> .....	Délais / Termine  Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: <b>15.05.2017</b>  Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation <b>08 – 09.06.2017</b>  Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: <b>18.08.2017 / 12h00</b>  Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: <b>30.08 – 31.08 – 01.09.2017</b>  Défense orale / Mündliche Verfechtung: <b>Semaine 36 / Woche 36</b>
--	--

<sup>1</sup> Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.  
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.



## Concept de régulation d'une turbine hydroélectrique par débit fortement variable

Diplômant/e Jennifer Rohrer

### Objectif du projet

Le but principal était de mettre en place un système de régulation pour automatiser une centrale hydroélectrique existante. D'autres objectifs étaient l'installation de mesures permanentes et le monitoring à distance des kWh produits.

### Méthodes | Expériences | Résultats

#### Méthodes :

- Renseignement sur les petites centrales hydroélectriques
- Etat des lieux du fonctionnement initial de la centrale avec :
  - L'inventariage des installations sur place
  - L'analyse des schémas électriques
  - Des tests de fonctionnement
- Analyse des différentes variantes possibles d'automatisation
- Détermination des éléments nécessaires à l'exploitation automatique
- Demandes d'offres et commande de ces éléments
- Programmation de l'automate choisi
- Installation des éléments commandés

#### Résultats :

- Démarrage et régulation automatique possible
- Deux types de régulation à disposition (régulation à 3 points et PID)
- Des propositions pour le monitoring et les mesures permanentes

Travail de diplôme  
| édition 2017 |

#### Filière

*Energie et techniques  
environnementales*

#### Domaine d'application

*Energies renouvelables*

#### Professeur responsable

*Davide Pavanello  
davide.pavanello@hevs.ch*



Mise en place de la sonde de pression dans le bassin d'accumulation.



L'automate et l'IHM

## Sommaire

1	Introduction.....	7
2	Les petites centrales hydroélectriques .....	8
2.1	Définitions .....	8
2.2	Turbines hydrauliques .....	9
2.2.1	Principaux types de turbines hydrauliques [7].....	9
2.2.2	Caractéristiques principales [3], [7].....	10
2.2.3	Turbine Pelton [4].....	11
2.3	Machines électriques [5] .....	12
2.4	Régulation .....	14
2.4.1	Les différents modes de régulation des turbines [6] .....	14
2.4.2	Les différents points de mesure du niveau d'eau [6].....	14
2.4.3	Les paramètres de réglage de la turbine [6] .....	15
2.4.4	Les différentes étapes de fonctionnement [4], [5], [6] .....	15
2.4.5	Appareils pour la mesure de niveau [8] .....	16
2.4.6	Types de régulateurs [8].....	17
3	Site hydroélectrique de Beudon.....	19
3.1	Description du site.....	19
3.2	Etat initial .....	22
3.2.1	Fonctionnement de la centrale .....	22
3.2.2	Description de l'état des installations.....	23
3.2.3	Tests de fonctionnement et vérifications.....	32
3.3	Variantes d'amélioration envisagées .....	37
4	Travaux exécutés.....	38
4.1	Analyse et actualisation des schémas électriques .....	38
4.1.1	Plan de câblage et schéma développé (turbine 1) .....	38
4.1.2	Schéma de la mesure du niveau.....	38
4.1.3	Schéma de l'entraînement du pointeau de l'injecteur (turbine 1) .....	41
4.1.4	Schéma de connexion du nouvel automate.....	43
4.2	Demandes d'offres .....	46
4.3	Les nouveaux composants .....	49
4.3.1	La mesure de niveau analogique .....	49
4.3.2	L'automate programmable (API).....	50
4.3.3	La protection contre la surtension .....	52
4.4	Réparations réalisées .....	53

4.5	Monitoring à distance .....	55
4.6	Programmation de l'automate.....	56
4.6.1	Les premiers essais de programmation.....	56
4.6.2	Description du programme .....	57
4.6.3	Test de fonctionnement du programme .....	61
4.6.4	Configuration du module de communication [28].....	62
4.7	Le nouveau manuel d'utilisation de la turbine 1.....	64
5	Propositions d'appareils pour la mesure du débit .....	69
6	Propositions pour des améliorations futures.....	74
7	Conclusion .....	75
8	Remerciements .....	75
9	Bibliographie.....	76
10	Table des illustrations.....	79
11	Annexes .....	81

## 1 Introduction

L'objet du travail est la micro-centrale hydroélectrique (composée de quatre turbines) de Beudon, une propriété privée appartenant à Mme Granges au-dessus de Fully (Valais) dans laquelle on turbine l'eau du torrent de Beudon. Les installations électriques ont été réalisées par le bureau d'ingénieurs M. Schwarz Möriken. D'anciens essais d'automatisation ont été faits mais les résultats n'étaient pas satisfaisants, tant par leur fonctionnement que par leur fiabilité. C'est pour cela que son exploitation était au début du projet entièrement manuel. Ceci n'est pas une situation optimale pour la propriétaire du site, parce que l'on doit souvent adapter la puissance des générateurs au débit du torrent. L'objectif était donc de rendre le turbinage automatique, dans la mesure du possible avec le temps et les moyens financiers à disposition (2000 CHF au début, pendant le projet j'ai pu profiter d'une partie du budget d'un autre étudiant). Il était aussi souhaité d'avoir un monitoring local et à distance de la production d'énergie.

## 2 Les petites centrales hydroélectriques

### 2.1 Définitions

Voir les sources [1], [2], et [3]

On peut classer les centrales hydroélectriques selon leur taille (puissance). Cette classification n'est pas la même en Suisse qu'au niveau international (voir figure 1).

Suisse		International	
Désignation	Puissance	Désignation	Puissance
pico-pico	< 5 kW	pico	< 5 kW
pico	< 49 kW	micro	5 - 100 kW
micro	50 – 299 kW	mini	100 kW – 1 MW
petite	300 – 10'000 kW	small	1 – 10 MW
moyenne	10 - 30 MW	medium	10 – 50 MW

Figure 1: Classification des centrales hydroélectriques selon leur taille [1], [2]

En Suisse les centrales sont désignées comme micro lorsque celles-ci ont une puissance inférieure à 300 kW.

Selon la loi sur la protection des eaux on distingue les deux catégories suivantes en considérant le débit résiduel (le débit restant après le prélèvement d'eau pour le turbinage) :

- Les centrales au fil de l'eau
  - La restitution se situe après une dérivation de moins de 50 mètres.
  - Un débit résiduel n'est pas requis.
- Les centrales de dérivation
  - La dérivation de l'eau est supérieure à 50 mètres.
  - Un débit résiduel est requis.

Les petites centrales ont à peu près le même principe de fonctionnement que les grandes centrales. Ce qui les différencie, c'est surtout le fait que les premières ont une conception ainsi qu'une exploitation plus simple.

Elles peuvent utiliser comme source d'eau entres autres :

- Un fleuve / une rivière
- Une source
- Un réseau d'eau potable
- Un réseau d'évacuation d'eaux usées ou de drainages

Toutes les centrales hydroélectriques ont, indépendamment de leur taille, une production d'énergie qui dépend du débit d'eau et de la hauteur de chute disponible. Cette dernière doit avoir au minimum deux mètres pour être exploitable.

## 2.2 Turbines hydrauliques

Dans une turbine hydraulique, l'énergie hydraulique de l'eau est partiellement convertie en énergie mécanique à l'arbre de la machine.

### 2.2.1 Principaux types de turbines hydrauliques [7]

Parmi les turbines hydrauliques on distingue les turbines à action et les turbines à réaction :

- Turbines à action :  
L'énergie à disposition de l'aubage (surface qui permet de guider l'eau) est entièrement sous forme d'énergie cinétique.
- Turbines à réaction :  
L'énergie captée est sous forme d'énergie cinétique et sous forme de pression.

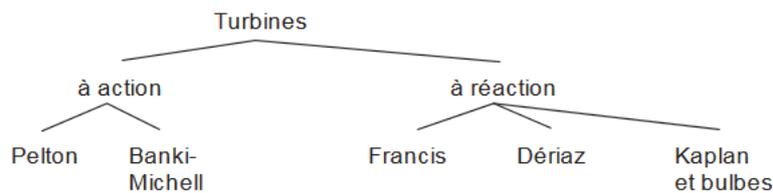


Figure 2: Classification des turbines [7]

Les turbines peuvent avoir un ou plusieurs étages (une ou plusieurs machines montées sur le même arbre) et avoir un à deux flux (le débit traverse la même machine ou est reparti entre deux machines en parallèle).

Chaque type de turbine est adapté à un certain débit combiné à une certaine hauteur de chute (voir figure 3).

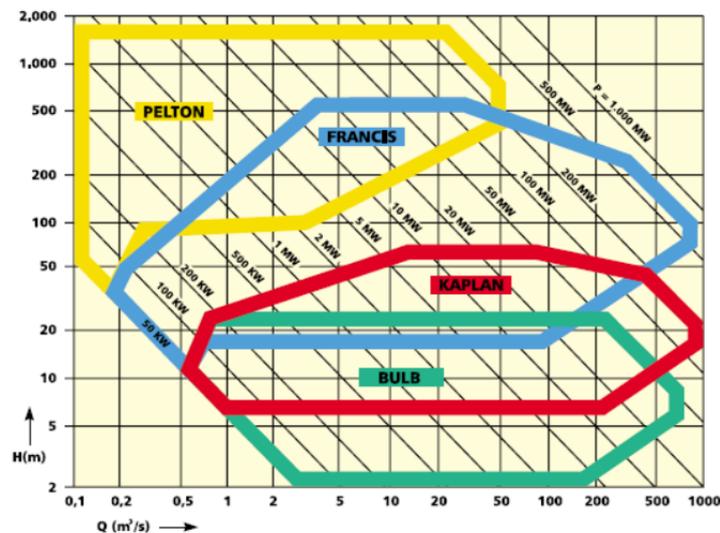


Figure 3: Domaines d'utilisation des turbines [7]

### 2.2.2 Caractéristiques principales [3], [7]

Débit (Q) :

- La quantité d'eau traversant la turbine par unité de temps.
- Unités :  $\frac{m^3}{s}$ ,  $\frac{m^3}{h}$ ,  $\frac{l}{s'}$ ,  $\frac{kg}{s}$

Pertes de charge ( $H_l$ ) :

- C'est la partie de l'énergie perdue dans l'installation par frottement de l'eau dans les grilles, les vannes, les coudes et les parois des conduites.
- Unité : m

Chute brute ( $H_b$ ) :

- La différence d'altitude entre le niveau à la prise d'eau et le niveau à l'aval de la centrale, où l'eau est restituée à la rivière.
- Unité : m

Chute nette (H) :

- La chute brute moins les pertes de charge.
- Représente l'énergie hydraulique à disposition de la turbine.
- Unité : m

Puissance hydraulique ( $P_{hyd}$ ) :

- La puissance fournie à la turbine par l'eau qui l'alimente.
- $P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H$
- Unité : W

$\rho$ : masse volumique de l'eau  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$   
 $g$ : accélération de pesanteur  $(= 9.81 \frac{m}{s^2})$

Couple (T) :

- L'ensemble de forces qui produisent un moment.
- Est créé par la force hydrodynamique sur les pales ou les augets de la roue et met la roue en rotation.
- Unité : Nm

Vitesse de rotation (n ou  $\omega$ ) :

- Unité : n  $[\frac{t}{min}]$ ,  $\omega [\frac{rad}{s}]$

Puissance mécanique ( $P_{mec}$ ) :

- Puissance obtenue à l'arbre de la turbine.
- $P_{mec} = \omega \cdot T$
- Unité : W

Rendement ( $\eta$ ) :

- Le rapport entre la puissance mécanique et la puissance hydraulique.
- $\eta = P_{mec}/P_{hyd}$
- Unité : - ou %

### 2.2.3 Turbine Pelton [4]

La turbine Pelton est une turbine à action. Elle est constituée d'une roue munie d'aubes (appelées augets) qui est mise en rotation par l'eau envoyé par un ou plusieurs injecteurs (jusqu'à 6). Dans la majorité des cas, elle comporte aussi un déflecteur. Tous ses éléments sont placés dans une bêche qui protège la roue et évacue l'eau.

#### **Augets**

La force du jet sur l'auget met la roue en rotation. Les augets sont profilés de façon à maximiser le rendement. Ils permettent à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue.

#### **Injecteur**

L'injecteur est construit pour produire un jet d'eau aussi homogène que possible avec un minimum de dispersion. Il possède à l'intérieur un pointeau mobile qui est déplacé par un servomoteur. Ce pointeau permet de régler le débit.

#### **Déflecteur**

Son rôle est de dévier le jet d'eau en cas d'incident grave sur la turbine ou sur le générateur et d'éviter ainsi les coups de bélier dans la conduite ou l'emballement de la turbine. Il est souvent manœuvré par un ressort ou un contrepoids.

Ce type de turbine est adapté à des hautes chutes (voir p.9 figure 3).

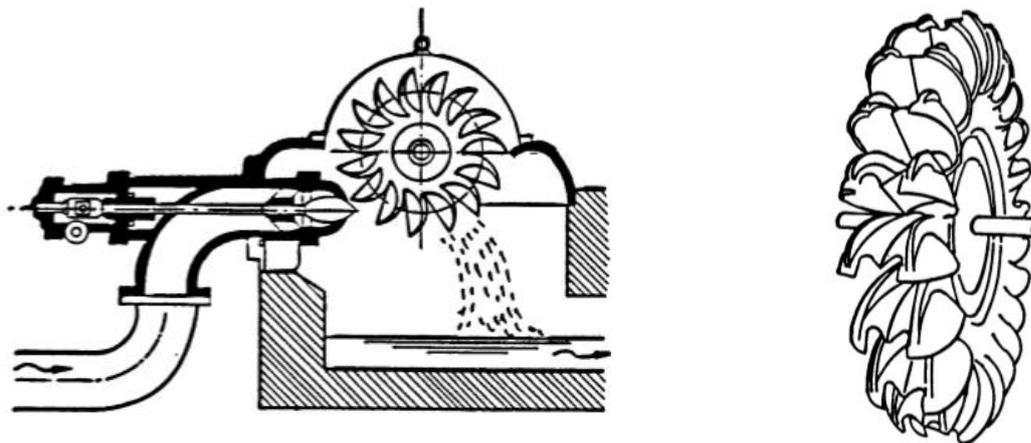


Figure 4: Coupe longitudinale et roue d'une turbine Pelton [4]

## 2.3 Machines électriques [5]

Les machines électriques sont nommées d'après leur mode de fonctionnement :

- « Générateur » pour une machine qui convertit de l'énergie mécanique en énergie électrique
- « Moteur » pour une machine qui convertit de l'énergie électrique en énergie mécanique

Toutes les machines électriques peuvent fonctionner aussi bien en génératrice qu'en moteur.

Les machines électriques tournantes se composent d'une partie mobile (rotor) et d'une partie fixe (stator).

Parmi les machines électriques tournantes à courant alternatif on distingue :

- Les machines synchrones
- Les machines asynchrones

Ci-dessous est décrit le dernier type, celui-ci étant le type utilisé dans les turbogroupes (turbines reliées à des générateurs) de la centrale de Beudon :

### Machine asynchrone

Elle est nommée ainsi parce que sa vitesse en charge et la fréquence du réseau auquel elle est reliée ne sont pas dans un rapport constant.

On retrouve aussi l'appellation « machine à induction » parce que le champ tournant du stator induit des courants alternatifs dans le circuit rotorique.

Le stator se compose de trois groupes de conducteurs logés dans des encoches et associés de façon à former trois enroulements identiques, chacun correspondant à une phase. Ils sont décalés d'un angle électrique de  $120^\circ$  les uns par rapport aux autres. Etant parcourus par trois courants (système triphasé) ils créent un champ tournant exciteur. Ce champ à répartition sinusoïdale, comportant  $2p$  pôles ( $p$ =paire), a une vitesse angulaire  $\Omega_s$  (rad/s) qui est liée à la pulsation électrique  $\omega$  des courants d'alimentation et au nombre  $p$  de paires de pôles déterminé par le bobinage du stator.

Le rotor comporte un bobinage en court-circuit qui n'est branché sur aucune source extérieure de tension (sauf utilisation particulière avec rotor bobiné). Ils existent quatre types dont deux sont décrits ci-dessous :

- Rotor à cage d'écureuil
  - Ce rotor se compose de tôles ferromagnétiques et de barres de cuivre ou d'aluminium. Celles-ci sont placées dans des encoches et sont reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit de même matière.
- Rotor bobiné ou à bague
  - Celui-ci est constitué de trois bobines de fil isolé placées dans des encoches, chacune étant reliée à une bague. Elles sont reliées, comme le bobinage statorique, de façon à réaliser un enroulement triphasé dont les trois phases sont court-circuitées entre-elles.

Le champ exciteur qui tourne à une vitesse angulaire  $\Omega_s$  dans l'entrefer de la machine induit des tensions dans les conducteurs rotoriques. Ces derniers étant en court-circuit, ils sont parcourus par des courants induits (courants de Foucault) qui créent à leur tour un champ tournant induit. L'interaction de ces deux champs (d'après la loi de Lenz le champ induit essaie d'annuler le champ exciteur) génère un couple qui est responsable de la rotation du rotor. Celui-ci doit donc s'auto-exciter.

Le glissement  $s$ , un nombre adimensionnel généralement exprimé en %, se calcule comme suit :

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

$\Omega$  étant la vitesse angulaire à laquelle tourne le rotor.

Il détermine si la machine est en régime moteur ou en régime génératrice :

- $s < 0$      $\Omega > \Omega_s$  :            Génératrice :  
Le rotor tourne plus rapidement que le champ tournant. Il faut fournir un couple à l'arbre par une machine d'entraînement (turbine).
- $s > 0$      $\Omega < \Omega_s$  :            Moteur :  
Le rotor tourne plus lentement que le champ tournant. Il fournit un couple.

Si  $s=0$  ( $\Omega = \Omega_s$ ) le rotor tourne au synchronisme. Il n'y a pas d'actions électromagnétiques et donc pas de couple.

La puissance active absorbée par un moteur ou fournie par une génératrice est :

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

Une machine asynchrone consomme toujours de la puissance réactive du fait que l'enroulement statorique est toujours l'enroulement exciteur.

Le rendement est plus faible en génératrice qu'en moteur.

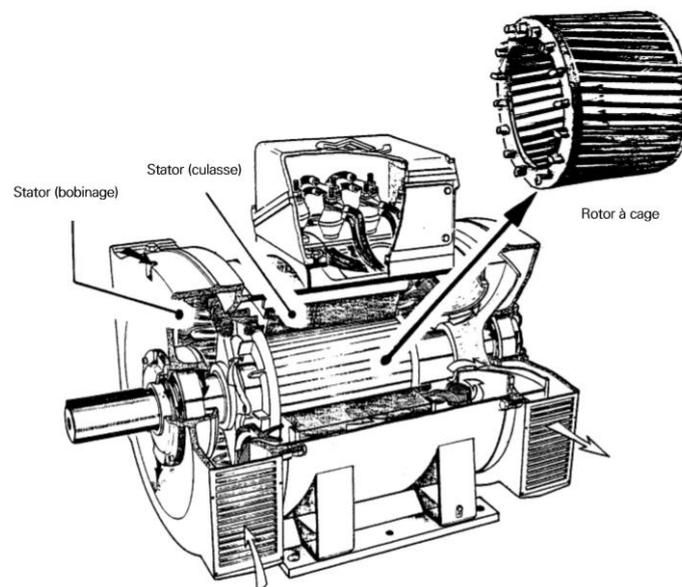


Figure 5: Machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil [5]

## 2.4 Régulation

### 2.4.1 Les différents modes de régulation des turbines [6]

La régulation des turbines a comme but de maintenir leur vitesse de rotation constante. Elle dépend du mode opératoire de l'installation : en îlot ou en parallèle sur le réseau de distribution. Ceci peut être réalisé par l'un des trois différents régulateurs suivants :

- Régulateur de niveau (en parallèle avec le réseau)
- Régulateur électronique à charge ballast (en îlot)
- Régulateur vitesse-débit (en îlot)

Puisqu'il s'agit dans ce projet d'une installation connectée au réseau, seulement la régulation de niveau est traitée dans les chapitres suivants.

### 2.4.2 Les différents points de mesure du niveau d'eau [6]

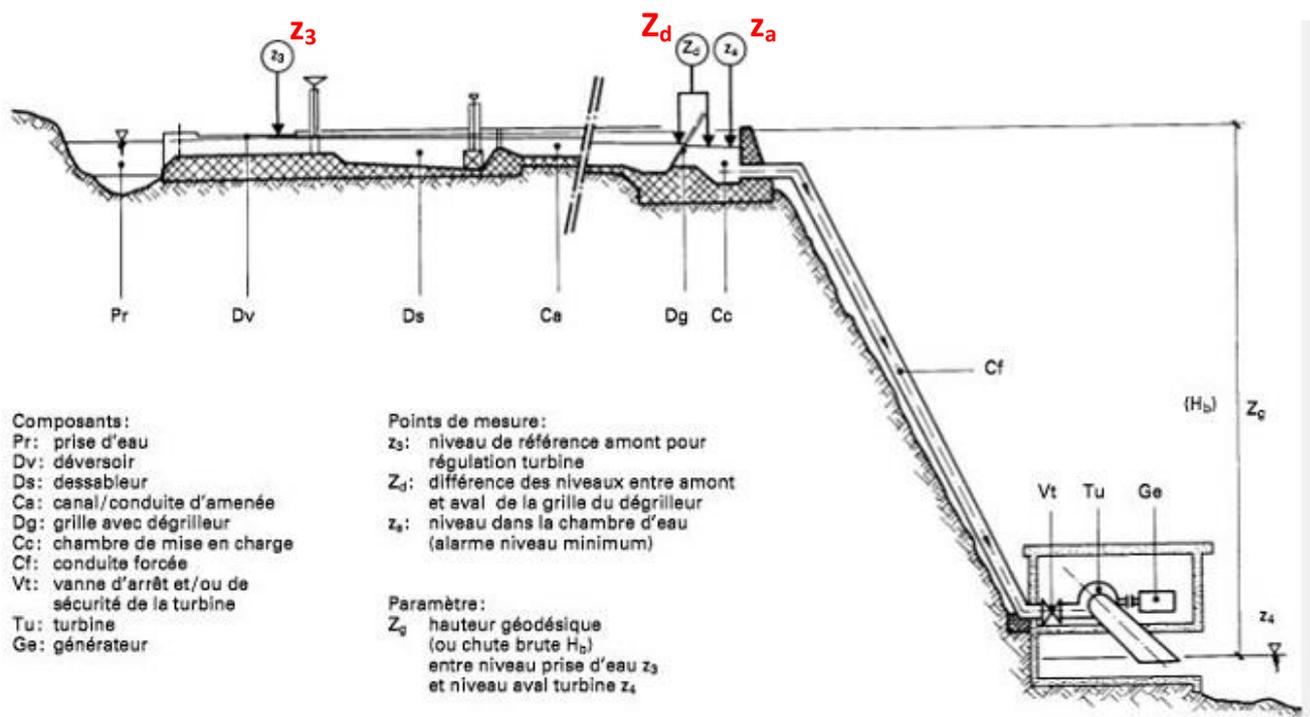


Figure 6: Points de mesure nécessaires à la régulation et à la surveillance [6]

- **Niveau de référence amont de l'aménagement ( $z_3$ )**
  - Se situe à proximité du déversoir de trop-plein de la prise d'eau, à l'entrée du dessableur ou dans la chambre de mise en charge après la grille selon le type d'amenée d'eau.
  - Est le plus souvent maintenu constant par la régulation automatique de l'ouverture de la turbine.

- **Niveau différentiel à la grille du dégrilleur ( $Z_d$ )**
  - Est utilisé en cas de fonctionnement automatique du dégrilleur.
  - Lorsqu'il atteint une certaine valeur (à cause des débris), les sondes donnent un signal qui commande la mise en marche du dégrilleur.
  
- **Niveau dans la chambre d'eau ( $z_a$ )**
  - Si celui-ci s'abaisse trop, la turbine est automatiquement mise hors service, avec coupure de l'alimentation en eau par fermeture du distributeur et / ou de la vanne de sécurité.

### 2.4.3 Les paramètres de réglage de la turbine [6]

#### Le débit $Q$ et la puissance $P$ :

- L'ouverture de l'injecteur est réglée en fonction de l'eau à disposition pour maintenir le niveau de référence  $z_3$ .
  - Si le niveau d'eau est trop bas, l'injecteur est fermé pour diminuer le débit turbiné et la puissance.
  - Si le niveau d'eau est trop haut, l'injecteur est ouvert pour augmenter le débit turbiné et la puissance.
- Le débit de la turbine ne doit pas dépasser le débit capté à la prise d'eau car si non le niveau dans la conduite baisse et la turbine s'arrête par la détection de pression minimale.

#### La vitesse de rotation $\omega$ ou $n$ :

- Les machines entraînées par une turbine sont conçues pour fonctionner à vitesse constante.
- Si la centrale fonctionne en parallèle sur le réseau de distribution électrique, c'est ce dernier qui fixe la fréquence du courant produit par le générateur et donc la vitesse de rotation de la turbine.

Une turbine doit alors disposer d'un régulateur niveau d'eau/débit qui maintient le niveau en amont constant.

### 2.4.4 Les différentes étapes de fonctionnement [4], [5], [6]

Celles-ci s'appliquent aux turbines Pelton avec des générateurs asynchrones connectés au réseau.

#### ***Démarrage du groupe turbogénérateur***

Opérations :

1. Dégagement du déflecteur
2. Fermeture de la vanne bypass (permet la déviation de l'eau)
3. Ouverture lente du pointeau jusqu'à atteindre approximativement la vitesse synchrone
4. Enclenchement du disjoncteur (ou du contacteur) permettant d'interconnecter la génératrice asynchrone et le réseau.
5. Enclenchement de la batterie de condensateurs (en cas de compensation du facteur de puissance)

6. Augmentation du débit d'eau dans la turbine pour l'augmentation de la charge active fournie au réseau

### **Fonctionnement normal**

Dès que le groupe turbogénérateur est en parallèle sur le réseau, la régulation de niveau entre en action.

Les régulateurs qui ajustent le débit de la turbine travaillent généralement par impulsions plus ou moins rapprochées selon le degré de correction désiré.

### **Arrêt normal**

Opérations :

1. Fermeture du pointeau
2. Engagemment du déflecteur
3. Ouverture du disjoncteur du générateur

### **Arrêt d'urgence**

La fermeture d'urgence est actionnée par une source d'énergie indépendante du réseau électrique (batterie, contrepoids, ressort, accumulateur d'huile, etc.).

Opérations :

- Engagemment du déflecteur
- Fermeture du pointeau

#### 2.4.5 Appareils pour la mesure de niveau [8]

- Flotteur avec un ou plusieurs interrupteurs
  - Méthode de mesure robuste mais dépassée
- Flotteur avec potentiomètre pour la conversion du niveau en un signal de tension
  - Méthode de mesure robuste mais dépassée
- Sonde de pression électronique
  - Avec un signal de sortie analogique
  - Bon rapport performance/prix avec une résolution de mesure de < 1 mm
  - Est mécaniquement sensible et doit être nettoyé régulièrement
  - A une certaine sensibilité envers les surtensions dues à la foudre qui est inévitable

- Sonde ultrasonique
  - Avec un signal de sortie analogique
  - Est installé en dehors de l'eau
  - Grande précision de mesure
  - Plus chère que la sonde de pression électronique
  - Incertitudes de mesure possibles lors de brouillard

#### 2.4.6 Types de régulateurs [8]

Les régulateurs à 2 ou à 3 points utilisent généralement des interrupteurs à flotteurs.

##### Régulateur à 2 points

- Utilise deux points de commutation : niveau trop haut (H) et niveau trop bas (T)
- Donne, lors du signal « T », l'ordre de fermeture jusqu'au signal « H » auquel il donne l'ordre d'ouverture et ainsi de suite (voir figure 7)
- Provoque la fermeture et l'ouverture sans interruption de l'injecteur de la turbine
- Est inadapté pour le réglage d'une turbine parce qu'il provoque l'usure du servomoteur

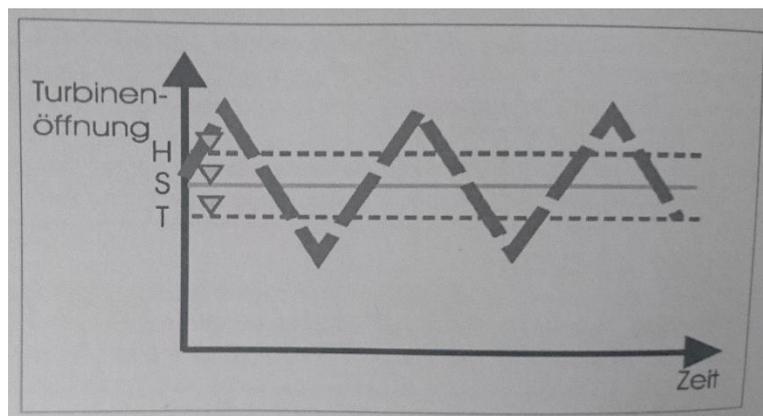


Figure 7: Régulateur à 2 points [8]

##### Régulateur à 3 points

- Utilise trois points de commutation (niveau trop haut, niveau trop bas, niveau en ordre)
- Ne régule pas dans le domaine (hystérésis de commutation) du troisième point de commutation
- Est plus adapté que le régulateur à 2 points parce qu'il ménage le servomoteur (avec le niveau en ordre le débit reste constant)

## Régulateur PID

Un régulateur PID est la combinaison de trois régulateurs qui possèdent des différents comportements de régulation :

- Régulateur P
  - Calcule l'écart entre la valeur de consigne et la valeur réelle comme valeur de référence pour la grandeur de commande nécessaire.
- Régulateur I
  - Possède une composante intégrante qui corrige l'écart entre la valeur de consigne et la valeur réelle.
- Régulateur D
  - Pour la régulation de niveau sa valeur est normalement fixé à 0 (il est seulement utile pour les processus de régulation rapides comme la régulation de vitesse de la turbine lors de l'exploitation en îlotage).

Dans l'image ci-dessous (voir figure 8) on peut voir deux différentes courbes de régulation d'un régulateur PI :

- Ligne continue (réglage faiblement atténué) :  
Avec une valeur de P grande et une valeur de I relativement petite on atteint relativement vite l'ouverture de l'injecteur souhaitée.
- Ligne en pointillé (réglage fortement atténué) :  
Au contraire, avec une valeur de P beaucoup plus petite et une valeur de I plus grande cela prend plus de temps pour atteindre la consigne.

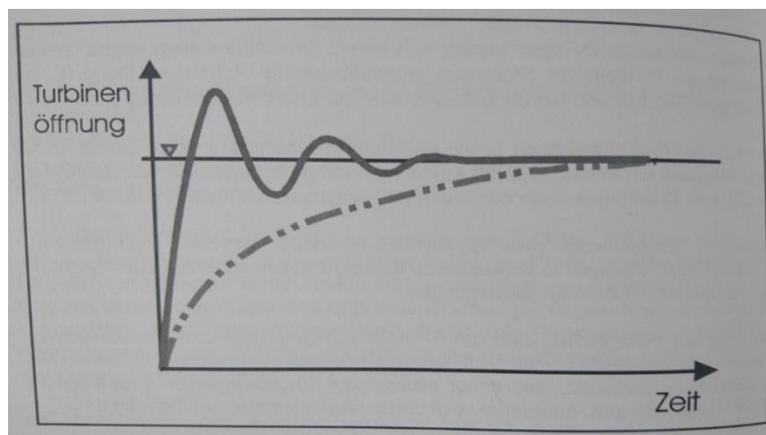


Figure 8: Régulateur PI [8]

### 3 Site hydroélectrique de Beudon

#### 3.1 Description du site

Les visites du site ainsi que divers documents qui m'ont été fournis par M. Pavanello et mon collègue Sebastien Zajackowski m'ont permis d'établir une description de la microcentrale. Ci-dessous sont listés tous ces documents :

- Le dossier de demande de concession établi par M. Granges (l'ancien propriétaire de la centrale de Beudon) [9]
- Un rapport de visite de la microcentrale de Beudon rédigé par Mhylab (une fondation qui développe des turbines adaptées aux petites centrales hydrauliques) [10]
- Un rapport d'un projet sur le même sujet réalisé par quatre étudiants de ma classe [11]
- Le manuel d'utilisation et la documentation technique de la microcentrale de Beudon [12]

Dans cette description se retrouvent uniquement les informations tirés de la documentation qui se sont avérés corrects pour la situation actuelle.

Ci-dessous est un plan de la situation des principaux aménagements de la microcentrale (voir figure 9). Je l'ai modifié pour y ajouter la quatrième turbine et la restitution.

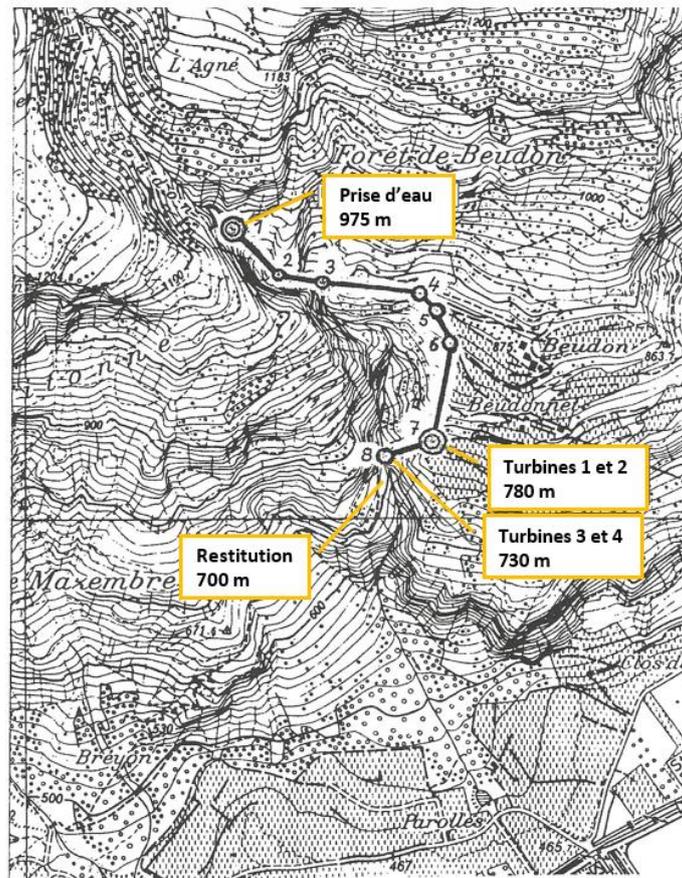


Figure 9: Plan de la microcentrale avec les altitudes [10]

Le schéma hydraulique ci-dessous montre la dénivellation des différents aménagements :

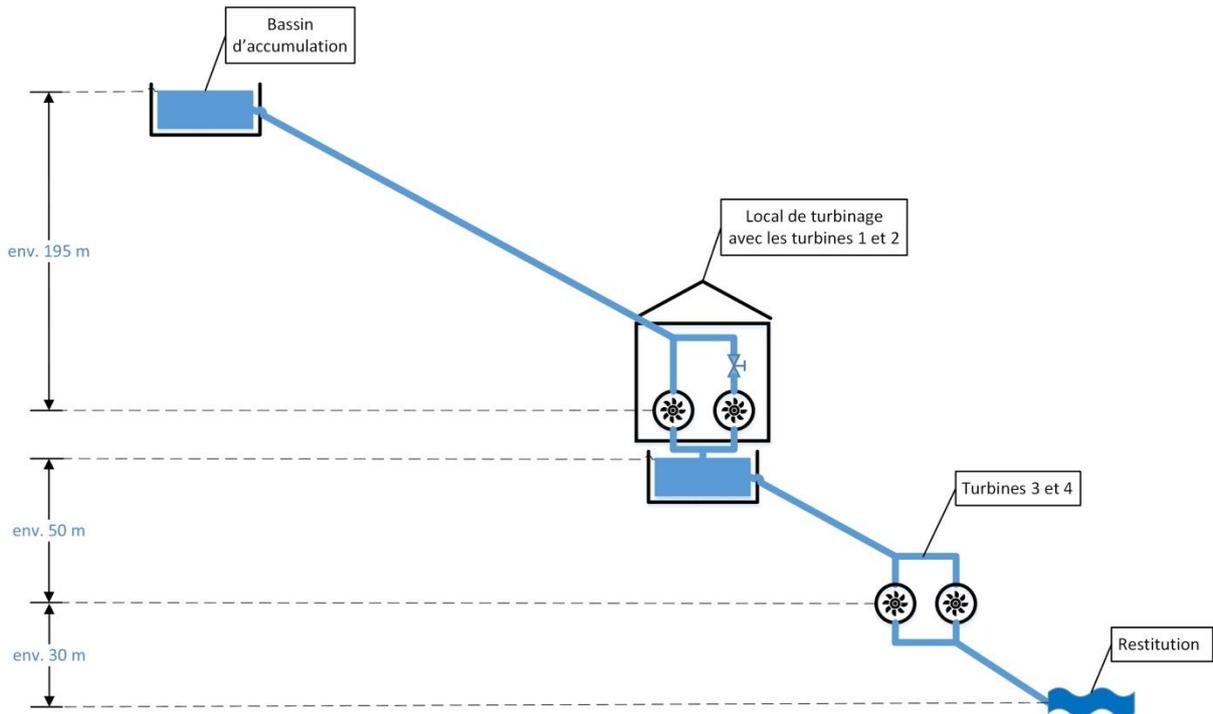


Figure 10: Schéma hydraulique de la microcentrale

Grâce à une courbe des débits classés tracée avec les mesures de débit du torrent prises en 1993 (voir figure 11) les valeurs suivantes ont pu être déterminées :

- Débit Q347 : 10 l/s
- Débit résiduel : 3.5 l/s
- Débit d'équipement théorique : 86.5 l/s

Débit Q347 : débit atteint ou dépassé 347 jours par an  
 Débit résiduel : 35% du débit Q347  
 Débit d'équipement théorique : débit atteint ou dépassé entre 60 et 100 jours par an

Le graphe dans la figure 11 montre non seulement les débits mensuels du torrent mais aussi les débits turbinés par la turbine 1 en 1993.

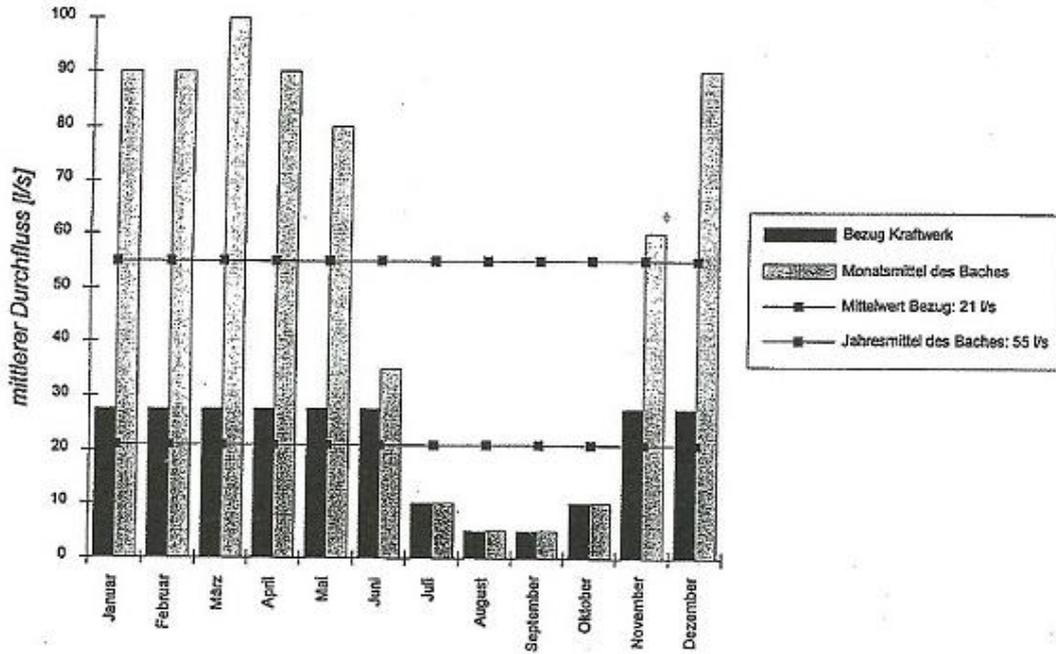


Figure 11: Débits mensuels du torrent de Beudon (gris) et turbinés par la turbine 1 (noir) en 1993

Les quatre turbogroupes sont tous des turbines Pelton reliées à des générateurs asynchrones. Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques techniques de chaque turbogroupe (voir figure 12). Le turbogroupe 4 est actuellement hors service.

	Turbogroupes			
	1	2	3	4
Altitude du local de turbinage [m]		780		730
Chute brute [m]		195		50
Débit théorique nominal Qn [l/s]	28	10	?	28
Vitesse de rotation [t/min]	1525	3050 (mot: 2915)	1525 (mot: 1440)	1525 (mot: 1450)
P hydraulique brute nominale de la turbine [kW]	54	19	?	14
P électrique installée [kW]	30	11	7.5	4
Rendement à Qn (perte de charge inclus) [%]	56	58	?	36

Figure 12: Caractéristiques techniques des turbogroupes [10]

D'après les relevés de la production électrique effectués par M. Granges entre 1999 et 2015 la centrale produit en moyenne 130'000 kWh/an.

## 3.2 Etat initial

Les chapitres suivants décrivent la situation trouvée lors des visites sur site en juin 2017.

### 3.2.1 Fonctionnement de la centrale

Le torrent de Beudon a un débit fortement variable. Pour cette raison, il est nécessaire d'adapter la puissance des turbines au débit disponible au moment. Ceci est réalisé en contrôlant le niveau d'eau dans le bassin de captage. Si le niveau baisse, la puissance des générateurs doit être réduite. S'il est constant, les générateurs travaillent à une puissance constante. S'il monte, la puissance peut être augmentée. La puissance des turbines et des générateurs est réglée par le biais des servomoteurs qui ajustent l'ouverture des injecteurs des turbines.

Le servomoteur de la turbine 1 a été réglé dans le passé par différents systèmes :

- un système de régulation à deux points avec un interrupteur à flotteur
- un régulateur électronique avec une mesure analogique

Ces systèmes se sont endommagés au fil des années, et comme conséquence il a fallu exploiter la turbine 1 manuellement. A chaque changement du débit, un opérateur doit ajuster la puissance de la turbine. Si ces réglages ne sont pas réalisés correctement et à temps, la turbine peut s'arrêter par manque d'eau ou on n'utilise pas toute l'énergie hydraulique disponible.

Les turbines 2, 3 et 4 (plus petites en puissance) ont toujours été opérées manuellement.

### 3.2.2 Description de l'état des installations

L'état général de la plupart des composants de la centrale, spécialement les installations électriques se trouvent dans un état déplorable.

Ci-dessous sont listés les installations et les éléments de la microcentrale :

- Une prise d'eau



Figure 13: Prise d'eau avec conduites

- Deux dessableurs



Figure 14: Dessableurs entre la prise d'eau et le bassin d'accumulation

- Un bassin de captage avec :
  - Deux dégrilleurs
    - Nettoyés par des buses en rotation.



Figure 15: Dégrilleurs dans le bassin

- Un tube de vidange
  - Manoeuvré par un moteur de vanne désaffecté, il sert à la fois de bouchon et de déversoir.



Figure 16: Tube de vidange



Figure 17: Moteur de vanne

- Un interrupteur à flotteur
  - Signale l'état du niveau d'eau dans le bassin (haut ou bas)
  - Etant défectueux il a dû être réparé (voir chapitre 4.4).



Figure 18: Interrupteur à flotteur

- Deux capteurs de pression/niveau
  - Les deux sont hors service.



Figure 19: Anciens capteurs de pression

Vue d'ensemble du bassin :

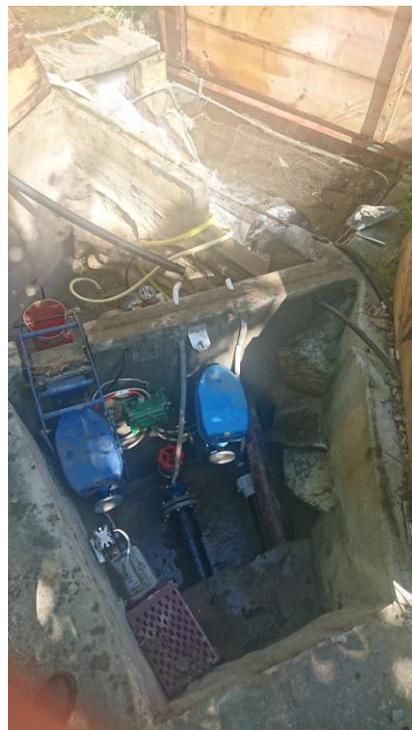


Figure 20: Bassin d'accumulation

- Un couvert à coté du bassin avec :
  - Un tableau de commande
    - Il est utilisé pour ouvrir ou fermer le trou avec le tube de vidange ainsi que la vanne motorisée d'une des deux conduites qui est actuellement en mode manuel.
    - Il contient aussi les interrupteurs pour le chauffage et la lumière.



Figure 21: Tableau de commande dans le couvert à coté du bassin

- Un boîtier (à gauche) avec un bornier du câble de liaison entre le bassin et le local de turbinage
  - Celui-ci envoi entre autres, les signaux de l'interrupteur à flotteur.
  - Sur le chemin vers les turbines ainsi que dans le local de turbinage on retrouve les deux autres borniers auxquels il est relié (au milieu et à droite).

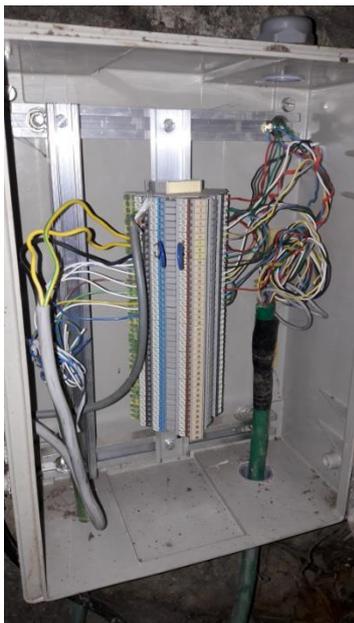


Figure 22: Les borniers entre le bassin et le local de turbinage

- Un affichage de niveau et un capteur de pression (hors service)



Figure 23: Affichage de niveau



Figure 24: Capteur de pression

- Un système de conduites
  - L'eau du torrent de Beudon est utilisée pour l'irrigation des vignes, pour l'eau potable et pour la réserve-incendie du domaine de Beudon.



Figure 25: Conduites au-dessus de la gorge du torrent



Figure 26: Conduites dans la terre

- Le turbogroupe 1 (30 kW) :



Figure 27: Turbogroupe 1



Figure 28: Armoire électrique de la turbine 1



Figure 29: Tableau de commande de la turbine 1

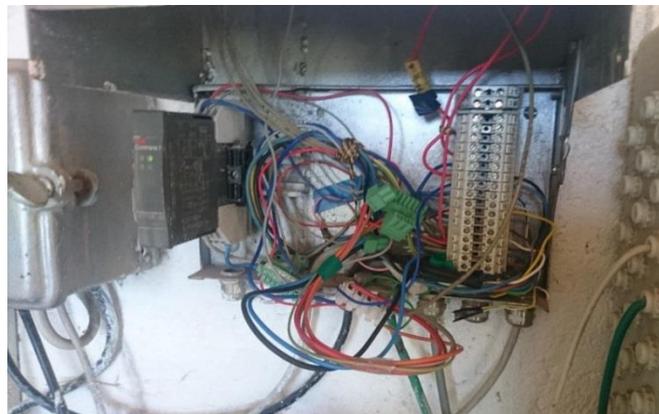


Figure 30: L'ancienne régulation de niveau de la turbine 1

- Le turbogroupe 2 (11 kW) :



Figure 31: Turbogroupe 2



Figure 32: Tableau de commande de la turbine 2

- Le turbogroupe 3 (7.5 kW) :



Figure 33: Turbogroupe 3



Figure 34: Tableau de commande de la turbine 3

- Le turbogroupe 4 (4 kW) :



Figure 35: Turbogroupe 4 (4 kW)



Figure 36: Tableau de commande de la turbine 4

- Un bassin d'accumulation pour les turbines 3 et 4 avec :
  - Une mesure du niveau par flotteur (hors service) et un capteur de pression.



Figure 37: Mesure de niveau par flotteur



Figure 38: Capteur de pression

- Une commande à distance (hors service)



Figure 39: Commande à distance dans le „Eselstall“

- Un compteur de l'énergie (kWh et kVArh) injectée dans le réseau

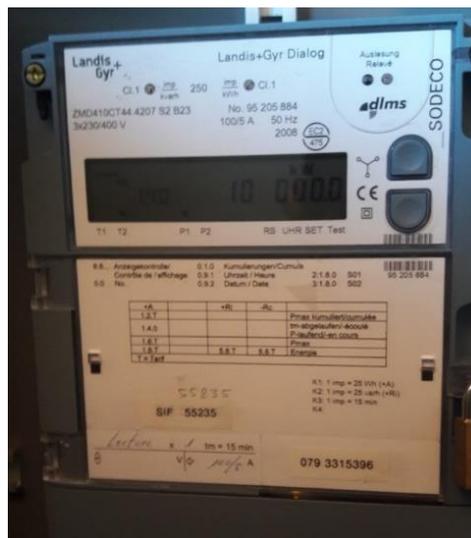


Figure 40: Compteur de l'énergie dans le local des pressoirs

### 3.2.3 Tests de fonctionnement et vérifications

Lors des visites, le fonctionnement de plusieurs composants de la centrale a été testé et vérifié pour pouvoir faire un état des lieux et déterminer les modifications nécessaires à effectuer.

#### 3.2.3.1 L'interrupteur à flotteur

Celui-ci a été analysé en premier. Sur son couvercle est indiquée la marque Mobrey. Des recherches effectuées par la suite sur internet ont permis de découvrir qu'il s'agit d'un interrupteur à flotteur à deux aimants. Il possède deux micro-interrupteurs, un pour le niveau haut et un pour le niveau bas. Un contrôle avec le multimètre a montré que le deuxième était enclenché tout le temps, même avec le bassin plein. Ceci était également visible sur le tableau de commande avec les boutons pour ouvrir et pour fermer l'injecteur, ceux-ci indiquant aussi l'état des micro-interrupteurs (voir figure 43). La raison pour cela a été vite trouvée en inspectant l'intérieur de la boîte qui contient les micro-interrupteurs (voir figure 42). De l'eau s'y est introduite malgré une protection en silicone et a détérioré l'état général de l'interrupteur.



Figure 41: Interrupteur à flotteur



Figure 42: Intérieur du boîtier du flotteur



Figure 43: Tableau de commande indiquant le niveau haut et bas

Cet interrupteur à flotteur a été réparé en remplaçant entre autres ses micro-interrupteurs par des neufs (voir chapitre 4.4).

Les analyses suivantes ont été effectuées sur les composants de la turbine 1. Elles ont été faites entre autres à l'aide du schéma électrique de la commande de la turbine (voir annexes 1 et 2).

### 3.2.3.2 La régulation automatique du niveau (turbine 1)

Celle-ci a été testée en utilisant le schéma du seul système de régulation automatique qui est encore dans un état acceptable (voir figure 44). Ce système est branché mais désactivé.

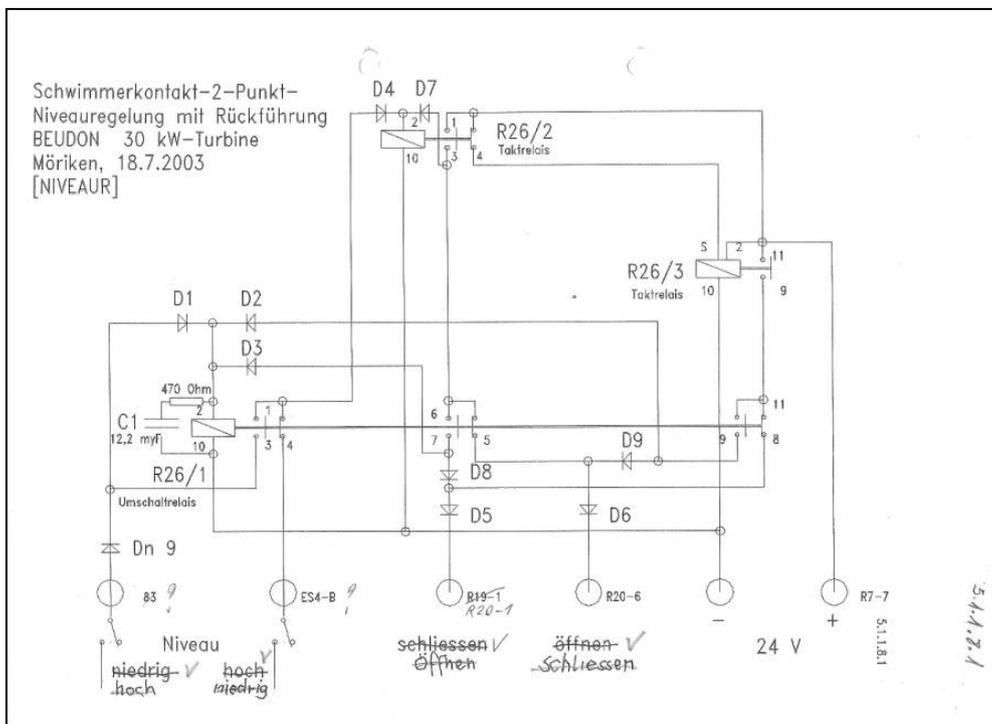


Figure 44: Schéma du régulateur à 2 points [12]

Ce circuit donne en sortie les signaux pour ouvrir (öffnen) ou pour fermer (schliessen) l'injecteur selon les signaux donnés en entrée par le flotteur qui indiquent un niveau haut (hoch) ou un niveau bas (niedrig). C'est une régulation à 2 points.

Il est uniquement alimenté (avec 24 V) en mode automatique par le contact R7-7.

Remarque : Les indications cochées sur le schéma sont celles qui sont correctes.

Il contient les éléments suivants :

- R26-1 : relais inverseur
  - choisit entre « ouvrir » ou « fermer » selon le niveau
- R26-2 : générateur d'impulsions
  - donne le signal pour ouvrir ou pour fermer l'injecteur en forme d'impulsions (les durées d'impulsion et de pause sont réglables)
- R26-3 : relais à une impulsion
  - donne une impulsion d'une durée ajustable
  - assure une durée minimale des impulsions de sortie

L'interrupteur à flotteur ne fonctionnant plus, il a fallu simuler ses signaux (niveau haut et niveau bas) pour pouvoir contrôler le fonctionnement du circuit. Ceci a pu être réalisé en utilisant les interrupteurs intégrés sur les bornes (sans oublier l'alimentation avec 24V), les deux niveaux étant activés. Lorsque ceux-ci étaient désactivés il a fallu connecter deux interrupteur les bornes 83 et 85 ainsi que sur 84 et 85.

Il a pu être constaté que R26-2 génère correctement les impulsions mais que les sorties du circuit ne fonctionnent pas. Celles-ci oscillent entre « fermer » et « ouvrir » avec n'importe lequel des deux niveaux activé.

En ôtant le relais à une impulsion R26-3 le circuit fonctionne :

- R18 ferme l'injecteur par impulsion lorsque le niveau est bas.
- R19 ouvre l'injecteur par impulsion lorsque le niveau est haut.

### 3.2.3.3 Le démarrage automatique du générateur (turbine 1)

Les éléments suivants (voir figure 45) qui ont été testés sont nécessaires dans cet ordre pour le démarrage automatique du générateur. Ils ont été contrôlés à l'aide du schéma développé (voir annexe 2).

- R27 : générateur d'impulsions
  - Accélère la turbine en ouvrant l'injecteur par paliers.
  - Il est réglé comme suit :
    - impulsions : 2.5 s
    - pauses : 1.5 s
- GR3 : capteur de valeur limite
  - Ferme son contact lorsqu'on atteint 1400 t/min et enclenche le générateur (synchronisation avec le réseau).
    - Ce seuil est trop bas parce que le générateur démarre en mode moteur.
- R26/1-3 : régulateur automatique de niveau
  - Continue à ouvrir l'injecteur pour augmenter la puissance du générateur.
  - Ne fonctionne pas actuellement parce que l'interrupteur à flotteur est défectueux.
- R10 : relais temporisé
  - Arrête le générateur si celui-ci n'atteint pas la puissance minimale de 1 kW dans le temps réglé après son enclenchement (cette valeur est réglée à 7 secondes).

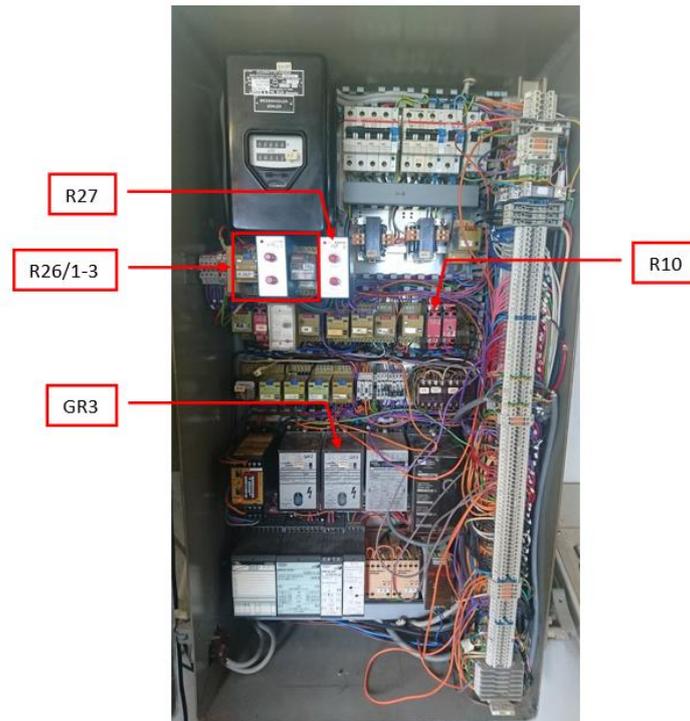


Figure 45: Eléments du démarrage et de la régulation de niveau automatique de la turbine 1

### 3.2.3.4 Entraînement de l'aiguille de l'injecteur (turbine 1)

La vanne manuelle de la turbine a été fermée lors de ces contrôles. Ceci a permis de remarquer que celle-ci n'est pas étanche.



Figure 46: Servomoteur de l'injecteur de la turbine 1

L'entraînement de l'aiguille est effectué par un servomoteur (voir figure 46). Les problèmes suivants ont été constatés :

- La plaque signalétique est totalement illisible et les données techniques dans la documentation manquent.
- Quand on commence à ouvrir l'injecteur depuis la position fermée, il faut attendre trois secondes pour observer un mouvement de l'aiguille.
  - Ceci signifie qu'il bloque mécaniquement, il doit être révisé ou remplacé.

Pour permettre l'identification de l'entraînement les mesures suivantes ont été prises :

- Ecartement des piliers : 100 mm
- Longueur des piliers : 185 mm
- Diamètre du trou dans la traverse : 40 mm
- Course : 55 mm
- Vitesse de réglage : 15 mm/min

#### 3.2.3.5 *Autres tests et vérifications*

- La compensation de la puissance apparente est enclenchée (il y a 410 V sur les condensateurs).
  - Le cosphi est à 0.89.
- Le bouton « contrôle des lampes » situé sur le tableau de commande de la turbine 1 ferme l'injecteur lorsqu'on appuie dessus (court-circuit possible).
- R12 (protection contre la mise à terre) n'existe plus (sécurité manquante).
- R22 (survitesse) arrête la turbine (enclenche le déflecteur) à 1650 t/min.

### 3.3 Variantes d'amélioration envisagées

Les petites centrales hydroélectriques sont sensés fonctionner automatiquement sans personnel permanent, avec un minimum de surveillance et d'entretien [3]. Ceci est aussi le vœu de la propriétaire du site. Pour approcher a cet état, trois variantes ont été envisagées (voir figure 47).

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Description</b>	Réparation du flotteur	Mesure de niveau analogique	Mesure de niveau analogique
	Réparation du régulateur de niveau	Régulateur électronique	Automate
<b>Avantages</b>	Coût bas	Coût moyen	Flexibilité pour améliorations futures
	Réalisable rapidement	Réglage de niveau précis	Remplacement de plusieurs composants obsolètes
			Réglage de niveau précis
<b>Inconvénients</b>	Les autres composants obsolètes restent en service (peu de fiabilité)	Les autres composants obsolètes restent en service (peu de fiabilité)	Possibilité d'inclure la gestion des autres turbines
<b>Remarque</b>	Le servomoteur de l'injecteur doit être remplacé pour les trois variantes (mauvais état et beaucoup de jeu).		

Figure 47: Variantes d'automatisation

La variante 3 a été finalement retenue. Le servomoteur étant encore utilisable et n'ayant pas à disposition un budget suffisant, il a été décidé de ne pas le remplacer.

Cette variante sera décrite plus en détail dans le chapitre suivant (voir chapitre 4.).

## 4 Travaux exécutés

Ces travaux ont débuté avec la correction des schémas électriques. Les éléments qui ont du être modifiés ou remplacés ont été déterminés. Puis des demandes d'offres ont été envoyées pour certains éléments dont quelques uns ont été commandés. La réparation et l'installation des éléments a été faite en plusieurs fois sur place (avec l'aide de mon père et de mon frère). Et pour finir une programmation, qui doit encore être optimisée, a été réalisée.

### 4.1 Analyse et actualisation des schémas électriques

Les analyses sur place ont démontré que la plupart des schémas électriques ne correspondent pas à la réalité. Durant les derniers vingt ans des nombreuses modifications ont été réalisés dont beaucoup n'ont pas été correctement indiquées dans les schémas. En plus, certains schémas existent en plusieurs variantes. Ca a demandé beaucoup de travail de suivre les fils, de corriger les schémas et de comprendre le sens des modifications.

#### 4.1.1 Plan de câblage et schéma développé (turbine 1)

Dans la documentation se retrouvent deux plans de câblage (Schaltschema), l'un de 1998 et l'autre de 2003 (voir annexe 1), ainsi qu'un schéma développé (Stromlaufschema) divisé en deux parties. La partie 24 V est de 1999 et la partie 230 V de 2007. Je les ai assemblées sur une page A3 pour avoir une meilleure vue d'ensemble et j'ai ajouté des coordonnées pour trouver plus facilement les contacts des relais (voir annexe 2). Le plan de câblage de 2003 est celui qui se rapproche le plus de la réalité, mais il est très complexe et difficile à comprendre. Le schéma développé est plus facile à interpréter mais il a de nombreuses erreurs et ils lui manquent des mises à jour. J'ai corrigé ces erreurs au fur et à mesure de l'avancement du travail et ajouté des modifications avec l'installation de l'automate (voir annexe 3 – les modifications trouvés sur place sont en rouge et la commande de l'injecteur par l'automate en bleu).

#### 4.1.2 Schéma de la mesure du niveau

Selon un entretien téléphonique avec Monsieur Schwarz, qui est aujourd'hui à la retraite, un des problèmes de l'installation est l'exposition aux surtensions pendant les orages. Spécialement la mesure de niveau analogique au captage d'eau a été détruite plusieurs fois. A l'époque on avait essayé de protéger le système avec des circuits de protection « fait maison », sans beaucoup de succès.

Ci-dessous (voir figure 48), on voit l'ancien schéma de raccordement de la mesure du niveau d'eau avec les éléments de protection contre les surtensions (en jaune). On retrouve :

- Des résistances
- Des diodes Zener
- Des éclateurs à gaz
- Un séparateur galvanique

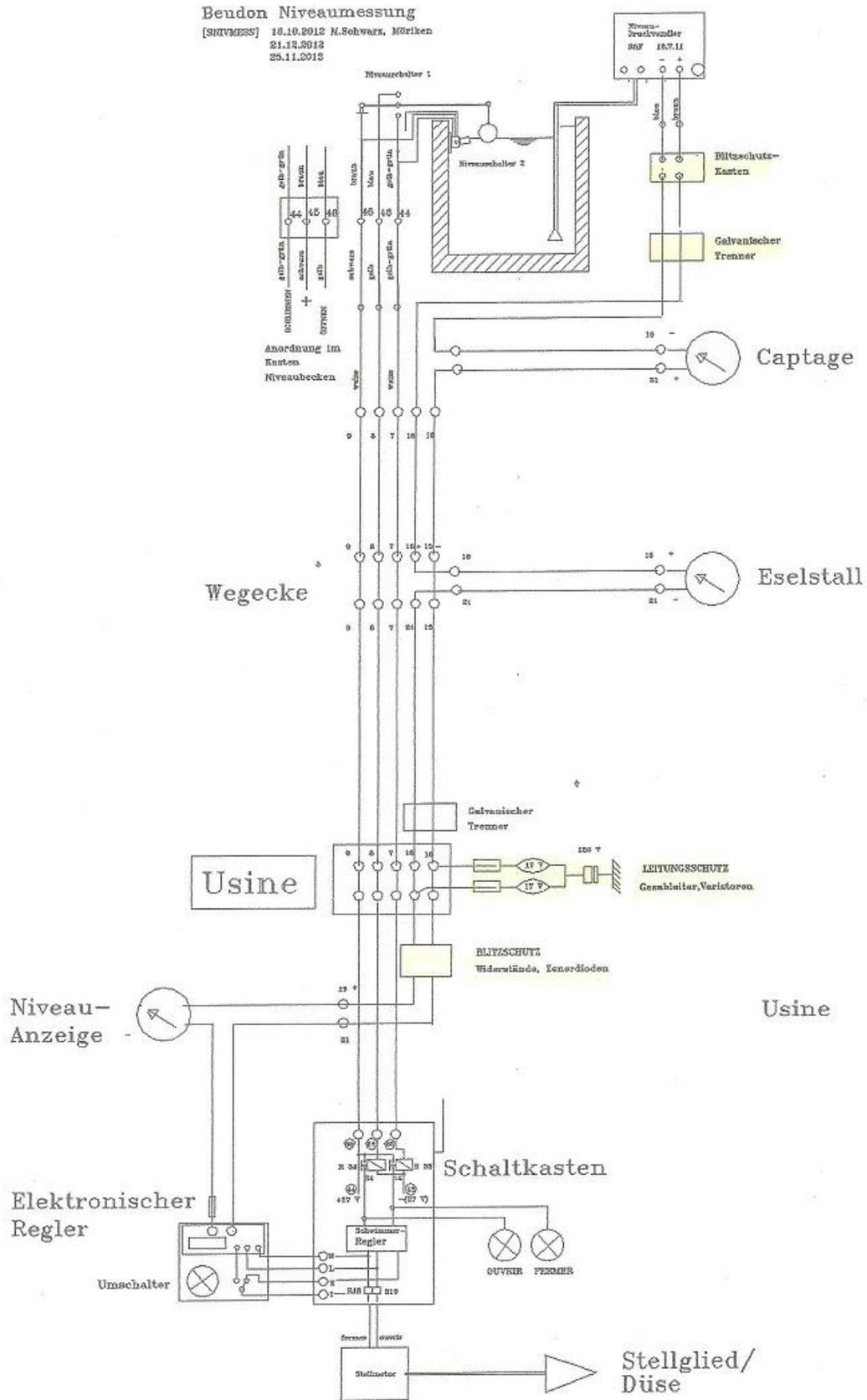


Figure 48: Ancien schéma de la mesure du niveau [12]

En modifiant ce schéma j'ai créé le schéma dans la figure 49. Ces modifications sont les suivantes :

- Remplacement de l'ancienne sonde de pression défectueuse (Schoppe&Fäser) par une nouvelle sonde de pression (WIKA) (voir chapitre 4.3.1)
- Remplacement des anciens parafoudres (faits maison) de la sonde par deux nouveaux parafoudres (PHOENIX) (voir chapitre 4.3.3)
- Connexion à un nouvel automate (Siemens S7) (voir chapitre 4.3.2)
- Indication du parafoudre existant de l'interrupteur à flotteur
- Elimination des indicateurs de niveau non-utilisés (nouvelle indication dans le HMI de l'automate)

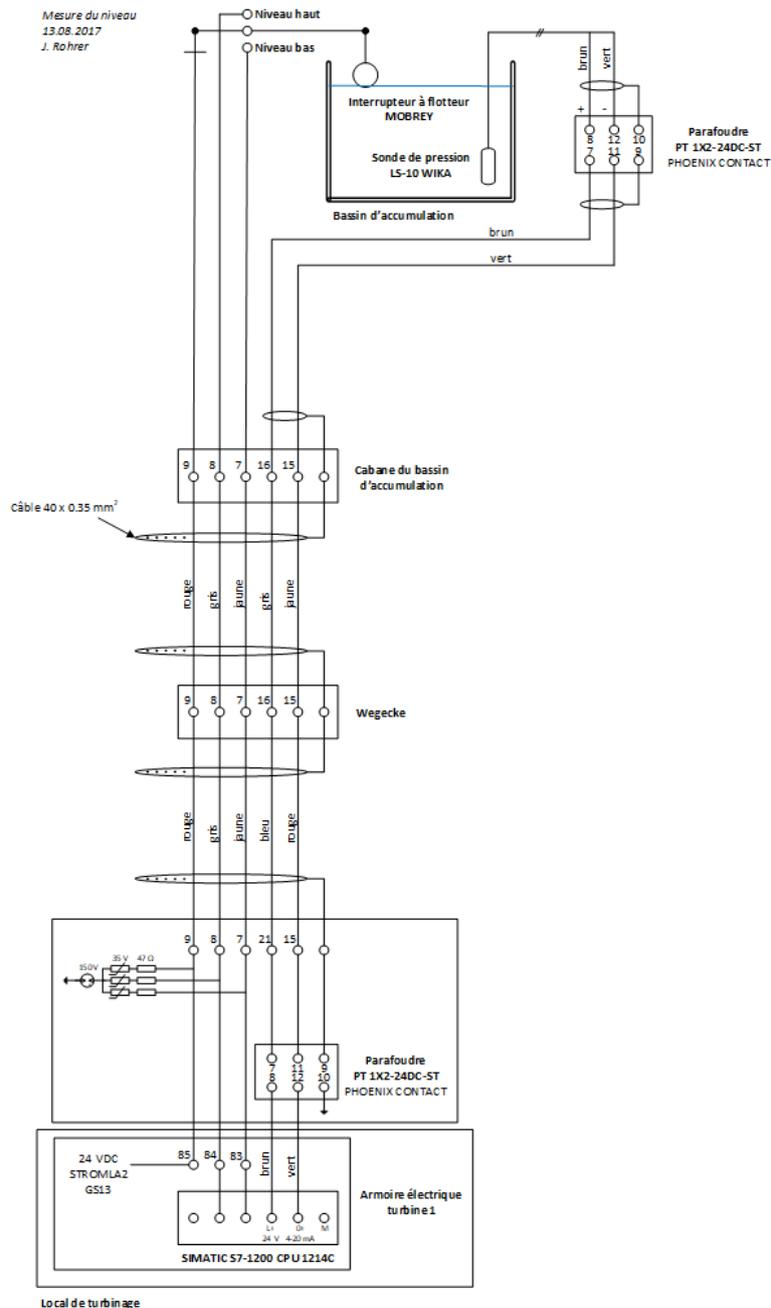


Figure 49: Nouveau schéma de la mesure du niveau

#### 4.1.3 Schéma de l'entraînement du pointeau de l'injecteur (turbine 1)

Les contrôles du raccordement et des interrupteurs de fin de course du servomoteur à l'aide du plan de câblage, du schéma développé (voir annexe 1 et 2) ainsi que du schéma ci-dessous (voir figure 50), ont démontré que ce dernier ne correspondait également pas à la réalité.

Remarques sur le schéma de la figure 50 :

- Les bornes carrés se retrouvent sur l'entraînement.
- Les bornes rondes sont dans le tableau de commande de la turbine 1.
- Les interrupteurs de fin de course n'ont pas le même nom sur ces schémas.

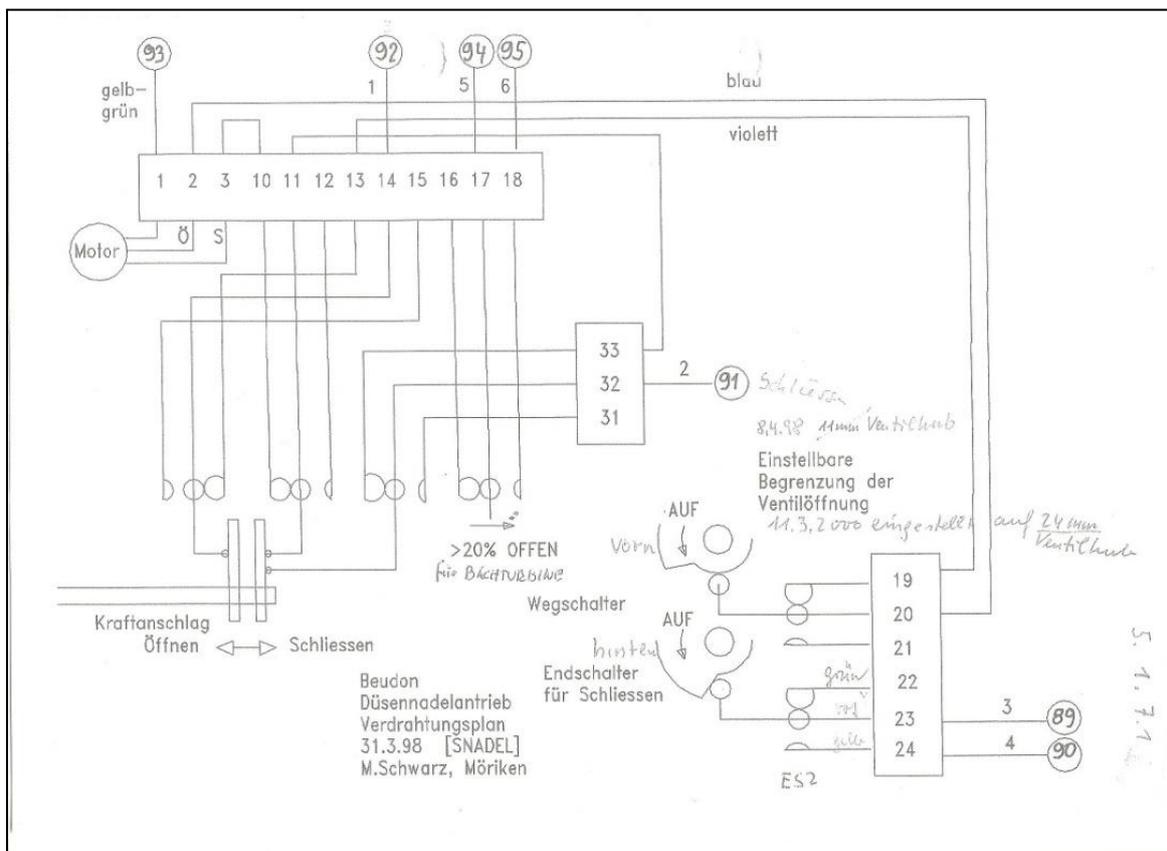


Figure 50: Ancien schéma de l'entraînement du pointeau de la turbine 1 [12]

Il y a différentes connexions qui ont été modifiées et des ponts qui ont été rajoutés. La figure 51 montre le schéma adapté au câblage retrouvé sur place.

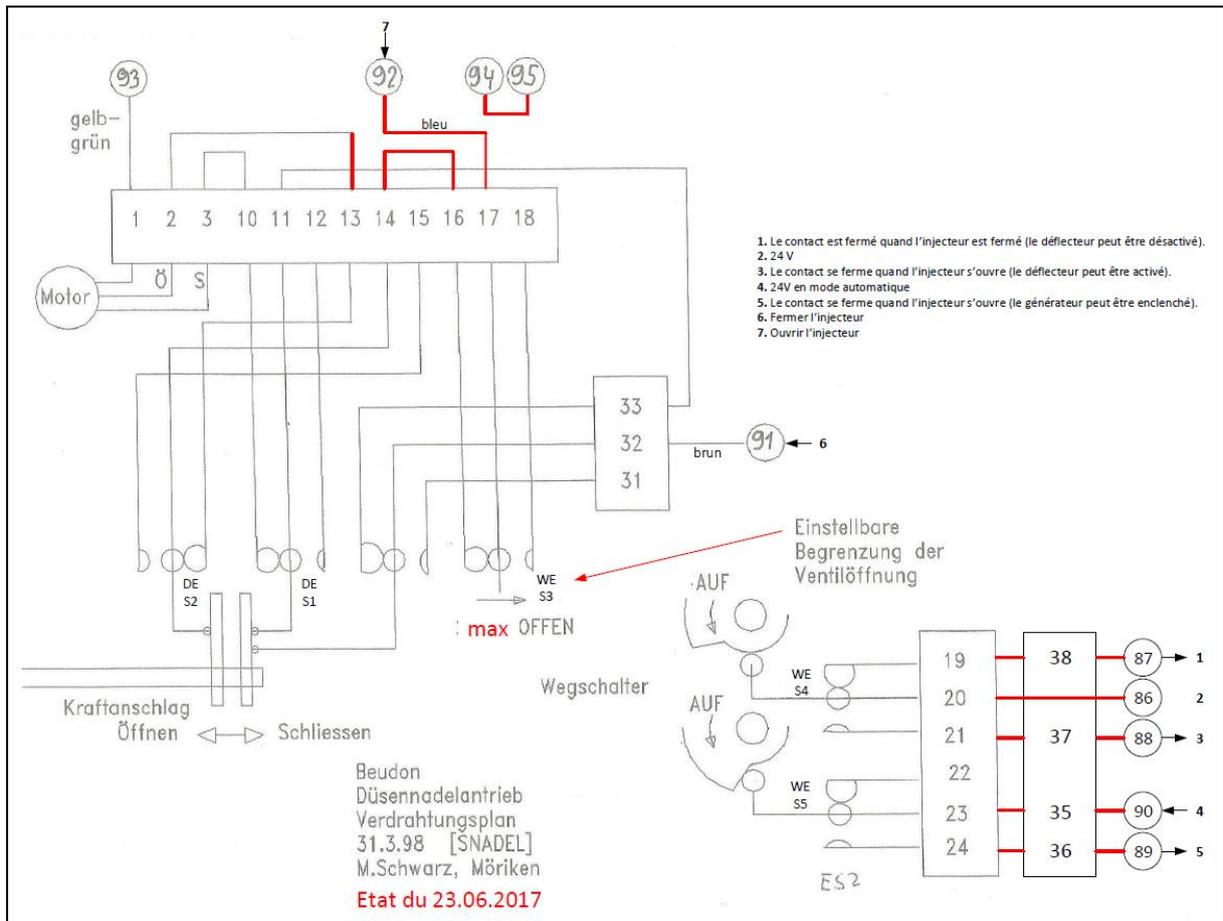


Figure 51: Modifications des connexions du servomoteur trouvées sur place [12]

Avec ces corrections (en rouge), le schéma démontre les changements suivants :

- La fin de course WES4 ne limite plus l'ouverture de l'injecteur (et ainsi la puissance du générateur) parce que il a été utilisé pour permettre la commande du déflecteur.
  - A la place c'est le WES3 qui est utilisé pour limiter l'ouverture.
- Les bornes 94 et 95 ont été pontées (permission pour enclencher la turbine 3).

Remarque : L'interrupteur de fin de course WES5 est tout le temps fermé (bornes 23 et 24) (permission pour enclencher le générateur) à cause d'un mauvais réglage de la came.

#### 4.1.4 Schéma de connexion du nouvel automate

Le nouvel automate a dû être connecté dans le tableau de commande. Pour cela j'ai créé un schéma qui montre les liaisons entre les bornes de l'automate et les bornes dans le tableau de commande, sur le servomoteur ainsi que sur le parafoudre de la mesure de niveau (voir figure 52).

bleu : tableau de commande (voir schémas STROMLA1 et STROMLA2)  
vert : parafoudre PHOENIX  
orange : servomoteur  
violet: tableau de commande (voir schéma SMESKR)

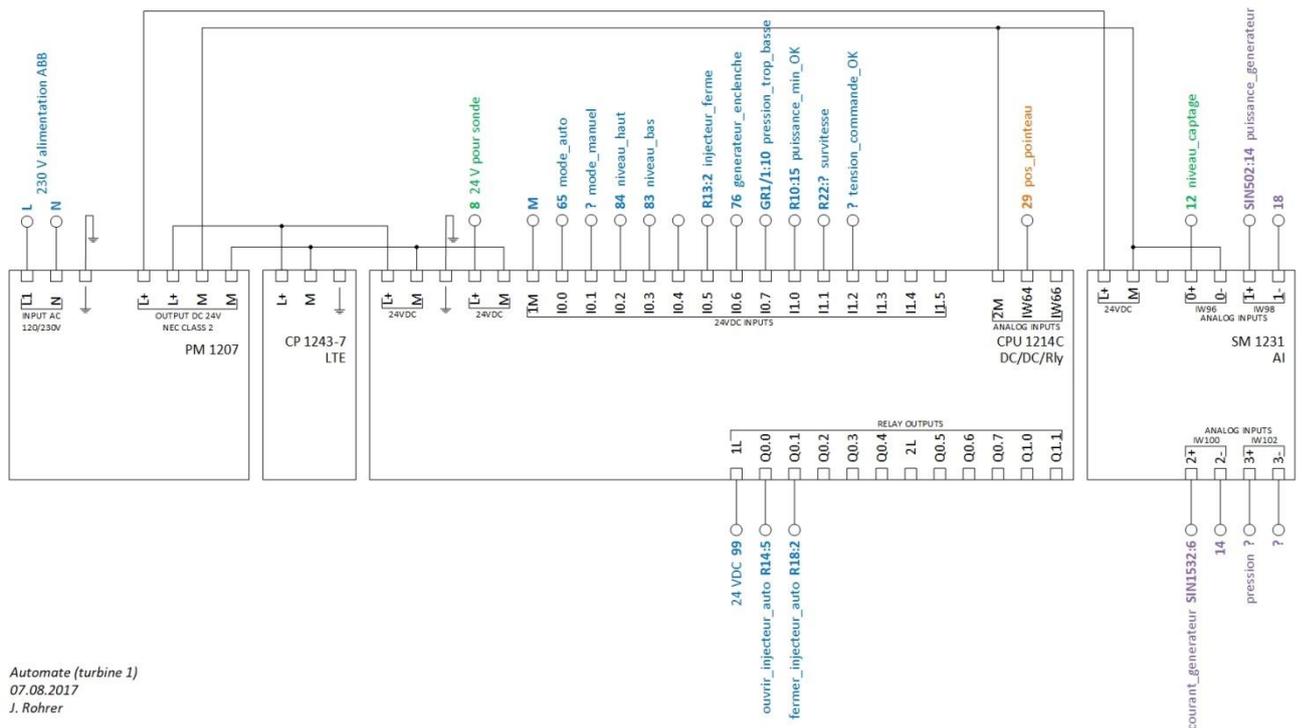


Figure 52: Schéma de connexion de l'automate

Dans ce schéma on peut voir les éléments qui font partie de l'automate :

- une alimentation (PM 1207)
- un module de communication (CP 1243-7 LTE)
- un processeur (CPU 1214C)
- un module d'entrées analogiques (SM 1231)

Ainsi que ses entrées (I) et ses sorties (Q) avec les numéros des bornes correspondants :

Remarque : Les explications des variables logiques s'appliquent quand elles sont à l'état 1.

Sur le processeur (I : entrées logiques, IW : entrées analogiques (0 - 10 V)) :

- I0.0 : mode\_auto
  - Met le fonctionnement de la turbine 1 en mode automatique.
  - Est enclenché à l'aide du sélecteur sur le tableau de commande.
- I0.1 : mode\_manuel
  - Met le fonctionnement de la turbine 1 en mode manuel.
  - Est enclenché à l'aide du sélecteur sur le tableau de commande.
- I0.2 : niveau\_haut
  - Signal émis par l'interrupteur à flotteur quand le niveau d'eau dans le bassin d'accumulation est haut.
- I0.3 : niveau\_bas
  - Signal émis par l'interrupteur à flotteur quand le niveau d'eau dans le bassin d'accumulation est bas.
- I0.4 : injecteur\_ouvert
  - Signalé quand l'injecteur est ouvert.
- I0.5 : injecteur\_ferme
  - Signal émis par l'interrupteur de fin de course WES4 quand l'injecteur est fermé.
- I0.6 : generateur\_enclenche
  - Signal émis par le contacteur S1 qui indique qu'il a connecté le générateur au réseau.
- I0.7 : pression\_trop\_basse
  - Signal émis par le capteur de valeur limite GR1 qui indique que la pression est au-dessous de 11 bar (pression minimale).
- I1.0 : puissance\_min\_OK
  - Signal émis par le capteur de valeur limite GR2 qui indique que la puissance est au-dessus de 0.5 kW.
- I1.1 : survitesse
  - Signal émis par le relais R22 qui indique qu'il y a une survitesse du générateur (au-dessus de 1600 t/min).
- I1.2 : tension\_commande\_OK
  - Signal émis par le relais R2 qui indique que la tension de commande 220 V est présente.
- IW64 : pos\_pointeau
  - Signal émis par le potentiomètre sur le servomoteur qui indique la position du pointeau dans l'injecteur.
- Q0.0 : ouvrir\_injecteur\_auto
  - Ordre d'ouvrir l'injecteur donné par le démarrage automatique, le régulateur PID ou le régulateur à 3 points.
- Q0.1 : fermer\_injecteur\_auto
  - Ordre de fermer l'injecteur donné par le régulateur PID ou le régulateur à 3 points.

Sur le module d'entrées analogique (4-20 mA) :

- IW96 : niveau\_captage
  - Signal émis par la sonde de pression qui indique le niveau dans le bassin.
- IW98 : puissance\_generateur
  - Signal émis par le convertisseur SINEAX 502 qui indique la puissance du générateur.
- IW100 : courant\_generateur
  - Signal émis par le convertisseur SINEAX 1532 qui indique le courant du générateur.
- IW102 : pression
  - Signal émis par le convertisseur SINEAX 920-2 qui indique la pression dans la conduite.

Le schéma ci-dessous (voir figure 53) montre le circuit électrique des convertisseurs et appareils de mesure. Les entrées pour la mesure de puissance et de courant (IW98 et IW100) ont été rajoutées en série dans les boucles correspondantes (en rouge).

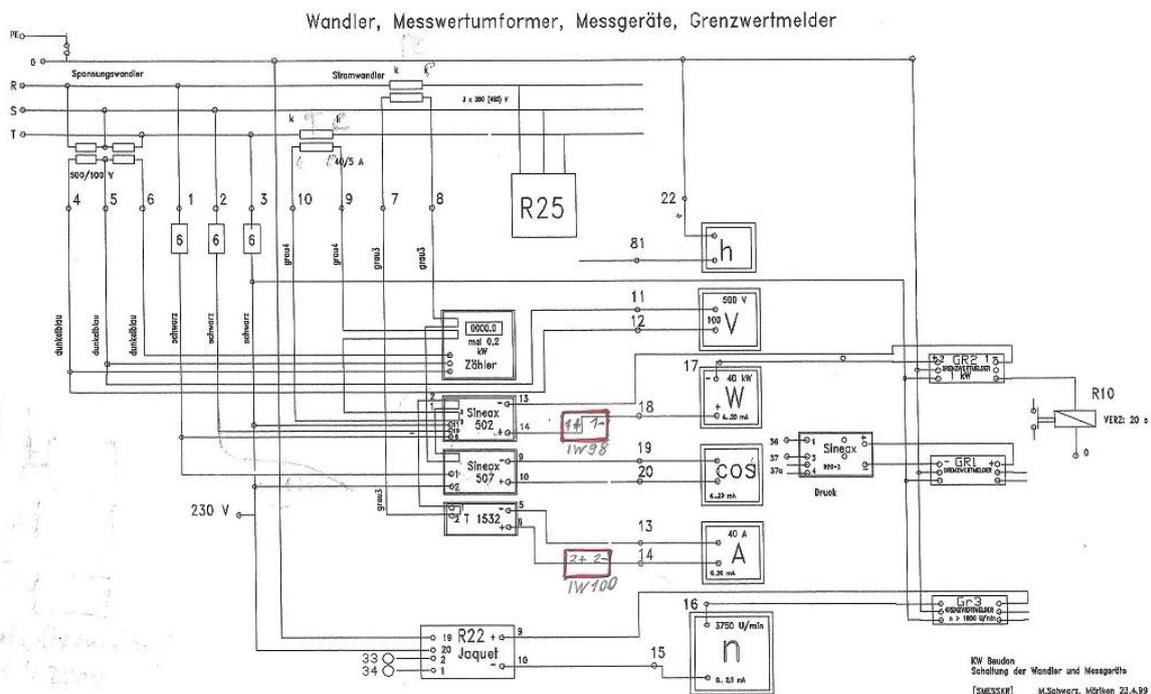


Figure 53: Schéma électrique des convertisseurs et appareils de mesure [12]

Les entrées suivantes n'ont pas encore été raccordées. Elles ne sont pas obligatoirement nécessaires pour les fonctions implémentées dans l'automate :

- mode\_manuel
- survitesse
- tension\_commande\_OK
- pression

## 4.2 Demandes d'offres

Un des critères du choix de la variante (voir chapitre 3.3) était le coût des éléments nécessaires pour la réaliser. C'est pour cela qu'au cours du travail j'ai fait des demandes d'offres chez différentes entreprises. Les offres que j'ai reçues par la suite se retrouvent dans les annexes (voir annexes 4-12).

Voici les entreprises contactées avec les demandes respectives :

- Un interrupteur à flotteur avec deux contacts (pour le niveau haut et le niveau bas dans le bassin) séparés de 100 mm.

MANOMETER (WIKA) :

**Détecteur de niveau à flotteur magnétique [13]** (voir offre dans l'annexe 4)

Version :	FLS-SE
Raccordement électrique :	Câble de raccordement PVC
Raccord process :	G 1/2"
Diamètre du tube guide :	18 mm
Flotteur :	Matériau : acier inox Diamètre : 80 mm
Contacts :	L1 NO, L2 NC Nombre : 2 Position : L1=150mm, L2=250mm

KOBOLD :

**Contrôleur de niveau magnétique [14]**

(voir offre dans l'annexe 5)

- M20 E R15 SCXX P 0
- M10 E R10 SCXX P 0

Avec L1=150mm et L2=250mm

Voir figure 54

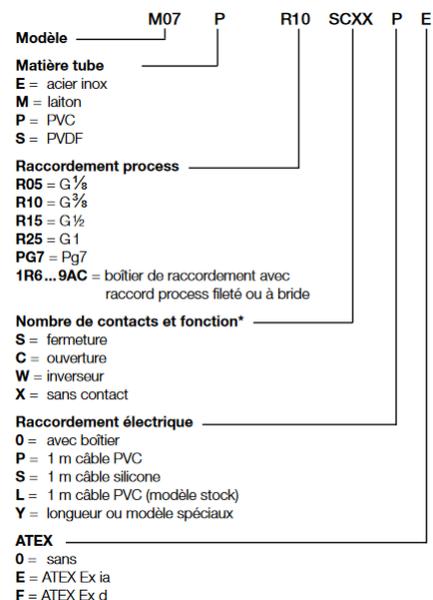


Figure 54: Code de commande

- Une sonde de pression pour mesurer le niveau d'eau dans le bassin de captage avec une plage de mesure de 0-0.1 bar (0-1 m).

MANOMETER AG (WIKA) :

**Transmetteur de pression immergeable** [15] (voir offre dans l'annexe 6)

Type: LH-10

Etendue de mesure: 0-1 mH<sub>2</sub>O

Signal de sortie: 4-20 mA

Longueur de câble: 20 m

Accessoires:

- Boîtier de raccordement
- Élément filtrant

Kobel :

**Transmetteur de pression immergeable** [16] (voir offre dans l'annexe 7)

Profondeur d'immersion: 1 m

- Un régulateur de niveau électronique avec une entrée analogique de 4-20 mA et des sorties digitales pour commander le servomoteur qui inclut la possibilité d'une régulation PID ou d'une régulation à 3 points.

JUMO :

**Régulateur compact** [17] (voir offre dans l'annexe 8)

JUMO cTRON 08

Type: 702072/8-1134-25-00

Kobel :

**Régulateur du niveau d'eau AWS 150** [18] (voir offre dans l'annexe 7)

- Deux parafoudres pour la protection contre les surtensions.

Kobel :

Parafoudre dans un boîtier [19] (voir offre dans l'annexe 7)

PHOENIX CONTACT :

[20] (voir offre dans l'annexe 9)

- Fiche de protection PT 1X2-24DC-ST
- Embase pour fiche de protection PT 1X2-BE

- Tous les composants de l'automate.

Siemens :

Appartenant à la gamme SIMATIC S7-1200 : (voir offre dans l'annexe 10)

- Un module d'alimentation (PM 1207)
- Un microprocesseur (CPU 1214C)
- Un module d'entrées analogiques (SM 1231)
- Un module de communication (CP 1243-7 LTE EU)
- Une antenne (IRC ANTENNA ANT 896-4ME)
- Un jeu de câbles de connexion
- Un écran tactile HMI (KTP400 BASIC)
- Un logiciel de programmation (SIMATIC STEP 7 Basic V14 SP1)

- Un servomoteur avec les données suivantes (mesurés sur le servomoteur de la centrale) :

von Rohr Armaturen AG / AUMA : (voir offres dans les annexes 11 et 12)

- |   |  |
|---|--|
| ▪ Distance entre les deux piliers:          | 100 mm                                 |
| ▪ Longueur des piliers:                     | 185 mm                                 |
| ▪ Diamètre de l'ouverture dans la traverse: | 40 mm                                  |
| ▪ Filetage dans le raccord femelle :        | M20                                    |
| ▪ Course:                                   | 55 mm (mais 30 mm seraient suffisants) |
| ▪ Vitesse de réglage:                       | 15 mm/min                              |
| ▪ Tension du moteur:                        | 230 V                                  |

A ces données j'ai ajouté une photo du servomoteur ainsi que le schéma avec les limiteurs de course et les potentiomètres.

### 4.3 Les nouveaux composants

Ceci sont les composants qui ont été finalement commandés et installés.

#### 4.3.1 La mesure de niveau analogique

Pour la mesure du niveau dans le bassin d'accumulation, j'ai choisi le transmetteur de pression immergeable LS-10000 de l'entreprise MANOMETER AG que j'ai commandé chez l'entreprise Kobel [21]. Celle-ci a une longue expérience dans le domaine des microcentrales hydroélectriques. Monsieur Habegger, un collaborateur de Kobel, m'a recommandé cette sonde parce que celle-ci a fait ses preuves dans les conditions difficiles qu'on trouve dans les bassins d'accumulation.

#### **Principe de fonctionnement** [21]

Ce transmetteur convertit la pression hydrostatique en un signal électrique. Il mesure la pression par la déformation d'une membrane située sur l'élément capteur. Le signal de sortie est amplifié et proportionnel à la pression mesurée.



Figure 55: Transmetteur de pression LS-10000 [21]

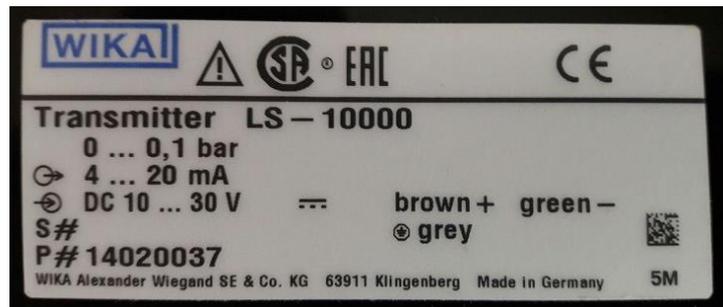


Figure 56: Plaque signalétique du transmetteur de pression

#### **Installation**

La sonde a été installée avec un tube de protection dans le bassin d'accumulation (voir figure 57). Elle a été raccordée avec le parafoudre (voir chapitre 4.1) selon le schéma de la figure 58.



Figure 57: Sonde de pression dans le tube de protection

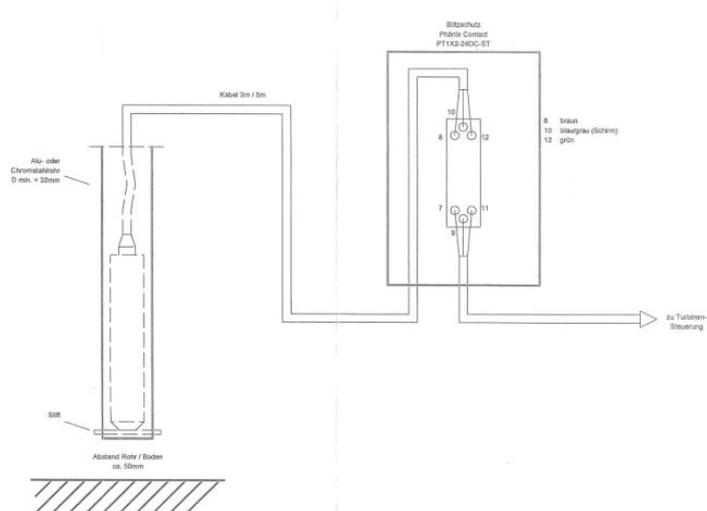


Figure 58: Schéma de raccordement de la sonde de pression [21]

#### 4.3.2 L'automate programmable (API)

L'automate choisi est un automate modulaire de la marque SIEMENS. Ce type d'automate permet une extension flexible avec des modules d'E/S, de fonction et de communication, raison pour laquelle il a été choisi [22]. Le modèle commandé a les caractéristiques suivantes :

Gamme : SIMATIC  
 Commande : S7-1200  
 CPU : 1214C

La CPU a été choisie en fonction du nombre d'entrées et de sorties nécessaire ainsi qu'en fonction de la mémoire de travail nécessaire pour permettre la possibilité d'ajouter des nouvelles fonctionnalités ou de gérer plusieurs turbines.

A cette CPU il a fallu ajouter :

- un module d'entrées analogiques
  - pour pouvoir capter le signal de 4-20 mA envoyé par la sonde de pression
- un HMI
  - pour visualiser l'état de l'installation et pour paramétrer la régulation
- un processeur de communication (avec une carte SIM) relié à une antenne
  - pour communiquer par SMS avec l'automate

### Installation

L'automate programmable a été installé et câblé (voir chapitre 4.1) dans l'armoire de commande de la turbine 1 à la place de l'ancien régulateur à 2 points (voir figure 59). L'alimentation a du être placé sur le fond de l'armoire par manque de place. L'HMI a été accroché provisoirement avec un profil en aluminium au plafond de l'armoire. Tous les éléments de l'ancien régulateur à 2 points et du démarrage automatique ont été enlevés (voir figure 60).

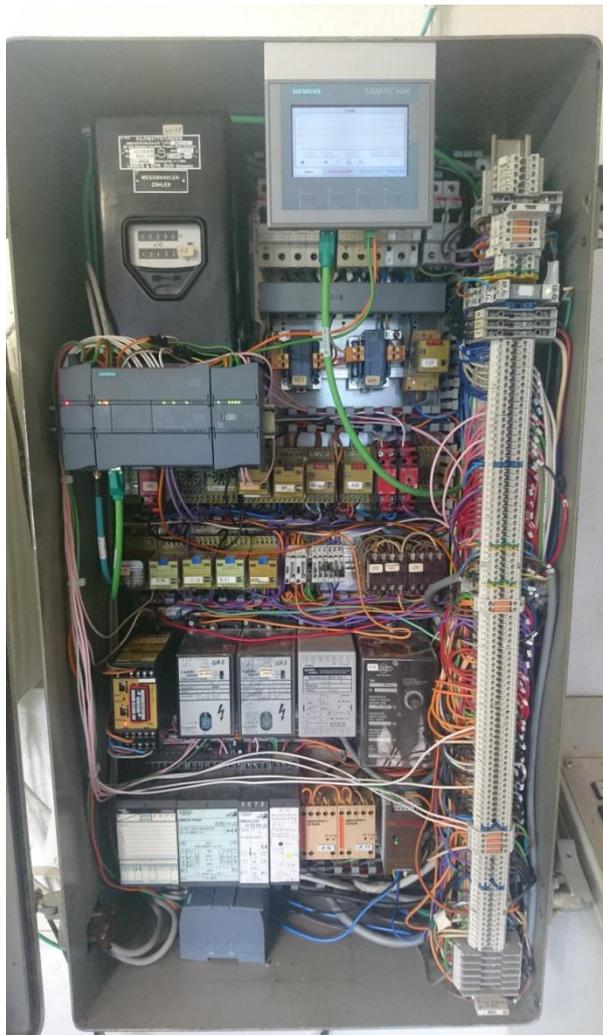


Figure 59: L'automate et l'HMI de la turbine 1 installés dans l'armoire électrique



Figure 60: Composants démontés et remplacés par l'automate

### 4.3.3 La protection contre la surtension

La nouvelle sonde de pression ainsi que l'automate nécessitent des parafoudres fiables pour assurer leur pérennité. Après des recherches sur internet et consultation avec la maison Kobel (spécialisée dans les petites centrales hydroélectriques), j'ai décidé d'utiliser des protections de la marque PHOENIX CONTACT [20]. Celles-ci ont des modules facilement échangeables en cas de défaillance.

Voici les composants de la protection ainsi que leur type :

- Connecteur de protection antisurtension (PT 1X2-24DC-ST)
- Élément de base de protection antisurtension (PT 1X2-BE)

#### Installation

Deux de ces protections ont été installées, une au bassin de captage pour protéger la sonde et l'autre dans le local de turbinage pour protéger l'automate. La figure 61 montre le schéma de principe de leur connexion.

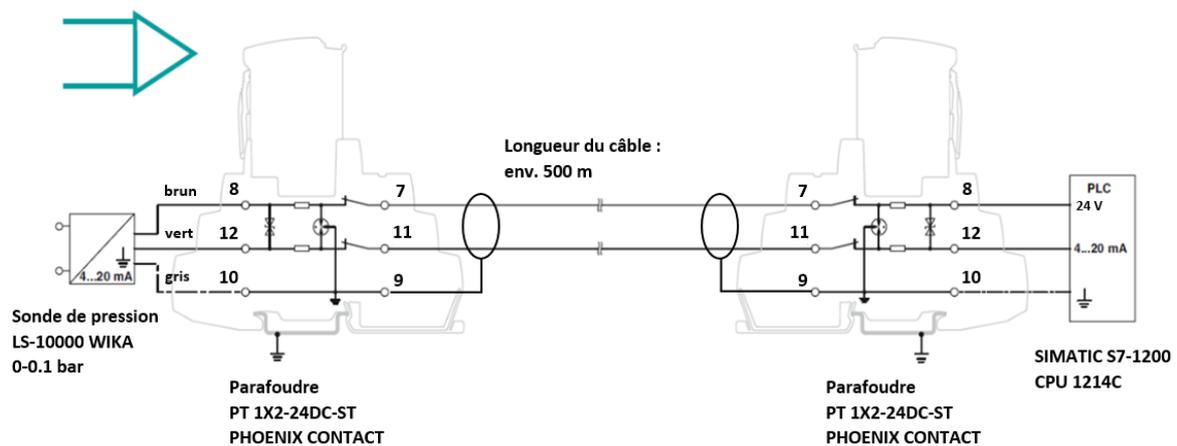


Figure 61: Schéma de principe de la connexion des parafoudres [27]

Sur la figure 62 on peut voir le parafoudre au bassin tandis que sur la figure 63 on peut voir son câble et celui de l'interrupteur à flotteur (en orange) qui rentrent dans un tube (en bas à gauche) qui les dirige vers le bornier qui se trouve dans le couvert à côté du bassin.



L'interrupteur a de nouveau été installé dans le bassin avec son tube de protection.

### Réparation du servomoteur

Le potentiomètre (en bleu) qui donne la position du pointeau était défectueux (la roue dentée tournait à vide sur l'axe) et a donc été remplacé par un nouveau.

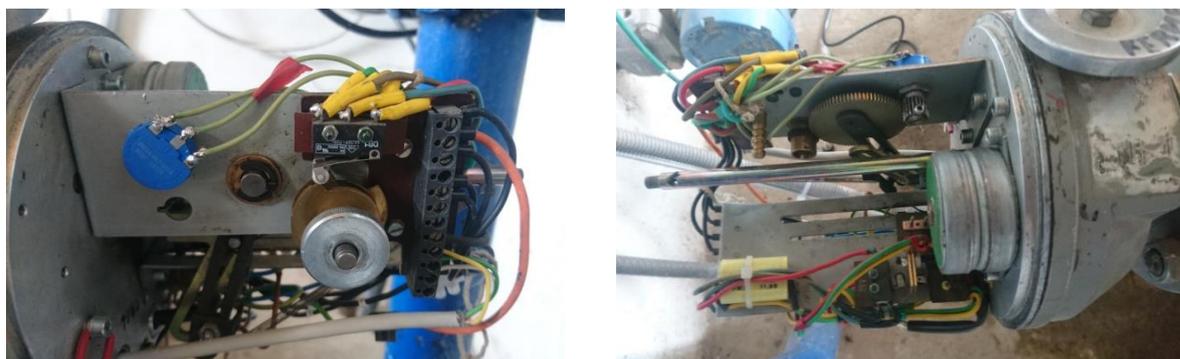


Figure 65: Servomoteur avec nouveau potentiomètre

## 4.5 Monitoring à distance

Deux solutions existent pour faire le monitoring à distance grâce au module de communication (celui-ci doit encore être équipé d'une carte SIM) et de son antenne. Par manque de temps je n'ai pas pu mettre en place aucune des deux solutions. Par contre j'ai pu tester la configuration du module de communication, la connexion au réseau mobile et l'envoi de messages SMS.

Les informations sur la configuration du module de communication se trouvent dans le chapitre 4.6.4.

### **Solution 1 : Communication de données avec Telecontrol Server Basic [25]**

Pour cette solution il faut un PC avec une liaison à Internet et sur lequel sont installés les logiciels Telecontrol Server Basic et WinCC Runtime Advanced.

Avec cette solution on peut faire une transmission sans fil des données via un réseau de téléphonie mobile. Ceci permet d'envoyer cycliquement les mesures de production de la turbine de l'automate vers un PC. La visualisation peut être faite via le système IHM WinCC.

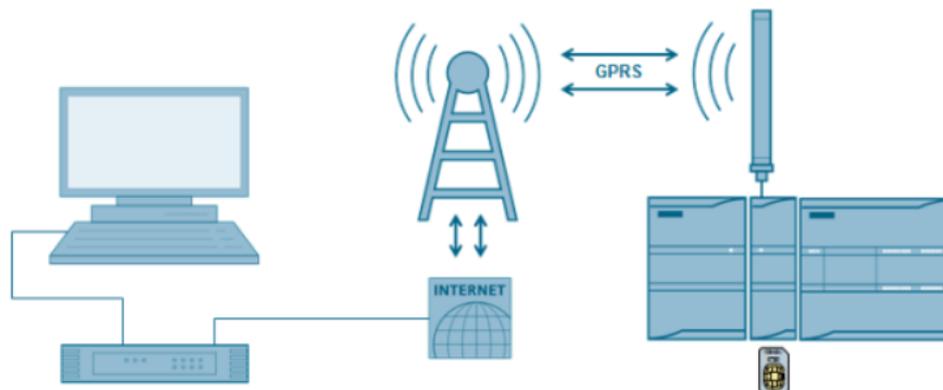


Figure 66: Schéma de principe de la communication de données avec Telecontrol Server Basic [25]

### **Solution 2 : Signalisation sans fil par SMS [26]**

Pour cette solution tout le matériel est déjà disponible.

Avec le module de communication, il est possible d'envoyer/recevoir des SMS à/depuis n'importe quel téléphone portable.

On peut programmer l'automate de telle façon à ce qu'il envoie un SMS avec la production d'énergie actuelle à un numéro d'appel paramétrable dès qu'il reçoit un SMS avec la demande spécifique.

## 4.6 Programmation de l'automate

### 4.6.1 Les premiers essais de programmation

J'ai emprunté une CPU 1211C à l'école (la seule CPU disponible du type S7-1200) pour pouvoir commencer avec la programmation en attendant que la CPU 1214C commandée arrive, celle-ci ayant eu du retard.

Après des premiers essais avec des simples exercices sur TIA Portal, j'ai installé S7-PLCSIM pour simuler la CPU 1214C. La CPU 1211C a seulement des entrées analogiques de 0-10 V et elle ne permet pas d'ajouter un module d'entrées/sorties supplémentaire ce qui est nécessaire pour avoir une entrée analogique de 4-20 mA pour le signal de la sonde.

Malheureusement, j'ai pu constater que la simulation de PID\_3Step V2 avec PLCSIM n'est pas prise en charge pour les modules S7-1200.

En attendant de trouver une solution, j'ai fait des essais avec l'HMI. Celui-ci permet d'afficher par exemple le niveau actuel du bassin d'accumulation ou l'état de l'injecteur.

J'ai repris la CPU 1211C à laquelle j'ai ajouté un module qui convertit une entrée 4-20 mA en 0-10 V. Ceci m'a permis de connecter la sonde et d'utiliser le PID\_3Step V2 (voir figure 67).

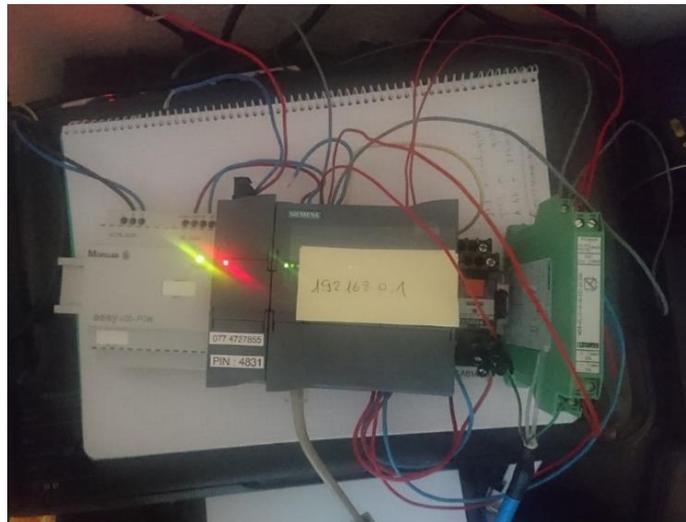


Figure 67: Installation de test avec une CPU 1211C

Ces essais m'ont permis de créer le programme final avec l'automate commandé. Celui-ci est décrit dans le prochain chapitre.

#### 4.6.2 Description du programme [23], [24]

Le programme est dans l'annexe 13.

La programmation de l'automate a été effectuée avec le logiciel de programmation SIMATIC STEP 7 Basic (TIA Portal).

Ce logiciel fournit les langages de programmation suivantes dont j'ai que utilisé les deux premières :

- CONT (schéma à contacts)
- LOG (logigramme)
- SCL (Structured Control Language)

Le programme comporte plusieurs fonctions (FC) (des blocs de code qui sont des sous-programmes), une pour chaque fonctionnalité appartenant à l'automatisation. Celles-ci sont décrites ci-dessous :

##### 4.6.2.1 *fcAi*

Dans cette fonction la valeur (Integer) des entrées analogiques suivantes est convertit dans l'unité correspondante :

- puissance\_generateur      kW
- courant\_generateur      A
- vitesse\_rotation      t/min
- niveau\_captage      cm
- pos\_pointeau      %

Leurs valeurs brutes étant des entiers (Integer) de 0 à 27648, celles-ci doivent être premièrement normalisées (reproduites sur une échelle linéaire de 0 à 1) avant d'être mises à l'échelle (reproduites sur la plage de valeurs souhaitée) pour avoir comme résultat un nombre à virgule flottante (Real).

##### 4.6.2.2 *fcDemarrageAuto*

#### **Le démarrage automatique**

Les conditions qui doivent toutes être valables pour que celui-ci puisse être exécuté sont :

- Le mode automatique est enclenché.
- La pression est plus grande que la pression minimale (11 bar).
- Le « niveau haut » est enclenché.
- Le générateur n'est pas enclenché.
- Le blocage du redémarrage répété est désactivé.

Une fois que le démarrage est activé et que l'injecteur est ouvert à moins de 6% une impulsion est donnée jusqu'à ce que l'injecteur dépasse cette ouverture. Ensuite, des impulsions suivies de pauses réglables sont générées pour ouvrir l'injecteur jusqu'à ce que la turbine ait atteint 1500 t/min. A cette vitesse le capteur de valeur limite GR1 donne le signal pour l'enclenchement automatique du générateur. Ensuite une impulsion de 3 secondes est donnée afin d'augmenter la puissance du générateur pour éviter le déclenchement du générateur par la détection de la puissance minimale (GR2). Suite à cela un des régulateurs de niveau prend la relève.

Le démarrage automatique est terminé quand le générateur est enclenché. Il est interrompu quand il y a une perte de la tension de commande ou le mode automatique est enlevé.

### ***Le blocage du redémarrage répété***

Si dans les cinq minutes à partir de l'enclenchement du démarrage automatique, l'un des événements suivants a lieu, le blocage du redémarrage répété s'active.

- La vitesse de rotation est au-dessus de 1600 t/min (survitesse).
- La pression est plus petite que la pression minimale (11 bar).
- Le générateur est enclenché durant plus de 10 secondes avec la puissance plus petite que la puissance minimale (0.5 kW).

Ce blocage peut être quittancé sur l'HMI (*vue « Opération », voir chapitre 4.7*).

En cas de variation du débit d'eau du captage la puissance de la turbine / du générateur doit être adaptée. Si le niveau d'eau dans le bassin monte, le régulateur ouvre l'injecteur de la turbine. Si le niveau baisse, le régulateur ferme l'injecteur. Avec un niveau constant, la position de l'injecteur ne change pas. L'ajustage de l'injecteur est fait à l'aide d'un servomoteur. Tout ceci est programmé dans la fonction suivante.

#### *4.6.2.3 fc Regulation*

### ***Les limitations de l'ouverture de l'injecteur***

Si l'ouverture de l'injecteur est plus grande que 50% ou si un interrupteur de fin de course indique que l'injecteur est ouvert, l'ouverture maximale de l'injecteur est mémorisée pour bloquer l'ordre d'ouverture donné par les régulateurs.

Si l'ouverture de l'injecteur est plus petite que 10% ou si un interrupteur de fin de course indique que l'injecteur est fermé, l'ouverture minimale de l'injecteur est mémorisée pour bloquer l'ordre de fermeture donné par les régulateurs.

### ***Le régulateur PID***

J'ai choisi d'utiliser le régulateur PID\_3Step V2 du logiciel STEP 7 pour obtenir une régulation précise tout en évitant une usure inutile du servomoteur. Ceci est réalisable grâce à une modulation de la durée d'impulsion.

L'instruction PID\_3Step V2 fournit un régulateur PID avec des paramètres spécifiques pour la régulation de vannes et actionneurs commandés par moteur. Celui-ci possède également deux sorties booléennes supplémentaires.

Le régulateur PID acquiert continuellement, dans une boucle de régulation, la mesure et la compare avec la consigne. A partir de l'écart résultant, il calcule une valeur de réglage permettant à la mesure d'atteindre la consigne le plus vite possible. Cette valeur de réglage se compose de trois actions :

- Une action proportionnelle P
  - Est proportionnelle à l'écart entre la consigne et la mesure.
- Une action intégrale I
  - Augmente jusqu'à ce que l'écart soit compensé.
- Une action dérivée D
  - Augmente avec la vitesse de modification de l'écart.

Ces actions peuvent être calculées par l'instruction elle-même lors de la mise en route. Leur optimisation est également possible.

Dans ce programme le régulateur PID a été configuré en tant que régulateur pas à pas à trois échelons avec signalisation de position.

En cas de défaillance de la sonde de pression analogique il y a la possibilité de commuter sur le régulateur à 3 points pour assurer le fonctionnement en automatique de la turbine avec l'interrupteur à flotteur.

Ce régulateur est activé quand les conditions suivantes sont appliquées :

- Le mode automatique est activé.
- Le générateur est enclenché.
- Le bouton « PID » sur l'HMI (vue « Opération ») est enclenché.

### ***Le régulateur à trois points***

Ce régulateur est programmé en deux parties :

La première donne des impulsions suivies de pauses pour ouvrir l'injecteur lorsque toutes les conditions suivantes sont valables :

- Le mode automatique est activé.
- L'injecteur est moins ouvert que l'ouverture maximale.
- Le bouton « PID » n'est pas activé.
- Le générateur est enclenché.
- Le flotteur indique « niveau haut » ou le niveau signalé par la sonde de pression est plus grand que 80 cm.
- Un interrupteur de fin de course n'indique pas que l'injecteur est ouvert.

La deuxième donne des impulsions suivies de pauses pour fermer l'injecteur lorsque toutes les conditions suivantes sont valables :

- Le mode automatique est activé.
- L'injecteur est plus ouvert que l'ouverture minimale.
- Le bouton « PID » n'est pas activé.
- Le générateur est enclenché.
- Le flotteur indique « niveau bas » ou le niveau signalé par la sonde de pression est plus petit que 75 cm.
- Un interrupteur de fin de course n'indique pas que l'injecteur est fermé.

### ***La commande de l'injecteur***

Cette partie donne les signaux définitifs qui ouvrent ou ferment l'injecteur :

L'injecteur ouvre quand le démarrage automatique, le régulateur PID ou le régulateur à trois points donne l'ordre d'ouvrir l'injecteur.

L'injecteur ferme quand la pression est plus petite que la pression minimale ou quand le régulateur PID ou le régulateur à trois points donne l'ordre de fermer l'injecteur.

#### **4.6.2.4 *fcAlarmes***

Les alarmes sont mémorisées afin de connaître les raisons d'un arrêt de la turbine. A présent trois alarmes sont programmées pour les cas suivants :

- La vitesse de rotation est plus grande que 1600 t/min (survitesse).
- Le mode automatique ou le générateur est enclenché et la pression est plus petite que la pression minimale.
- Après 5 secondes écoulées depuis l'enclenchement du générateur, la puissance est encore plus petite que la puissance minimale.

Chacune de ces alarmes peut être quittancée depuis l'HMI (vue «Opération ») quand l'alarme n'est plus active.

Toutes ces fonctions sont appelées dans le bloc d'organisation (OB), un bloc de code de niveau supérieur nommé « Main », pour être exécutées.

#### 4.6.3 Test de fonctionnement du programme

J'ai reçu l'automate programmable environs dix jours avant la remise du rapport. C'est pour cela que je n'ai pas pu optimiser toutes les fonctions du programme. Ceci sera fait dans les semaines suivantes.

##### ***Le démarrage automatique de la turbine***

- Après l'enclenchement de la tension de commande et du mode automatique, l'injecteur commence à s'ouvrir correctement selon la fonction (fcDémarrageAuto) décrite dans le programme.
- A 1500 t/min le générateur se connecte au réseau.
- L'injecteur s'ouvre pendant 2 secondes pour arriver à la puissance minimale.

Remarque : Cette fonction doit encore être améliorée parce que le générateur se déclenche parfois toute suite après son enclenchement.

##### ***La régulation automatique du niveau***

###### Régulateur à 3 points

L'injecteur s'ouvre cycliquement avec le signal « niveau haut » et se ferme avec le signal « niveau bas ». Ceci fonctionne comme prévu dans le programme (voir *fcRegulation – chapitre 4.6.2.3*).

###### Régulateur PID

Ce régulateur n'a pas encore été testé par manque de temps. Ceci sera fait dans les semaines suivantes.

##### ***Les alarmes***

Les quatre alarmes sont mémorisées lors de leur occurrence comme prévu dans le programme (voir *fcDémarrageAuto et fcAlarmes – chapitres 4.6.2.2 et 4.6.2.4*). Elles peuvent être quittancées sur l'HMI.

**Les « trends »**

Sur la vue « Trends » (voir figure 68) on peut suivre les signaux de la puissance, de la position du pointeau et du niveau d'eau. Ceci est déjà une avancée vers le monitoring.

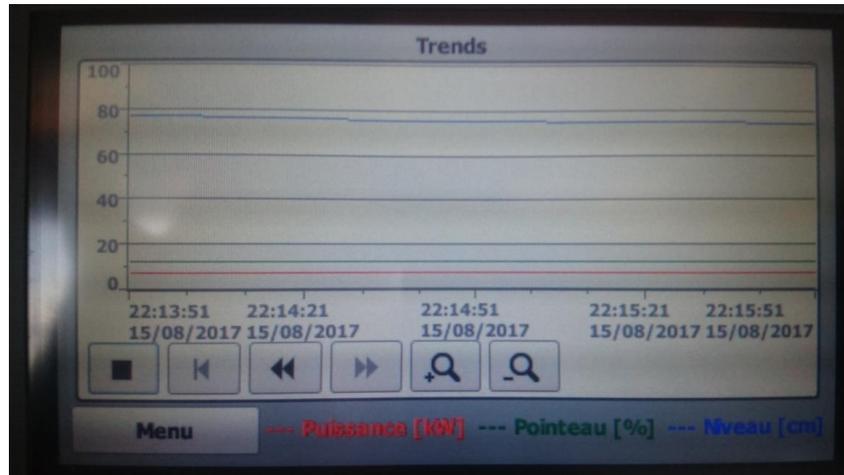


Figure 68: Vue „Trends“

4.6.4 Configuration du module de communication [28]

Le module nécessite les informations suivantes pour l'envoi de messages du type SMS (voir figure 69) :

- Activation de la communication Telecontrol
- Numéro d'appel du CP
- PIN de la carte SIM
- Activation des SMS
- Numéro d'abonné du centre de service SMS (SMSC)

Paramètres de communication par téléphonie mobile

---

Paramètres de téléphonie mobile

Numéro d'appel du CP : +41791234567

Activer PIN

PIN : ●●●●

Répéter PIN : ●●●●

Activer services de données

GPRS (2G)

UMTS (3G)

LTE

Activer SMS

SMSC : +41794999000

Figure 69: Paramètres de téléphonie mobile

## Messages

La configuration de messages permet l'envoi de SMS ou d'E-mail de manière assez simple :

- Pas de programmation de blocs de programme nécessaire
- Chaque message à son numéro d'appel et texte
- Déclenchement de l'envoi suite à un événement (p.ex. variable d'API)
- Possibilité de joindre la valeur d'une variable API dans le texte

Les messages suivants (voir figure 70) ont été configurés pour signaler une alarme. Ils sont envoyés quand leurs variables correspondantes sont activées dans le programme.

Messages		
	Nom	Type de message
1	AlarmePuissanceMin	SMS
2	AlarmePressionMin	SMS
3	AlarmeSurvitesse	SMS

Figure 70: Messages d'alarme

Les deux sections suivantes sont uniquement à titre d'information. Leur fonctionnalité n'a pas pu être testée dans le cadre de ce travail.

## Points de données [29]

La configuration des points de données permet d'accéder à des variables de l'automate avec le serveur Telecontrol Server Basic. Les propriétés sont les suivantes :

- Pas de programmation de blocs de programme nécessaire
- Chaque point de données est associé à une variable de l'automate.
- Nombre maximal de points : 200
- Différents modes de transfert possibles : spontané ou interrogation par le serveur

## Configuration avec blocs de programme

Siemens mets à disposition différents blocs de programme pour le module de communication. Ces blocs offrent plus de possibilités de communication, par exemple la réception de SMS ou l'envoi d'un message à plusieurs numéros d'appel.

## 4.7 Le nouveau manuel d'utilisation de la turbine 1

### **Mode manuel**

Le mode manuel n'a pas été modifié.

Le démarrage et la régulation se font avec le tableau de commande. La procédure est la suivante :

- Enclencher la tension de commande avec le bouton « tension de commande ».
- Mettre le sélecteur « commande » sur « manuel ».
- Ouvrir l'injecteur lentement avec le bouton « ouvrir » jusqu'à obtenir une vitesse de rotation de 1500 t/min.
- Enclencher le générateur en mettant le sélecteur « alternateur » sur « en ».
- Ajuster la puissance du générateur avec les boutons « ouvrir » et « fermer » jusqu'à la puissance désirée (selon le débit d'eau actuellement disponible). Ce réglage doit être fait rapidement pour éviter que le générateur se déclenche par la détection du signal d'alarme de la puissance minimale.

Pour plus d'information, voir aussi le manuel d'utilisation d'origine (BANL, 1997, M. Schwarz [12]).

### **Mode automatique**

Celui-ci fonctionne avec le nouvel automate programmable :

Avec la tension de commande enclenchée et le sélecteur en mode automatique, aucune intervention de l'opérateur n'est nécessaire :

- La turbine accélère à 1500 t/min avec une rampe paramétrable.
- Le générateur s'enclenche.
- Le régulateur du niveau (à 3 points ou PID) ajuste la puissance du générateur selon le débit disponible.
- En cas d'arrêt à cause d'un manque d'eau, la turbine redémarre automatiquement après la remontée du niveau d'eau.
- En cas de défaillance de la mesure analogique du niveau, le système peut continuer à fonctionner avec le régulateur à 3 points et l'interrupteur à flotteur.

## HMI

L'automate est équipé d'un écran tactile qui possède plusieurs vues.

La vue « Menu » (voir figure 71) est la vue principale qui conduit sur les autres vues. Les vues « Démarrage auto », « Régulateur PID » et « Régulateur 3 points » sont prévues pour l'utilisation par un technicien. Toutes les vues possèdent un bouton qui permet de retourner sur la vue principale.



Figure 71: Vue „Menu“

La vue « Opération » (voir figure 72) contient des informations importantes sur le fonctionnement actuel de la turbine 1. On peut y voir :

- La puissance, le courant et la vitesse de rotation du générateur
- Le niveau d'eau dans le bassin d'accumulation (information reçu par la sonde de pression)
- Le mode actif (automatique ou manuel) et si le générateur est enclenché
- Si l'injecteur est en train d'ouvrir ou de fermer
- L'état des alarmes (le bouton « Reset » permet de les quitter une fois qu'elles ne sont plus actives)

Elle permet également de choisir le type de régulation (régulation PID ou régulation à trois points).

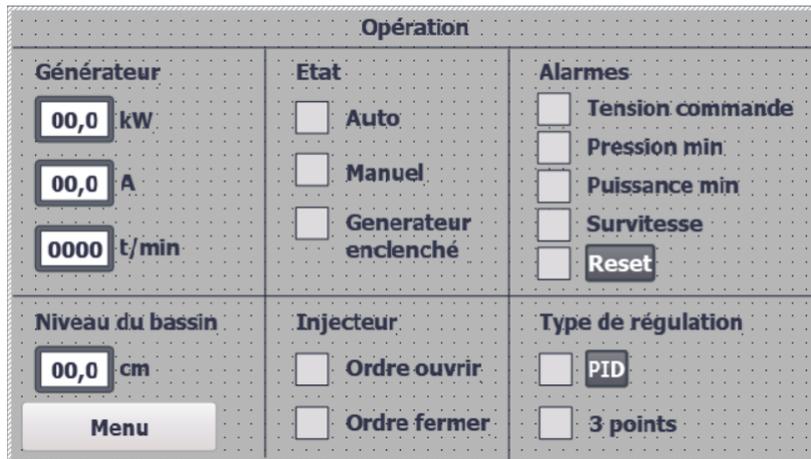


Figure 72: Vue „Opération“

La vue « Trends » (voir figure 73) montre l'évolution de la puissance, de l'ouverture de l'injecteur ainsi que du niveau d'eau dans le bassin. L'axe du temps est paramétrable.



Figure 73: Vue „Trends“

Dans la vue « Démarrage auto » (voir figure 74) on peut modifier la durée des impulsions et des pauses du démarrage automatique. On peut également visualiser la position du pointeau, si l'injecteur est en train d'ouvrir et la vitesse de rotation du générateur.

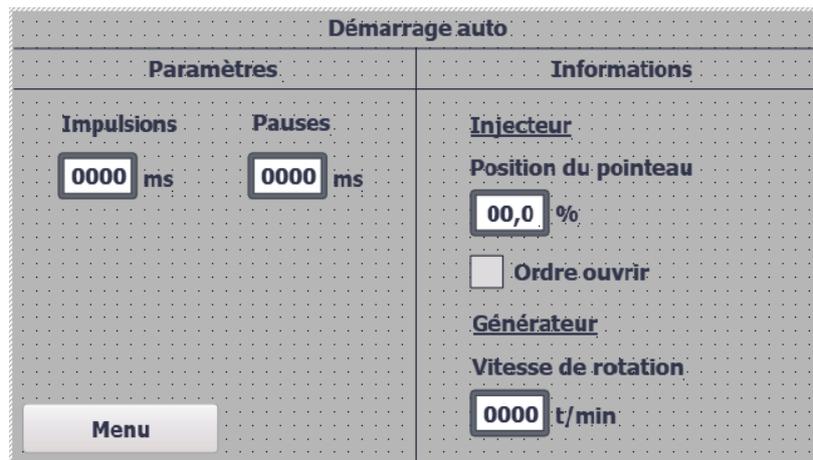


Figure 74: Vue „Démarrage auto“

La vue « Régulateur PID » (voir figure 75) permet de paramétrer le régulateur PID :

- « Gain » : gain proportionnel
- « TI » : temps d'intégration (détermine le temps de réponse de l'action I)
- « TD » : temps de dérivation (détermine le temps de réponse de l'action D)
- « Setpoint » : consigne du niveau d'eau dans le bassin
- « MaxPos » : limite supérieure de la valeur de réglage
- « MinPos » : limite inférieure de la valeur de réglage

On y peut aussi visualiser le niveau d'eau dans le bassin, la puissance du générateur et l'état de l'ouverture de l'injecteur. Pour ce dernier il y a les informations suivantes :

- La position du pointeau
- Si l'injecteur est ouvert ou fermé
- Si l'injecteur est en train d'ouvrir ou de fermer

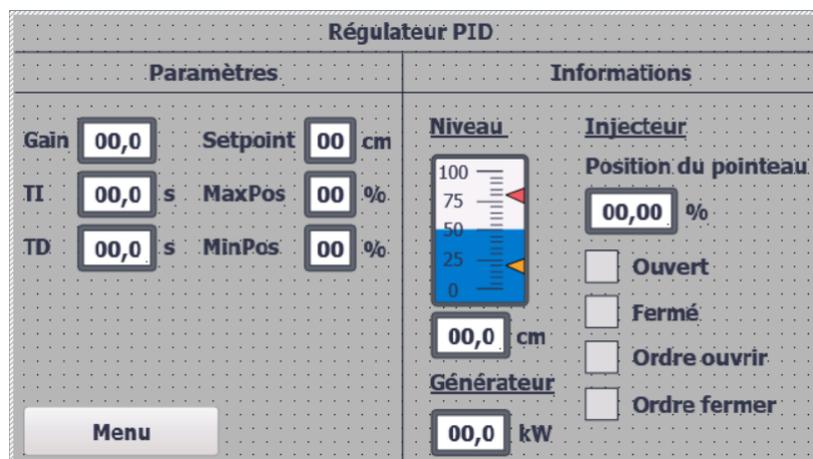


Figure 75: Vue „Régulateur PID“

Dans la vue « Régulateur 3 points » (voir figure 76) on peut régler les paramètres du régulateur à trois points. Ceux-ci sont la durée des impulsions et des pauses pour l'ouverture et la fermeture de l'injecteur. On retrouve le niveau d'eau du bassin signalé par l'interrupteur à flotteur et la sonde de pression ainsi que les mêmes informations sur l'injecteur que dans la vue du régulateur PID.

Régulateur 3 points			
Paramètres		Informations	
<b>Ouverture</b>		<b>Niveau du bassin</b>	
Impulsions	Pauses	Flotteur	<b>Injecteur</b>
<input type="text" value="0000"/> ms	<input type="text" value="0000"/> ms	<input type="checkbox"/> Haut	<input type="text" value="00,00"/> %
<b>Fermeture</b>		<input type="checkbox"/> Bas	<input type="checkbox"/> Ouvert
Impulsions	Pauses	Sonde	<input type="checkbox"/> Fermé
<input type="text" value="0000"/> ms	<input type="text" value="0000"/> ms	<input type="text" value="00,0"/> cm	<input type="checkbox"/> Ordre ouvrir
<input type="button" value="Menu"/>		<input type="checkbox"/> Ordre fermer	

Figure 76: Vue „Régulateur 3 points“

## 5 Propositions d'appareils pour la mesure du débit

Un des objectifs du travail était de mettre en place des mesures de débit permanentes. J'ai fait des recherches pour mesurer le débit turbiné. Malheureusement ces appareils se sont avérés trop chers pour le budget disponible. C'est pour cela que dans ce chapitre je me limite seulement à montrer quelques appareils qui pourraient être installés dans la centrale de Beudon.

Pour mesurer le débit turbiné, on placerait le débitmètre sur le bout de conduite situé avant la jonction de laquelle partent les conduites qui alimentent la turbine 1 et 2 (voir figure 77). Ainsi on peut mesurer le débit total qui est turbiné par les quatre turbines.

Voici les données importantes qui ont pu être relevées sur la conduite pour la recherche d'un débitmètre approprié :

- Circonférence : 538 mm
- Diamètre extérieur : 171 mm (DN 150)
- Matériel : acier
- Pression de service : 19.5 bar (avec facteur de sécurité : env. 40 bar)
  - La dénivellation pour les turbogroupes 1 et 2 est d'environ 195m [10].
- Débit turbiné nominal : 38 l/s (plage de mesure: 0-40 ou 0-50 l/s)
  - Débit nominal turbiné par le turbogroupe 1 (28 l/s) + débit nominal turbiné par le turbogroupe 2 (10 l/s) [10]



Figure 77: Emplacement possible du débitmètre

Les types de débitmètres suivants seraient applicables :

### Débitmètre électromagnétique

**Principe de fonctionnement :** [30], [32]

Ce débitmètre utilise la loi d'induction de Faraday. D'après cette loi, une tension est induite dans un fluide électro-conducteur lorsque celui-ci traverse un champ magnétique. Celui-ci est présent dans le tube de mesure. La tension induite, qui est proportionnelle à la vitesse de l'écoulement moyenne, est relevée par deux électrodes puis transmise à un convertisseur de mesure. Le débit est calculé à partir de celle-ci et de la section de la conduite.

[30], [31]

Marque :	SIKA
Modèle :	VMM 150
Diamètre nominal :	DN 150
Plage de mesure :	
▪ Vitesse d'écoulement :	0 – 10 m/s
▪ Débit :	0 – 636.2 m <sup>3</sup> /h
Résistance à la pression :	
▪ EN1092-1:	PN 16 / PN 40
Conditions de montage :	
▪ Longueur droite d'entrée :	5 x DN
▪ Longueur droite de sortie :	2-3 x DN
Prix :	?



Figure 78: Débitmètre électromagnétique VMM 150 [30]

Remarque : Je n'ai pas encore reçu de réponse à ma demande d'offre.

Pour le débitmètre suivant j'ai reçu une offre qui se trouve en annexe (voir annexe 14).

[32], [33]

Marque :	Endress+Hauser
Modèle :	Proline Promag W 400
Gamme de diamètre nominal :	DN 25 – 2000
Gamme de mesure :	9 dm <sup>3</sup> /min à 110 000 m <sup>3</sup> /h
Pression de process max :	PN 40, Class 300, 20K
Conditions de montage :	
▪ Longueur droite d'entrée :	≥ 5 x DN
▪ Longueur droite de sortie :	≥ 2 x DN
Prix :	env. 5000 CHF



Figure 79: Débitmètre électromagnétique Proline Promag W 400 [33]

## Débitmètre à ultrasons [34], [35]

### Principe de fonctionnement :

Deux capteurs à ultrasons (placés selon la figure 80) fonctionnent alternativement comme émetteur et récepteur : ils émettent à tour de rôle un signal acoustique. Celui-ci est une fois accéléré par le sens du courant et l'autre fois freiné en remontant le sens du courant. La différence du temps de transit qui en résulte est proportionnelle à la vitesse d'écoulement moyenne du liquide. Cette dernière et la section de la conduite permettent de calculer le débit.

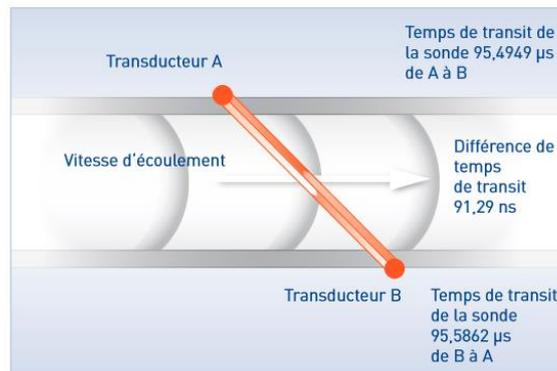


Figure 80: Principe de fonctionnement du débitmètre à ultrasons [36]

Marque : KROHNE  
Modèle : OPTISONIC 6300  
Gamme de diamètre nominal : DN 15 – 4000

#### Caractéristiques de conduites:

- Matériaux : Métal, plastique, céramique, fibrociment, conduites avec revêtement intérieur/extérieur (revêtement totalement fixé à la paroi de la conduite)
- Epaisseur de paroi : < 200 mm
- Epaisseur du revêtement : < 20 mm

Vitesse d'écoulement recommandée : 0.5 – 20 m/s

#### Conditions de montage :

- Section droite amont :  $\geq 10 \times \text{DN}$
- Section droite aval :  $\geq 5 \times \text{DN}$

Prix : env. 3000 €



Figure 81: Débitmètre à ultrasons OPTISONIC 6300 [34]

## Mesure de débit avec pression différentielle

### Principe de fonctionnement : [7]

Celle-ci produit une réduction de la section de l'écoulement. La pression est mesurée avant et dans le rétrécissement. L'équation de Bernoulli permet de calculer avec la différence de pression entre ces deux points et l'aire des deux sections un taux de débit-volume.

Ce type de mesure était implémenté d'origine (voir figure 82). L'appareil de mesure existe toujours mais il est déconnecté électriquement et hydrauliquement. Le diaphragme a été enlevé probablement quand le départ vers la turbine 2 a été installé. Il faudrait tester si l'appareil de mesure de pression différentielle est encore fonctionnel et réinstaller un diaphragme ou une tuyère de Venturi.



Figure 82: Mesure de débit avec pression différentielle dans le local de turbinage

## 6 Propositions pour des améliorations futures

### Pour la turbine 1

Le servomoteur de l'injecteur est dans un mauvais état et devrait être remplacé. Des offres pour un nouvel appareil se trouvent dans les annexes 11 et 12.

Ce travail a seulement mis en place le démarrage et la régulation automatique de la turbine 1. Les autres fonctionnalités commandées par des relais peuvent également être intégrées dans l'automate installé :

- Commande manuelle de la turbine (démarrage et régulation)
- Commande du déflecteur
- Enclenchement du générateur et des condensateurs
- Protections (court-circuit, surcourant, surtension, température du bobinage, température des roulements,...)

Il y a des éléments électroniques obsolètes dans l'armoire de commande qui devraient bientôt être remplacés :

- Les capteurs de valeurs limite
- Le contrôleur de rotation
- Les convertisseurs de mesure
- Le compteur de kWh

### Le réglage des autres turbines

Puisque la turbine 1 est la plus puissante et qu'elle fournit l'eau pour les turbines 3 et 4, elle est la plus appropriée pour gérer l'ensemble de la microcentrale.

Ainsi les autres turbines pourraient être commandées depuis l'automate de la turbine 1 en lui ajoutant plus de modules d'entrées et de sorties. Les programmations suivantes sont envisageables :

- Après le démarrage de la turbine 1, on pourrait envoyer les ordres d'enclenchement aux commandes des turbines 3 et 4.
- Quand il y a de l'eau en abondance, on pourrait enclencher automatiquement la turbine 2.
- En cas de défaillance de la turbine 1, on pourrait faire une régulation de niveau avec la turbine 2.
- Une turbine Pelton a un mauvais rendement si elle travaille à moins de 20 % de sa puissance nominale [37]. C'est pour cela quand il y a peu d'eau à disposition, on pourrait arrêter la turbine 1 (30 kW) et démarrer automatiquement la turbine 2 (10 kW).

## Autres propositions

- Il faudrait vérifier l'état des turbines (les augets et les injecteurs) car ceci a une grande importance pour le rendement.
- Une mesure du débit d'eau devrait être installée pour pouvoir juger le rendement des turbines.

## 7 Conclusion

Avant le début du travail, la microcentrale n'était pas automatisée et certains éléments étaient hors d'usage.

Avec l'installation de la sonde pression pour mesurer le niveau et l'automate programmable, la régulation du niveau et le démarrage automatique sont devenues possibles. Ceci facilitera l'opération future de l'installation considérablement. Néanmoins il y a encore beaucoup de composants à réviser ou à remplacer.

Il faut décider dans un future proche quelle sera la suite pour la modernisation de la microcentrale. Pour assurer la pérennité des installations un certain investissement sera inévitable.

## 8 Remerciements

Je tiens à remercier :

- M. Davide Pavanello pour la proposition de ce sujet et ses conseils
- M. Christophe Truffer pour l'aide au choix de l'automate et les commandes
- M. Jean-Daniel Marcuard pour ses conseils liés à l'automation
- Mme Marion Granges pour son hospitalité
- M. David Gonçalves pour sa relecture et ses corrections

Je remercie particulièrement mon frère et mon père qui m'ont aidé avec la partie électrique du travail et qui m'ont permis de réaliser les modifications sur place.

## 9 Bibliographie

- [1] Office fédéral de l'énergie OFEN, *Manuel petites centrales hydrauliques - Informations sur la planification, la construction et l'exploitation* (PDF) [en ligne]. 2012  
[http://www.bfe.admin.ch/kleinwasserkraft/index.html?lang=fr&dossier\\_id=04954](http://www.bfe.admin.ch/kleinwasserkraft/index.html?lang=fr&dossier_id=04954)
- [2] Office fédéral de l'énergie OFEN, *Handbuch Kleinwasserkraftwerke – Informationen für Planung, Bau und Betrieb* (PDF) [en ligne]. 2012  
[http://www.bfe.admin.ch/kleinwasserkraft/index.html?lang=fr&dossier\\_id=04954](http://www.bfe.admin.ch/kleinwasserkraft/index.html?lang=fr&dossier_id=04954)
- [3] Office fédéral de l'énergie OFEN, *Guide pratique pour la réalisation de Petites centrales hydrauliques* (PDF) [en ligne]. 1993  
<http://www.bfe.admin.ch/kleinwasserkraft/03834/04170/index.html?lang=fr>
- [4] Office fédéral de l'énergie OFEN, *Turbines hydrauliques – Petites centrales hydrauliques* (PDF) [en ligne]. 1995  
<http://www.bfe.admin.ch/kleinwasserkraft/03834/04170/index.html?lang=fr>
- [5] Office fédéral de l'énergie OFEN, *Générateurs et installations électriques – Petites centrales hydrauliques* (PDF) [en ligne]. 1995  
<http://www.bfe.admin.ch/kleinwasserkraft/03834/04170/index.html?lang=fr>
- [6] Office fédéral de l'énergie OFEN, *Régulation et sécurité d'exploitation – Petites centrales hydrauliques* (PDF) [en ligne]. 1995  
<http://www.bfe.admin.ch/kleinwasserkraft/03834/04170/index.html?lang=fr>
- [7] MUNCH, Cécile. *Hydraulique*. HES-SO Valais, 2015
- [8] PALLFY, Sandor O, et al. *Wasserkraftanlagen : Klein-und Kleinstkraftwerke*. 7. Auflage. Deutschland : expert verlag GmbH, 2014
- [9] GRANGES, Jacques. *Dossier de demande de concession*. 1993
- [10] Mhylab. *Rapport de visite des aménagements liés au turbinage du Torrent de Beudon*. 2016
- [11] BORTER, Sandro, et al. *Projet 3 : Evaluation de performance de la microcentrale hydroélectrique du domaine de Beudon*. HES-SO Valais, 2017
- [12] SCHWARZ, Martin. *Manuel d'utilisation et documentation technique de la microcentrale de Beudon (classeur rouge)*
- [13] WIKA, *Détecteur de niveau à flotteur – Modèle FLS* (PDF) [en ligne]. 2016  
[http://fr.wika.ch/upload/DS\\_LM3001\\_fr\\_fr\\_79273.pdf](http://fr.wika.ch/upload/DS_LM3001_fr_fr_79273.pdf)
- [14] KOBOLD, *Contrôleur de niveau magnétique pour liquides* (PDF) [en ligne]. 2017  
<http://kobold.com/uploads/files/m-fr-niveau-1.pdf>
- [15] WIKA, *Transmetteur de pression immergeable haute performance – Type LH-10* (PDF) [en ligne]. 2012  
[http://fr.wika.ch/upload/DS\\_PE8109\\_fr\\_fr\\_1422.pdf](http://fr.wika.ch/upload/DS_PE8109_fr_fr_1422.pdf)
- [16] KOBEL, *Eintauchsonde* [en ligne]  
<http://kobel.info/eintauchsonde.html>

- [17] JUMO, *JUMO cTron – Régulateur compact* [en ligne]  
<http://www.jumo.fr/produits/capteurs-de-temp%C3%A9rature-%26-automatisation/automatiser/r%C3%A9gulateur-compact/702070/jumo-ctron---r%C3%A9gulateur-compact-702070.html>
- [18] KOBEL, *Wasserstand AWS-150* [en ligne]  
<http://kobel.info/wasserstand-aws-150.html>
- [19] KOBEL, *Blitzschutz* [en ligne]  
<http://kobel.info/blitzschutz.html>
- [20] PHOENIX CONTACT, *Überspannungsschutzstecker – PT 1X2-24DC-ST - 2856032* [en ligne]  
<https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ch?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2856032&library=chde&tab=1&requestType=product&productId=2856032&productDetection=true&redirectTarget=country&redirectTo=CH>
- [21] MANOMETER AG, *Transmetteur de pression immergeable, type LS-10 – Mode d’emploi* (PDF) [en ligne]. 2013  
[http://fr.wika.ch/upload/OI\\_14075012\\_LS\\_10\\_GB\\_D\\_F\\_E\\_51813.pdf](http://fr.wika.ch/upload/OI_14075012_LS_10_GB_D_F_E_51813.pdf)
- [22] SIEMENS, *Contrôleurs SIMATIC – Vue d’ensemble* (PDF) [en ligne]. 2013  
[https://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/fr/brochure\\_simatic-controller\\_overview\\_fr.pdf](https://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/fr/brochure_simatic-controller_overview_fr.pdf)
- [23] SIEMENS, *SIMATIC S7-1200, S7-1500 Régulation PID – Description fonctionnelle* (PDF) [en ligne]. 2017  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att\\_916451/v1/s71500\\_pid\\_control\\_function\\_manual\\_frFR\\_fr-FR.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_916451/v1/s71500_pid_control_function_manual_frFR_fr-FR.pdf)
- [24] SIEMENS, *S7 Automate programmable S7-1200 – Manuel système* (PDF) [en ligne]. 2012  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att\\_106120/v1/s71200\\_System\\_Manual\\_fr-FR\\_fr-FR.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106120/v1/s71200_System_Manual_fr-FR_fr-FR.pdf)
- [25] SIEMENS, *Communication de données entre un S7-1200 et Telecontrol Server Basic (Set 30)* [en ligne]  
[https://support.industry.siemens.com/cs/document/39863979/communication-de-donn%C3%A9es-entre-un-s7-1200-et-telecontrol-server-basic-\(set30\)?dti=0&lc=fr-WW](https://support.industry.siemens.com/cs/document/39863979/communication-de-donn%C3%A9es-entre-un-s7-1200-et-telecontrol-server-basic-(set30)?dti=0&lc=fr-WW)
- [26] SIEMENS, *Signalisation et commande sans fil par SMS avec automates S7-1200 (Set 32)* [en ligne]  
[https://support.industry.siemens.com/cs/document/58638283/signalisation-et-commande-sans-fil-par-sms-avec-automates-s7-1200-\(set-32\)?dti=0&lc=fr-WW](https://support.industry.siemens.com/cs/document/58638283/signalisation-et-commande-sans-fil-par-sms-avec-automates-s7-1200-(set-32)?dti=0&lc=fr-WW)
- [27] PHOENIX CONTACT, *Aide à la sélection pour la protection antisurtension en informatique* [en ligne].  
[https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads\\_ed/global/web\\_dwl\\_app\\_sample/TT\\_1935.pdf](https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_app_sample/TT_1935.pdf)
- [28] SIEMENS, *S7-1200-TeleControl CP 1243-7 LTE* [en ligne]  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/704/109476704/att\\_923802/v1/BA\\_CP-1243-7-LTE\\_77.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/704/109476704/att_923802/v1/BA_CP-1243-7-LTE_77.pdf)

- [29] SIEMENS, *Industrial Remote Communication-TELECONTROL SERVER BASIC* [en ligne]  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/745/50898745/att\\_70001/v1/BA\\_TCS-BASIC\\_77.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/745/50898745/att_70001/v1/BA_TCS-BASIC_77.pdf)
- [30] SIKA, *Magnetisch-induktiver Durchflusssensor Typ VMM150* [en ligne]  
<https://www.sika.net/produkte/durchflusssmesstechnik/magnetisch-induktive-durchflusssensoren/baureihe-indu%C2%AE-vmm/item/1707-magnetisch-induktiver-durchflusssensor-typ-vmm150.html#produktbeschreibung>
- [31] SIKA, *Magnetisch induktiver Durchflusssensor induQ-Baureihe VMM* (pdf) [en ligne]. 2017  
<https://www.sika.net/services/downloads/send/255-magnetisch-induktive-durchflusssensoren-magnetic-inductive-flow-sensors/1838-magnetisch-induktive-durchflusssensoren-magnetic-inductive-flow-sensors-vmm.html>
- [32] ENDRESS+HAUSER, *Technische Information-Proline Promag W 400* (pdf) [en ligne]. 2015  
[https://portal.endress.com/wa001/dla/5000523/1603/000/04/TI01046DDE\\_0515.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000523/1603/000/04/TI01046DDE_0515.pdf)
- [33] ENDRESS+HAUSER, *Proline Promag W 400-Débitmètre électromagnétique* [en ligne]  
<https://www.fr.endress.com/fr/instrumentation-terrain-sur-mesure/debit-mesure-produits/debitmetre-electromagnetique-promag-W-400>
- [34] KROHNE, *Débitmètres à ultrasons-OPTISONIC 6300* [en ligne]  
<http://ch.krohne.com/fr/produits/mesure-de-debit/debitmetres-a-ultrasons/optisonic-6300/>
- [35] KROHNE, *OPTISONIC 6300 Notice technique* (pdf) [en ligne]. 2009  
[http://cdn.krohne.com/dlc/TD\\_OPTISONIC6300\\_fr\\_4000255502\\_091020\\_R05.pdf](http://cdn.krohne.com/dlc/TD_OPTISONIC6300_fr_4000255502_091020_R05.pdf)
- [36] KROHNE, *Mesure de débit-Gamme de produits* (pdf) [en ligne]. 2015  
[http://cdn.krohne.com/dlc/CA\\_OVERVIEW\\_FLOW\\_fr\\_160404.pdf](http://cdn.krohne.com/dlc/CA_OVERVIEW_FLOW_fr_160404.pdf)
- [37] ENERGIE.CH AG, *Wasserturbinen* [en ligne]  
<http://energie.ch/wasserturbinen>

## 10 Table des illustrations

Figure 1: Classification des centrales hydroélectriques selon leur taille [1], [2].....	8
Figure 2: Classification des turbines [7] .....	9
Figure 3: Domaines d'utilisation des turbines [7] .....	9
Figure 4: Coupe longitudinale et roue d'une turbine Pelton [4] .....	11
Figure 5: Machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil [5] .....	13
Figure 6: Points de mesure nécessaires à la régulation et à la surveillance [6] .....	14
Figure 7: Régulateur à 2 points [8] .....	17
Figure 8: Régulateur PI [8].....	18
Figure 9: Plan de la microcentrale avec les altitudes [10].....	19
Figure 10: Schéma hydraulique de la microcentrale.....	20
Figure 11: Débits mensuels du torrent de Beudon (gris) et turbinés par la turbine 1 (noir) en 1993 ..	21
Figure 12: Caractéristiques techniques des turbogroupes [10] .....	21
Figure 13: Prise d'eau avec conduites .....	23
Figure 14: Dessableurs entre la prise d'eau et le bassin d'accumulation .....	23
Figure 15: Dégrilleurs dans le bassin .....	24
Figure 16: Tube de vidange .....	24
Figure 17: Moteur de vanne .....	24
Figure 18: Interrupteur à flotteur.....	25
Figure 19: Anciens capteurs de pression.....	25
Figure 20: Bassin d'accumulation.....	25
Figure 21: Tableau de commande dans le couvert à coté du bassin .....	26
Figure 22: Les borniers entre le bassin et le local de turbinage.....	26
Figure 23: Affichage de niveau .....	27
Figure 24: Capteur de pression .....	27
Figure 25: Conduites au-dessus de la gorge du torrent .....	27
Figure 26: Conduites dans la terre .....	27
Figure 27: Turbogroupe 1.....	28
Figure 28: Armoire électrique de la turbine 1.....	28
Figure 29: Tableau de commande de la turbine 1 .....	28
Figure 30: L'ancienne régulation de niveau de la turbine 1.....	28
Figure 31: Turbogroupe 2.....	29
Figure 32: Tableau de commande de la turbine 2 .....	29
Figure 33: Turbogroupe 3.....	29
Figure 34: Tableau de commande de la turbine 3 .....	29
Figure 35: Turbogroupe 4 (4 kW) .....	30
Figure 36: Tableau de commande de la turbine 4 .....	30
Figure 37: Mesure de niveau par flotteur .....	30
Figure 38: Capteur de pression .....	30
Figure 39: Commande à distance dans le „Eselstall“ .....	31
Figure 40: Compteur de l'énergie dans le local des pressoirs.....	31
Figure 41: Interrupteur à flotteur.....	32
Figure 42: Intérieur du boîtier du flotteur.....	32
Figure 43: Tableau de commande indiquant le niveau haut et bas.....	32
Figure 44: Schéma du régulateur à 2 points [12] .....	33
Figure 45: Eléments du démarrage et de la régulation de niveau automatique de la turbine 1.....	35
Figure 46: Servomoteur de l'injecteur de la turbine 1 .....	35

Figure 47: Variantes d'automatisation .....	37
Figure 48: Ancien schéma de la mesure du niveau [12] .....	39
Figure 49: Nouveau schéma de la mesure du niveau .....	40
Figure 50: Ancien schéma de l'entraînement du pointeau de la turbine 1 [12] .....	41
Figure 51: Modifications des connexions du servomoteur trouvées sur place [12] .....	42
Figure 52: Schéma de connexion de l'automate .....	43
Figure 53: Schéma électrique des convertisseurs et appareils de mesure [12].....	45
Figure 54: Code de commande .....	46
Figure 55: Transmetteur de pression LS-10000 [21] .....	49
Figure 56: Plaque signalétique du transmetteur de pression .....	49
Figure 57: Sonde de pression dans le tube de protection .....	50
Figure 58: Schéma de raccordement de la sonde de pression [21] .....	50
Figure 59: L'automate et l'HMI de la turbine 1 installés dans l'armoire électrique .....	51
Figure 60: Composants démontés et remplacés par l'automate.....	51
Figure 61: Schéma de principe de la connexion des parafoudres [27] .....	52
Figure 62: Parafoudre au bassin d'accumulation.....	53
Figure 63: Emplacement du parafoudre .....	53
Figure 64: L'interrupteur à flotteur réparé .....	53
Figure 65: Servomoteur avec nouveau potentiomètre.....	54
Figure 66: Schéma de principe de la communication de données avec Telecontrol Server Basic [25]	55
Figure 67: Installation de test avec une CPU 1211C.....	56
Figure 68: Vue „Trends“ .....	62
Figure 69: Paramètres de téléphonie mobile.....	62
Figure 70: Messages d'alarme.....	63
Figure 71: Vue „Menu“ .....	65
Figure 72: Vue „Opération“ .....	66
Figure 73: Vue „Trends“ .....	66
Figure 74: Vue „Démarrage auto“ .....	67
Figure 75: Vue „Régulateur PID“ .....	67
Figure 76: Vue „Régulateur 3 points“ .....	68
Figure 77: Emplacement possible du débitmètre .....	69
Figure 78: Débitmètre électromagnétique VMM 150 [30] .....	70
Figure 79: Débitmètre électromagnétique Proline Promag W 400 [33].....	71
Figure 80: Principe de fonctionnement du débitmètre à ultrasons [36] .....	72
Figure 81: Débitmètre à ultrasons OPTISONIC 6300 [34] .....	72
Figure 82: Mesure de débit avec pression différentielle dans le local de turbinage .....	73

## 11 Annexes

- Annexe 1 : Plan de câblage
- Annexe 2: Schéma développé
- Annexe 3: Schéma développé (avec corrections)
- Annexe 4: Offre pour interrupteur à flotteur FLS-SE (Manometer)
- Annexe 5: Offre pour interrupteurs à flotteur (Kobold)
- Annexe 6 : Offre pour sonde de pression LH-10 (Manometer)
- Annexe 7 : Offre pour sonde de pression, parafoudre et régulateur (Kobel)
- Annexe 8 : Offre pour régulateur cTRON 08H (Jumo)
- Annexe 9 : Offre pour parafoudre (Phoenix Contact)
- Annexe 10 : Offre de Siemens
- Annexe 11 : Offre pour servomoteurs (von Rohr)
- Annexe 12 : Offre pour servomoteur (Auma)
- Annexe 13 : Programme sur TIA Portal
- Annexe 14 : Offre pour débitmètre (Endress+Hauser)