

Sion, le 3 septembre 2007

---

**Travail de diplôme :  
Développement d'une commande  
pour mini-centrales hydro-électriques**

---

Systèmes Industriels

Power & Control

Etudiant : M. Ivan Sanchez

Professeur : M. Jean-Daniel Marcuard

Mandant : M. Steve Caloz – Telsa SA Sion

SI	TV	EE	IG	EST
X	X	X	X	

Filière / Studiengang : Systèmes industriels

Confidentiel / Vertraulich 

<b>Etudiant / Student</b> Yvan Sanchez	<b>Année scolaire / Schuljahr</b> 2006/07	<b>No TD / Nr. DA</b> SI/2007/29
<b>Proposé par / vorgeschlagen von</b> Telsa SA, Sion M. Steve Caloz		<b>Lieu d'exécution / Ausführungsort</b> HES-SO Valais, DSI  <b>Expert / Experte</b> M. Steve Caloz

<b>Titre / Titel:</b> <b>Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques</b>
<b>Description / Beschreibung:</b> La maison <b>Telsa Electrotechnique</b> à Sion met sur le marché des turbines hydrauliques destinées à des mini-centrales installées notamment sur des réseaux d'eau potable.  D'une part certaines installations fonctionnent en îlot alors que d'autres sont reliées au réseau. D'autre part la turbine et l'alternateur doivent être adaptés de cas en cas en fonction de nombreux paramètres (topographie, débits saisonniers, etc.). Actuellement cela impose de concevoir et réaliser des systèmes de commande spécifiques à chaque site.  Il serait évidemment préférable de disposer d'un système de commande « standard » adaptable à toutes les configurations courantes. Ce système devrait être modulaire afin de rester financièrement compétitif dans les cas simples.
<b>Objectifs / Ziele:</b> Le projet consiste à étudier et concevoir une commande « universelle » pour des mini-centrales hydro-électriques.  Le travail demandé consiste à :  — Etablir un cahier des charges de la commande sur la base des différentes configurations possibles, des impératifs techniques, des règlements, des normes, etc. Il sera complété par une analyse fonctionnelle et une analyse de risque. — Définir la structure de la commande (a priori modulaire) et à proposer une conception générale. Le cahier des charges détaillé de chacun des modules sera établi. — Proposer des solutions techniques pour chacun des modules, basées sur du matériel industriel éprouvé. A l'issue de cette étape, on demande une évaluation du coût du système de commande. — Dans la mesure du temps disponible, à développer un ou plusieurs modules et/ou à simuler le fonctionnement du système.

<b>Signature ou visa / Unterschrift oder Visum</b>	<b>Délais / Termine</b>
Resp. de l'orientation power and control ..... Professeur/Dozent: Jean-Daniel Marcuard ..... Etudiant/Student: .....	Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 03.09.2007  Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 23.11.2007  Exposition publique / Ausstellung Diplomarbeiten: 30.11.2007  Défenses orales / Mündliche Verfechtungen Semaine 49

## Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

-

### Entwicklung von einer Steuerung für ein kleines Wasserkraftwerk

#### Objectif

Le projet consiste à étudier et concevoir une commande « universelle » adaptable à toutes les configurations courantes de mini-centrales. Ce système est modulaire afin de rester financièrement compétitif dans les cas simples.

Ce travail contient :

- Un cahier des charges de la commande sur la base des différentes configurations possibles.
- Une analyse fonctionnelle et une analyse de risque.
- Une proposition de la structure de la commande, basée sur du matériel industriel éprouvé.
- Une évaluation du coût du système de commande.
- Un développement de la commande en plusieurs modules.

#### Résultats

Les différents points énoncés ci-dessus sont traités. Toutefois, le développement des modules n'est pas achevé. Les simulations n'ont pas pu être faites.

#### Mots-clés

Mini-centrales hydrauliques, régulation, commande, analyse de risque

#### Ziel

*Das folgende Projekt besteht aus der Entwicklung und Konzeption einer universellen Wasser- und Kraftwerkssteuerung, welche auf jedes System angepasst werden kann. Das folgende System soll modular sein, um finanziell wettbewerbsfähig zu sein.*

*Die folgende Arbeit enthält:*

*Eine Funktions- und Risikoanalyse*

*Eine Vorschlag zur Steuerung und Struktur,, welcher auf industriellen verwendeten Komponenten basiert*

*Eine Kostenvorschlag des Steuerungssystem*

*Eine Entwicklung des Steuerungssystems für mehrere Komponenten*

#### Resultate

*Alle Arbeitsanforderungen wurden erreicht, die Entwicklung der Steuermodule wurde nicht beendet, wie auch deren Simulationen*

#### Schlüsselwörter

*Kleines Wasserkraftwerk, Reglungs-, Steuerungs, Risikoanalyse*

# Table des matières

Introduction.....	5
1. Notions générales.....	6
1.1. Introduction .....	6
1.2. Principes électriques .....	6
1.2.1. Les circuits électriques .....	6
1.2.2. La tension .....	6
1.2.3. Le courant.....	7
1.2.4. La fréquence .....	7
1.2.5. La puissance apparente.....	8
1.2.6. La puissance active .....	9
1.2.7. La puissance réactive.....	9
1.2.8. Le facteur de puissance $\cos \varphi$ .....	9
1.2.9. Le courant alternatif.....	10
1.3. Le réseau.....	10
1.4. Le consommateur .....	11
1.5. Structures hydrauliques .....	15
1.5.1. Introduction.....	15
1.5.2. Composants de l'aménagement.....	16
1.6. Le générateur .....	18
1.6.1. Introduction.....	18
1.6.2. Machine synchrone .....	19
1.6.3. Machine asynchrone .....	21
1.7. Composants et paramètres surveillés de l'aménagement .....	23
1.7.1. Le niveau amont de l'aménagement .....	24
1.7.2. Le niveau différentiel à la grille du dégrilleur.....	24
1.7.3. Le niveau bas d'alarme.....	24
1.8. Paramètres de réglage de la turbine.....	25
1.8.1. Le débit $Q$ .....	25
1.8.2. La vitesse de rotation $\omega$ ou $n$ .....	25
2. Modes de fonctionnement et de régulation .....	26
2.1. Introduction .....	26
2.2. Fonctionnement en réseau interconnecté (Parallèle) .....	26
2.2.1. Réglage de la puissance active $P$ .....	26
2.2.2. Réglage de la puissance réactive et du $\cos \varphi$ .....	27
2.2.1. Caractéristiques de fonctionnement sous $U = \text{cte}$ et $f = \text{cte}$ .....	28
2.3. Fonctionnement en réseau isolé .....	30
2.3.1. Réglage de la fréquence .....	30
2.3.2. Réglage de la tension .....	31
2.3.3. Charge ballast .....	33
2.4. Les modes de régulation des turbine .....	34
2.4.1. Au moyen du réseau électrique.....	34
2.4.2. Au moyen d'un régulateur électronique à charge ballast.....	35
2.4.3. Au moyen d'un régulateur vitesse-débit.....	36
3. Analyse fonctionnelle.....	37
4. Analyse de risque .....	39

4.1.	Introduction .....	39
4.2.	Tableau de l'analyse de risque.....	40
4.3.	Interprétation .....	46
4.4.	Traitement des données obtenues.....	46
5.	Cahier des charges de la commande.....	49
5.1.	Introduction .....	49
5.2.	Principe de fonctionnement .....	49
5.3.	Schéma de l'installation.....	49
5.4.	Schéma de processus .....	50
5.5.	Les capteurs de niveau.....	51
5.6.	Les vannes .....	51
5.6.1.	La vanne d'entrée.....	52
5.6.2.	La vanne de garde.....	52
5.6.3.	La vanne du by-pass .....	52
5.6.4.	Destructeur de Carnot.....	52
5.7.	La turbine .....	52
5.8.	L'équipement électrique.....	53
5.8.1.	L'alternateur .....	53
5.8.2.	Connexion au réseau.....	53
5.9.	Contrôle commande.....	53
6.	Structure proposée.....	55
6.1.	Introduction .....	55
6.2.	L'automate .....	56
6.2.1.	Introduction.....	56
6.2.2.	Solutions proposées.....	58
6.3.	Les capteurs.....	61
6.3.1.	Introduction.....	61
6.3.2.	Les capteurs de niveau .....	61
6.3.3.	Le capteur de pression.....	63
6.3.4.	Le débitmètre .....	64
6.3.5.	Le capteur de vitesse .....	65
6.4.	Les actionneurs .....	66
6.4.1.	Le pointeau.....	66
6.4.2.	Les vannes pilotées .....	67
6.5.	L'équipement des mesures électriques .....	68
6.5.1.	Mesures du réseau .....	68
6.5.2.	Mesures de régulation .....	70
6.5.3.	Mesures de protection de l'alternateur.....	72
7.	Analyse des coûts .....	76
7.1.	Introduction .....	76
7.2.	Le coût du matériel .....	77
8.	La commande .....	79
8.1.	Introduction .....	79
8.2.	Gestion des modes .....	79

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

8.3.	Démarrage du groupe.....	83
8.4.	Les arrêts .....	89
8.4.1.	Arrêt normal.....	89
8.4.2.	Arrêt rapide .....	91
8.4.3.	Arrêt d'urgence.....	92
9.	Conclusion .....	97
10.	Remerciements.....	97
11.	Références .....	98
12.	Liste des figures .....	98
13.	Liste des tableaux .....	100
14.	Annexes .....	100

## Introduction

L'hydroélectricité représente plus de 15 % de la production mondiale d'électricité et 92 % de l'énergie propre renouvelable dans le monde.

Une proportion importante des pays en voie de développement connaissent de gros problèmes d'approvisionnement énergétique, principalement d'électricité. Ces problèmes sont dus à la rareté et aux coûts des ressources ainsi qu'aux difficultés de transport et de distribution. De plus, le protocole de Kyoto implique une réflexion accrue sur la protection de l'environnement. Dans le secteur énergétique, la question se traduit par la recherche de moyens de production qui consomment un minimum d'énergie primaire et favorisent la réduction des émissions des gaz à effet de serre. L'hydroélectricité fait partie de ces moyens de production.

Mon travail de semestre concernant la conception d'un programme de pré-dimensionnement pour des mini-centrales hydrauliques m'a aiguillé sur la procédure adéquate pour étudier la faisabilité d'une installation hydroélectrique. Ainsi, cette recherche a abouti sur un logiciel permettant d'estimer rapidement et simplement la rentabilité d'une mini-centrale hydroélectrique.

Il existe plusieurs types d'installations : certaines fonctionnent en îlot alors que d'autres sont reliées au réseau. La turbine et l'alternateur doivent être adaptés de cas en cas en fonction de nombreux paramètres. Actuellement, cela impose de concevoir et de réaliser des systèmes de commande spécifiques à chaque site.

Il est évident que posséder un système de commande « standard » adaptable à toutes les configurations courantes est plus avantageux. Ce système se doit d'être modulable afin de rester financièrement compétitif dans des cas simples. La maison Telsa Sa à Sion a décidé d'exploiter ce genre de système et c'est donc en collaboration avec eux que j'ai décidé de réaliser mon travail de diplôme.

Ce travail se déroule en quatre parties : la collecte d'informations théoriques nécessaires sur le sujet (Références en fin de rapport § 11), l'analyse des interactions entre les différents paramètres avec une analyse de risque et fonctionnelle afin d'aboutir sur un cahier des charges de la commande, d'une brève évaluation financière puis pour finir d'une première ébauche du programme à implémenter dans l'automate

Ce travail est composé de quatre parties :

- la recherche des notions théoriques sur le sujet (Références § 11),
- le cahier des charges de la commande grâce à l'analyse des interactions entre les différents paramètres avec une analyse fonctionnelle et de risque,
- une brève évaluation financière,
- l'ébauche du programme à implémenter dans l'automate.

## 1. Notions générales

### 1.1. Introduction

Lors de ce chapitre, j'expose quelques notions élémentaires que j'ai pu récolter durant mon projet. Elles permettent de comprendre les bases de la production d'électricité.

### 1.2. Principes électriques

#### 1.2.1. Les circuits électriques

Un déplacement d'électrons dans un conducteur crée un courant électrique. L'énergie qui en résulte peut être convertie en chaleur, en mouvement mécanique, en informations, etc.

Un circuit électrique est impérativement constitué de trois composants :

- La source
- Les conducteurs
- La charge

Les circuits électriques peuvent être comparés aux circuits hydrauliques.

#### 1.2.2. La tension

Les électrons dans un conducteur ne peuvent se déplacer que s'il y a une différence de potentiel appelée *tension*. Celle-ci mesure en volt [V]. Elle est semblable à la différence de pression  $\Delta p$  en hydraulique. Voici une petite comparaison entre l'hydraulique et l'électrique :

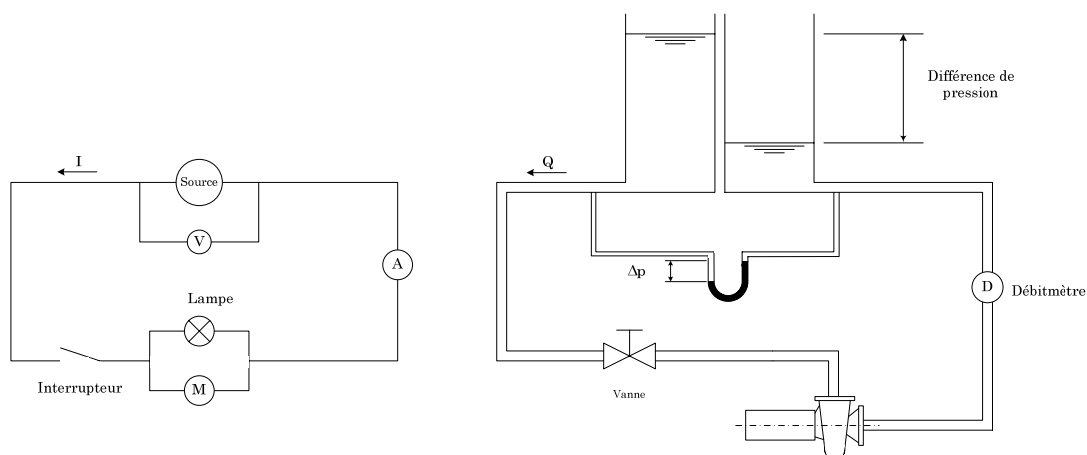


Figure 1 : Comparaison électrique-hydraulique



### 1.2.3. Le courant

Lorsque nous avons une tension entre deux points d'un circuit électrique, un mouvement d'électrons se crée afin de compenser cette différence. Ce mouvement est appelé courant  $I$ , il est comparable au débit hydraulique. Il se mesure en ampères [A].

Lorsque le mouvement de charges est toujours dans le même sens, le courant se nomme courant continu et la tension se nomme tension continue. Si le mouvement alterne d'un sens à un autre, on parle alors de courant alternatif et de tension alternative.

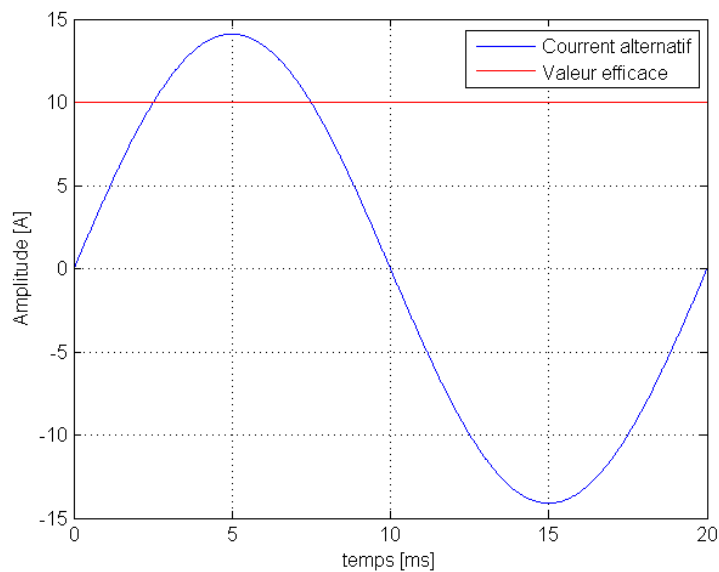


Figure 2 : Comparaison courant continu et alternatif

La figure ci-dessus montre un courant alternatif de 14.1A de crête à une fréquence de 50Hz et son courant équivalent en continu, appelé courant efficace.

### 1.2.4. La fréquence

La fréquence  $f$  est le nombre de cycles complets que fait la tension en une seconde. Elle se mesure en hertz [Hz]. La fréquence de 50 Hz correspond à 50 cycles par seconde. La période  $T$  correspond à une durée de 20ms.

$$f = \frac{1}{T}$$

où  $T$  est la période en [s]

### 1.2.5. La puissance apparente

Une installation électrique, en courant alternatif, comprenant des récepteurs tels que transformateur, moteur, soudeuse, électronique de puissance..., et en particulier, tout récepteur dont l'intensité est déphasée par rapport à la tension, absorbe une puissance totale que l'on appelle puissance apparente.

$$S = U \cdot I$$

[VA]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

où U est la tension de phase en [V]  
I est le courant de phase en [A]  
P est la puissance active en [W]  
Q est la puissance réactive en [var]

La puissance apparente est associée à l'énergie apparente exprimée en [kVAh].

Voici une illustration

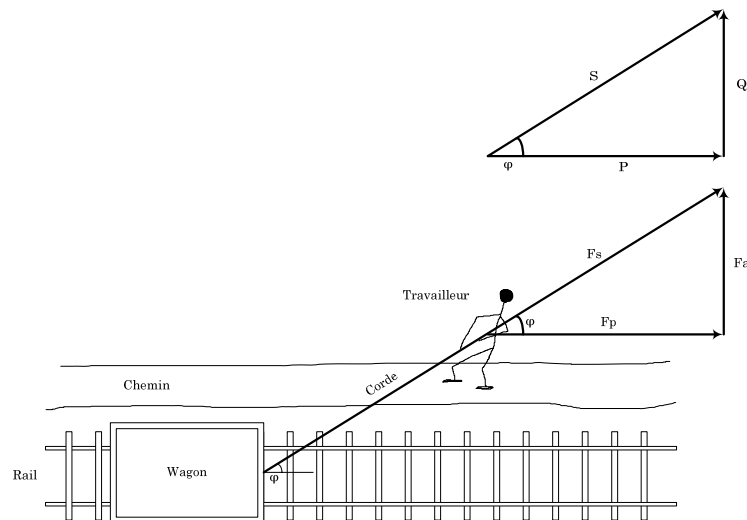


Figure 3 : Représentation de la puissance

### 1.2.6. La puissance active

La puissance active est la puissance qui se transforme intégralement en travail et en chaleur. Cette puissance est celle facturée aux consommateurs.

Pour un courant alternatif elle se calcule de manière générale avec:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

où  $U$  est la tension de phase en [V]  
 $I$  est le courant de phase en [A]  
 $\varphi$  est le déphasage en [rad/s]

Elle est associée à l'énergie active qui se mesure en [kWh].

### 1.2.7. La puissance réactive

La puissance réactive est la puissance nécessaire à la création du champ magnétique dans les inductances (moteurs, transfo) ou du champ électrique dans des capacités. Contrairement à la précédente, cette puissance est dite "improductive" pour l'utilisateur.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [\text{var}]$$

où  $U$  est la tension de phase en [V]  
 $I$  est le courant de phase en [A]  
 $\varphi$  est le déphasage en [rad/s]

A cette puissance correspond l'énergie réactive exprimée en [kvarh].

### 1.2.8. Le facteur de puissance $\cos \varphi$

Dans les réseaux alternatifs, certaines charges peuvent créer un déphasage entre la tension et le courant. C'est-à-dire qu'à l'instant où le courant est à sa valeur de crête, la tension n'est nécessairement à son maximum. Ce déphasage peut aussi être observé dans le rapport de la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ . Ce rapport peut nous indiquer la nature des charges connectées. S'il est proche de 1, c'est qu'il n'y a presque pas de consommation de puissance réactive. Au contraire, si l'on s'approche de 0, c'est que nous avons des charges qui consomment de la puissance réactive, comme les moteurs et les transformateurs.

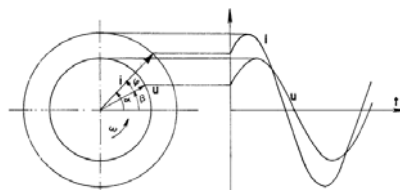


Figure 4 : Exemple de déphasage tension-courant

### 1.2.9. Le courant alternatif

Le courant alternatif est la manière la plus utilisée pour transporter l'électricité car il présente des avantages par rapport au continu : un faible coût de transport, une transformation facile, les moteurs et les générateurs alternatifs plus simples de construction, ainsi que les éléments de coupure et d'enclenchement plus simples.

La production et la distribution se fait par système triphasé permettant d'avoir des moteurs et des alternateurs de plus petite dimension. Il en résulte donc un gain économique. Le monophasé est utilisé uniquement pour des puissances inférieure à 5 kW.

Le courant alternatif permet de générer facilement un champ tournant utilisé par les moteurs. Un gain important de matériaux est réalisé avec le transport d'énergie alternative triphasée par rapport au courant continu ou aux lignes monophasées.

### 1.3. Le réseau

On appelle réseau électrique l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques) vers les consommateurs d'électricité.

Le réseau est caractérisé par :

- Le nombre de phases
- La tension  $U$
- La fréquence  $f$
- La puissance de transfert

Cependant, nous retrouvons des valeurs différentes de tension et de fréquence selon les pays. En voici un aperçu :

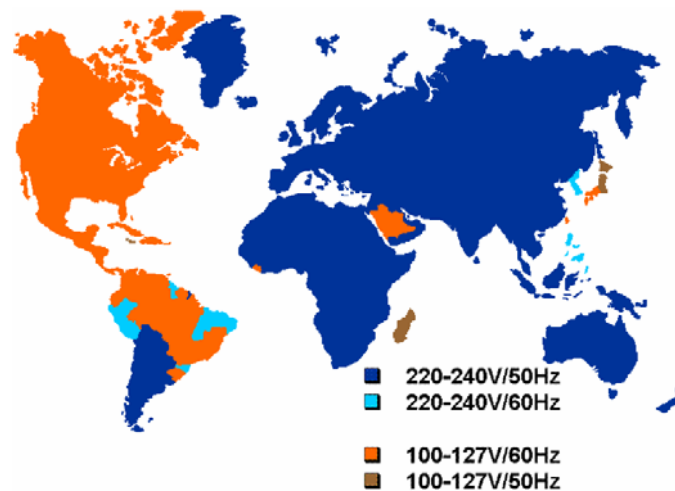


Figure 5 : Carte des fréquences et tensions domestiques utilisées de nos jours

## 1.4. Le consommateur

L'utilisateur est caractérisé par :

- La tension  $U$
- La fréquence  $f$
- La puissance active  $P$
- Le  $\cos \varphi$

Il existe trois circuits qui consomment différemment l'énergie.

- Circuit résistif pur
- Circuit inductif pur
- Circuit capacitif pur

Ces trois types de circuits se combinent pour donner une caractéristique moyenne du consommateur.

Les exemples de graphiques montrés ci-dessous sont pour une tension efficace de 3.5V et un courant de 1.8 A.

### Circuit résistif pur

Le circuit résistif pur est un circuit qui alimente uniquement une résistance. Dans ce type de circuit, le courant et la tension sont en phases où  $\varphi = 0$ , d'où le  $\cos \varphi = 1$ . Donc une résistance seule ne consomme que de l'énergie active ( $Q = 0$ ).

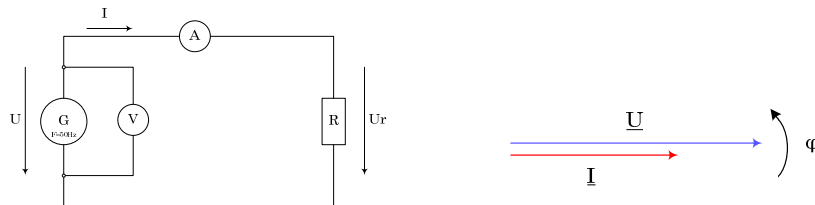


Figure 6 : Circuit résistif pur et Représentation par phaseurs

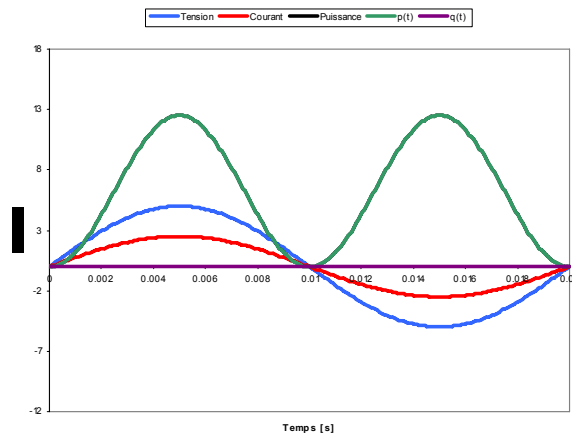


Figure 7 : Allure des signaux pour une résistance

Circuit inductif pur

Le circuit inductif pur est un circuit composé d'une inductance  $L$  et d'une source de tension  $U$ , les résistances de lignes étant négligées :

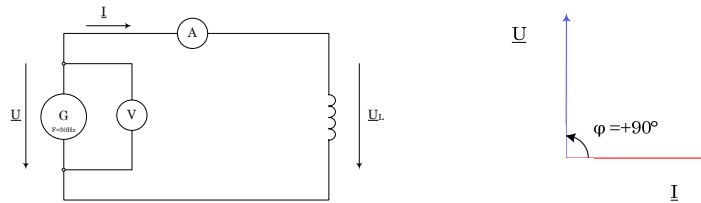


Figure 8 : Circuit inductif pur et Représentation par phaseurs

La tension et le courant sont déphasés de  $+ 90^\circ$  où le  $\cos \varphi = 0$ . On remarque que la tension est en avance sur le courant, c'est-à-dire que la tension atteint sa valeur de crête avant le courant. Celui-ci est limité parce qu'on appelle la réactance inductive.

La puissance instantanée varie autour de la valeur moyenne nulle (Figure 9). Pendant un quart de la période, elle est positive et l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie magnétique. Pendant le quart suivant, cette énergie est renvoyée à la source. Les inductances ne consomment que de l'énergie réactive et la puissance active est donc nulle.

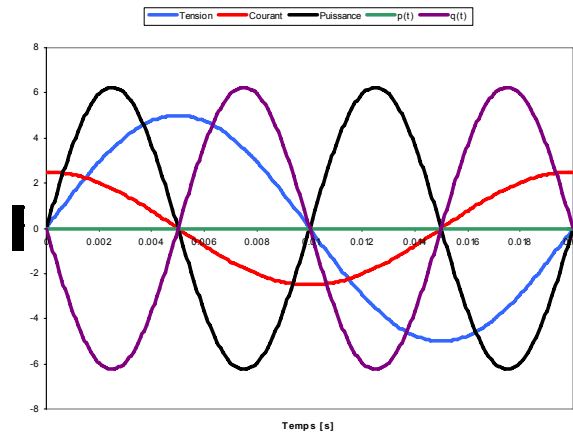


Figure 9 : Allure des signaux pour une inductance

Circuit capacitif pur

Le circuit capacitif est un circuit composé d'une capacité C et d'une source de tension U (Figure 10):

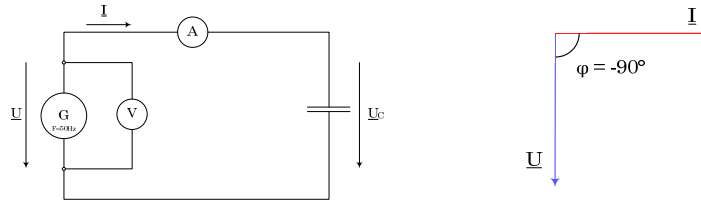


Figure 10 : Circuit capacitif pur et Représentation par phaseurs

La tension et le courant sont déphasés de  $-90^\circ$  et le  $\cos \varphi$  est donc aussi égal à 0 (Figure 10). On remarque que la tension est en retard sur le courant de  $90^\circ$ , c'est-à-dire que la tension atteint sa valeur de crête après le courant. Le courant est limité parce qu'on appelle la réactance capacitive.

D'après la figure suivante, on peut remarquer que la puissance instantanée varie autour de la valeur moyenne nulle. Pendant un quart de la période, elle est positive et l'énergie emmagasinée est sous forme d'énergie électrostatique et pendant le quart suivant cette énergie est renvoyée à la source. Les capacités ne consomment que de l'énergie réactive donc la puissance active est nulle. Les condensateurs ont la propriété de ne pas laisser passer de courant lorsqu'il est continu.

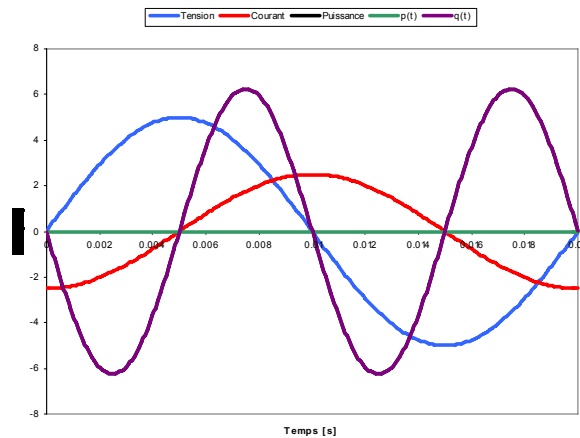


Figure 11 : Allure des signaux pour une capacité

Voici l'allure des composantes électriques lorsque nous avons à faire à une charge mixte d'un  $\cos \varphi$  de 0.9, qui représente la valeur que les services industriels demandent de maintenir. Nous pouvons constater que cette charge consomme beaucoup d'énergie active et que peu d'énergie réactive.

### Travail de diplôme

Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

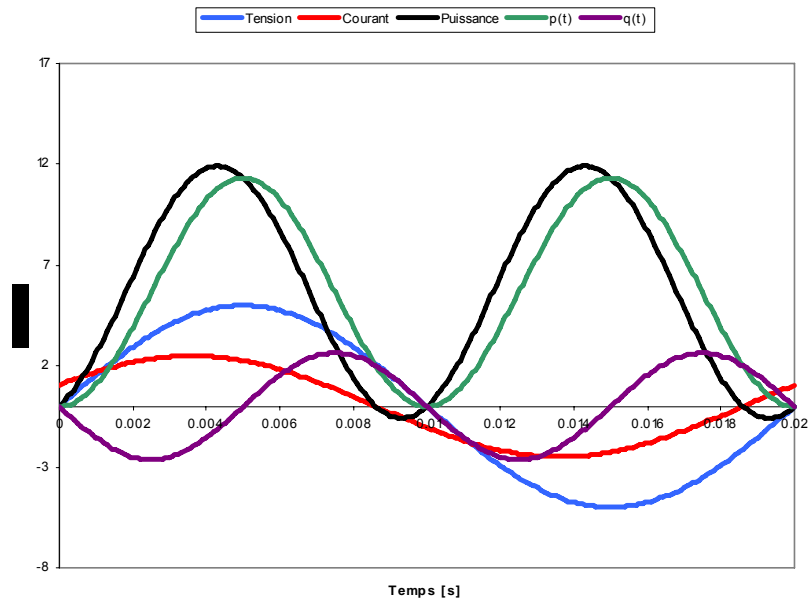


Figure 12 : Allure des signaux pour une charge mixte



## 1.5. Structures hydrauliques

### 1.5.1. Introduction

Une petite centrale hydroélectrique (PCH) est constituée d'un certain nombre d'ouvrages hydrauliques, mécaniques et électriques, dont la conception va dépendre du type d'aménagement et des conditions locales. Ces composants sont amenés à fonctionner ensemble. La régulation et les appareils de surveillance coordonnent et contrôlent le fonctionnement des différents organes de la petite centrale et assurent la sécurité des installations en même temps qu'une production d'énergie fiable.

Chaque turbine est conçue pour une chute nette et un débit, ce qui la rend unique.

Durant ce chapitre, les principaux composants que l'on retrouve à la Figure 13 seront décrits.

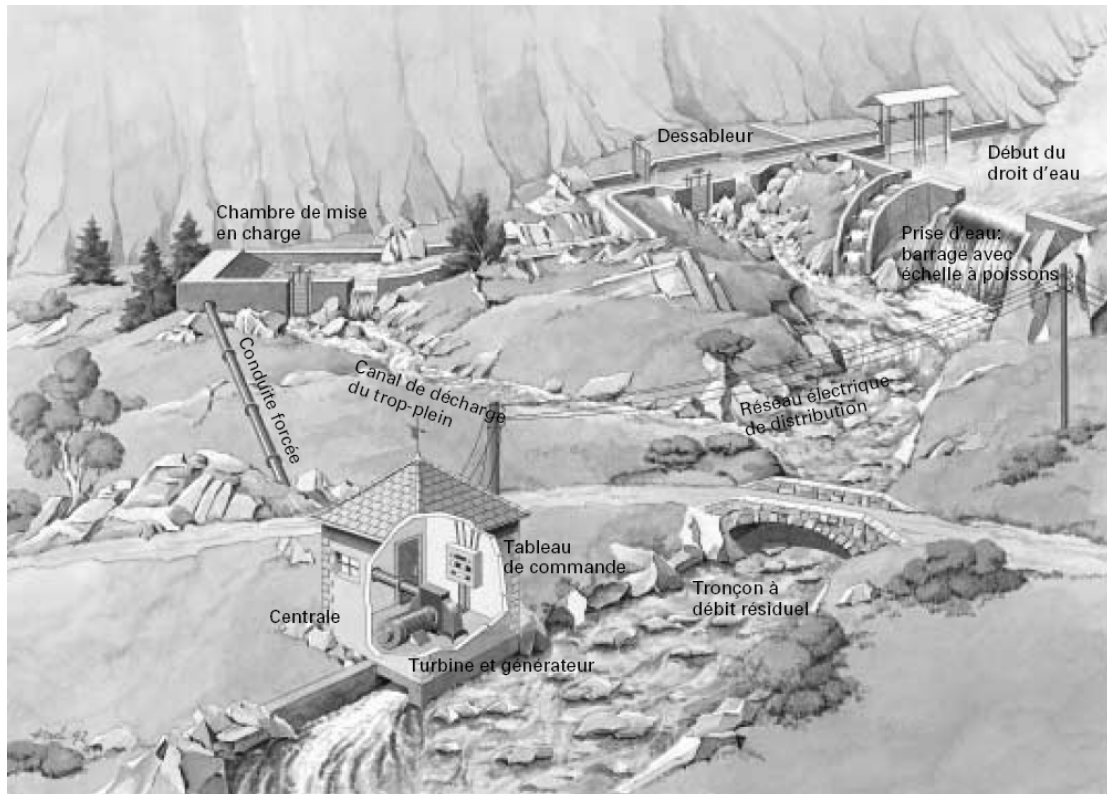


Figure 13 : Vue d'ensemble d'une centrale à haute pression

### 1.5.2. Composants de l'aménagement

La figure ci-dessus présente un aménagement des plus complets. Dans la réalité, il est assez rare de trouver tous les éléments décrits ci-dessus. De nos jours, le turbinage ne concerne plus uniquement les rivières mais aussi les réseaux d'eau potable et d'eaux usées. Cependant, quelque soit son implantation, on retrouve dans toutes les installations une chambre de mise en charge, une conduite forcée et une centrale avec tout son équipement électrique.

Voici une brève présentation de tous ces éléments :

#### La prise d'eau

La prise d'eau est en général constituée d'un barrage qui permet de maintenir un niveau d'eau minimum. Celui-ci est complété par une échelle à poisson permettant le passage de la faune aquatique. La fonction de l'ensemble est de permettre la dérivation du débit, dont le prélèvement est autorisé par le droit d'eau. La prise est en général protégée des gros débris flottants par une grille. Il existe plusieurs types de prise d'eau comme la prise d'eau tyrolienne, la prise d'eau latérale et celle présentée ici, la prise d'eau par en-dessous.

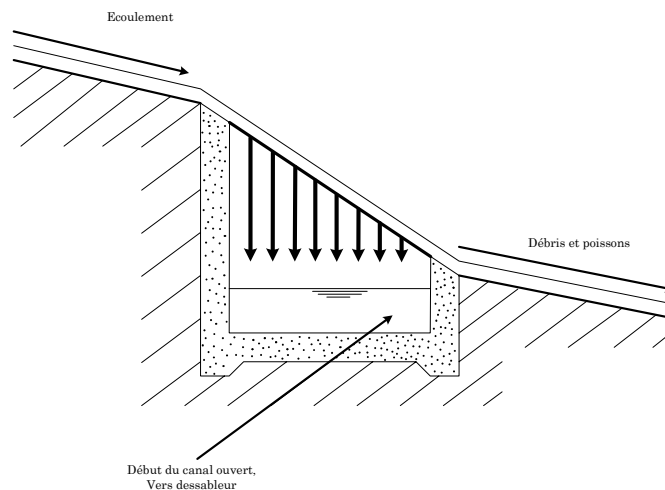


Figure 14 : Exemple de prise d'eau par en-dessous

#### Le dessableur

L'eau déviée dans le canal par la prise peut transporter des quantités importantes de matières en suspension (boues) et de sédiments (sable, gravier) qui doivent être éliminés, sans quoi, ils encombreraient le canal et endommageraient rapidement les vannes et la turbine. Le dessableur est un bassin plus large que le canal qui permet de ralentir l'écoulement et de laisser ainsi les particules solides s'y déposer.

## Travail de diplôme

### Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

#### La chambre de mise en charge

C'est un petit bassin qui permet de garantir que la conduite forcée est en tout temps en eau. Elle fonctionne comme tampon entre la prise d'eau et la conduite. En général, le contrôle du niveau utile à la régulation du débit de la turbine se situe sur la chambre de mise en charge.

Ce bassin est également muni d'une grille qui retient les différents débris. Dans la perspective de rendre l'installation plus autonome, certains aménagements sont pourvus d'un dégrilleur qui débarrasse automatiquement la grille de ses débris.

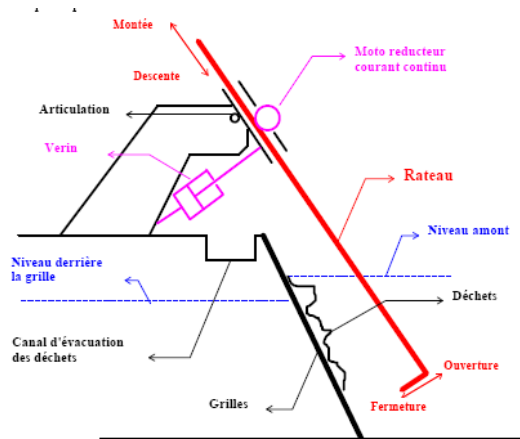


Figure 15 : Schéma de principe d'un dégrilleur

#### La conduite forcée

Réalisée en matière synthétique pour les faibles chutes, en métal pour les hautes pressions ou en inox pour l'eau potable, la conduite a pour but d'acheminer l'eau, en écoulement forcé, de la chambre de mise en charge à la centrale. Elle doit faire l'objet d'un dimensionnement particulièrement rigoureux afin d'éviter une perte de charge incompatible avec le turbinage optimal.

#### La centrale

De taille réduite, la centrale regroupe l'ensemble des équipements électromécaniques de l'installation, à savoir:

- La vanne de garde à l'entrée de la centrale
- La turbine
- L'alternateur
- Le transformateur éventuel
- La connexion au réseau électrique
- Les organes de contrôle et de commande de l'installation

## 1.6. Le générateur

### 1.6.1. Introduction

Un générateur électromécanique convertit l'énergie mécanique qu'il reçoit à son arbre, par une turbine, en énergie électrique. Cette énergie, qualifiée d'active, est distribuée au consommateur.

Le consommateur peut être :

- le réseau interconnecté (parallèle) qui fixe la tension et la fréquence ;
- un réseau isolé (îlot) auquel le producteur doit garantir une tension fixe et une fréquence stable

Dans les installations de production d'énergie électrique de petite dimension, il y a lieu de choisir entre deux types de générateurs :

- le générateur synchrone
- le générateur asynchrone

Ils peuvent être dotés d'un axe vertical ou horizontal. Voici une brève comparaison des deux types de montage (extrait tiré d'un document de la maison MhyLab):

Tableau 1 : Comparaison axe vertical-horizontal

Sujet	Axe vertical	Axe horizontal
Assemblage alternateur turbine	L'alternateur repose sur le bâti de la turbine. Il n'y a pas de plaque de base et la roue est toujours en porte à faux sur l'arbre de l'alternateur. Tous problèmes d'alignement roue injecteur sont évités.	L'alternateur et la turbine doivent obligatoirement reposer sur un bâti (ou une plaque de base) rigide. Il s'agit là d'un élément supplémentaire nécessitant des pièces d'assemblage supplémentaires. Cette conception présente des risques de désalignement au moment du bétonnage, problème hélas souvent constaté. Suivant la conception retenue, la turbine possède ses propres paliers, ce qui a également pour effet de compliquer l'alignement et de multiplier les pièces d'usure.
Ecoulements dans le bâti	L'eau s'échappant des augets s'écoule naturellement vers le bas pour le demi-auget inférieur. Pour le demi-auget supérieur, le renvoi circulaire et central oriente l'écoulement en périphérie du bâti de telle sorte que tout risque de rejaillissement sur la roue ou les jets peut être écarté.	Le risque de rejaillissement sur la roue et sur les jets est élevé, surtout sur les turbines à deux injecteurs ou le prolongement de la trajectoire des jets est convergent. Plusieurs centrales hydrauliques Pelton à axe horizontal démontrent malheureusement cette difficulté. Le phénomène de rejaillissement est très difficile à prévoir et compliqué à résoudre. Le renvoi d'eau est de géométrie compliquée. Ceci est d'autant plus vrai pour les petites turbines où l'on est appelé à simplifier les formes de bâti.
Effort radial sur la roue	Pour les turbines à nombre de jets pair, l'effort sur la roue est annulé lorsque les injecteurs en fonction se font face. C'est le cas pour une turbine à deux injecteurs.	L'effort radial sur la roue n'est jamais nul. Dans le cas d'un fonctionnement à deux injecteurs, les deux composantes s'additionnent géométriquement.
Joint d'arbre	Le joint d'arbre est très simplifié (anneau centrifuge).	Le joint d'arbre nécessite d'avoir une chambre avec décharge.
Etanchéité du bâti	Nombre de joints limité.	Nombre de joints élevé (calotte, coupe du bâti par l'axe)
Porte à faux de la roue	De manière générale, le porte à faux est réduit.	De manière générale, la porte à faux (dans les solutions sans paliers turbine) est important.

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

Déflexion	Aucune sollicitation mécanique due à l'interaction entre les jets en cas de déflexion.	Sollicitations mécaniques importantes dues à l'action du jet supérieur sur l'injecteur inférieur en cas de déflexion.
Pertes par ventilation de la roue	Turbine à un injecteur : pertes plus élevées que dans une variante à axe horizontal. Turbine à deux injecteurs : Pertes comparables.	Turbine à un injecteur : pertes moins élevées que dans une variante à axe vertical. Turbine à deux injecteurs : Pertes comparables.
Visite périodique de l'état de la machine	L'inspection périodique de la roue, des injecteurs et des déflecteurs peut s'effectuer en un seul coup d'œil, aucun élément n'en cachant un autre. (visite par-dessous)	L'inspection périodique de la roue, des injecteurs et des déflecteurs nécessite un démontage du capot pour accéder à l'injecteur supérieur et une visite par dessous pour accéder à l'injecteur inférieur, la roue les cachant à tour de rôle suivant le point de vue.

### 1.6.2. Machine synchrone

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors alternateur. Mis à part pour la réalisation d'un groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée.

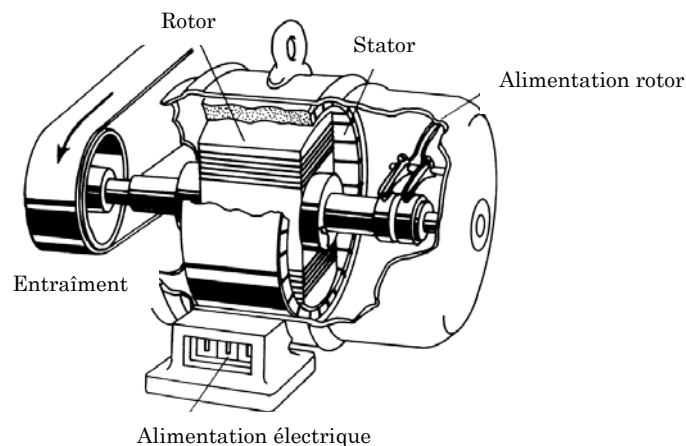


Figure 16 : Machine synchrone

Une machine synchrone est constituée de deux éléments principaux: le rotor (inducteur) parcouru par un courant continu ou muni d'aimants permanents, et le stator (induit) parcouru par des courants alternatifs.

Le stator triphasé est composé de trois groupes de conducteurs, logés dans des encoches. Afin de former trois enroulements identiques, un par phase, et décalés d'un angle électrique de  $120^\circ$ . Ils créent un champ tournant excitateur.

Le rotor a pour rôle de créer un champ magnétique tournant, nécessaire à engendrer la tension induite alternative aux bornes du stator. Les rotors avec bobinage d'excitation permettent de faire varier le flux magnétique (tension induite) à l'aide d'un courant continu injecté dans la bobine, c'est le courant d'excitation.

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

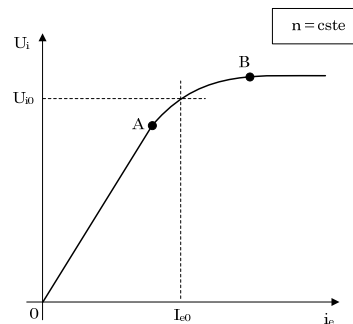


Figure 17 : Caractéristique à vide

En fonctionnement générateur, la fréquence électrique est imposée par la vitesse de rotation de la machine synchrone. De même, en moteur, la fréquence de rotation est rigoureusement imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente le stator. Cette propriété justifie la dénomination de synchrone.

La fréquence  $f$  délivrée par le générateur synchrone est directement proportionnelle à la vitesse de rotation  $n$  de son stator.

$$f = p \cdot n$$

Où  $p$  est le nombre de paire de pôles, et  $n$  le facteur de proportionnalité.

Quelques valeurs pour 50 Hz :

Tableau 2 : Valeurs de vitesse en fonction des paires de poles

Nombre de paires de pôles $2p$	Vitesse $n$ [tr/min]
2	3000
4	1500
6	1000
8	750
10	600
12	500

La puissance absorbée par le générateur synchrone est la puissance mécanique à l'arbre. La puissance active  $P_{\text{utile}}$  fournie au réseau ou aux consommateurs se calcule par :

$$P_{\text{utile}} = 3 \cdot U_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \varphi$$

$$P_{\text{utile}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \cos \varphi$$

Le rendement est le rapport entre la puissance fournie et absorbée.

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{utile}} + \sum P_{\text{pertes}}}$$

### 1.6.3. Machine asynchrone

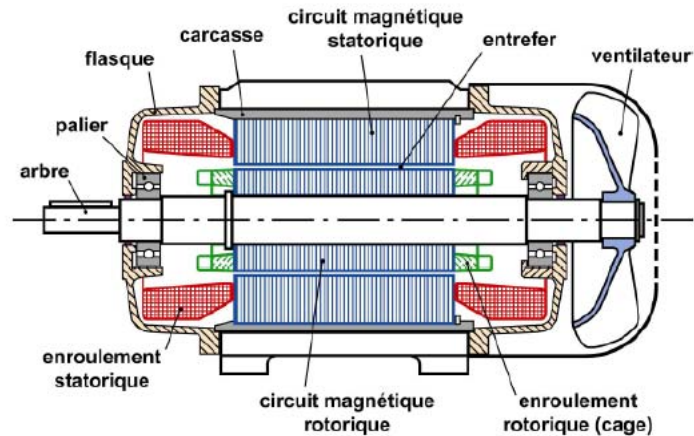


Figure 18 : Moteur asynchrone

La machine asynchrone, appelée aussi machine à induction, peut, comme toutes les machines électriques, fonctionner aussi bien en génératrice qu'en moteur. La machine asynchrone est la machine la plus répandue, parce qu'elle est simple, de construction robuste, et d'un prix de revient relativement modeste. Ces avantages sont surtout dus au fait que le rotor n'est branché sur aucune source extérieure de tension, sauf utilisation particulière avec un rotor bobiné.

La machine asynchrone est aussi constituée d'un rotor et d'un stator mais ceux-ci ont la particularité d'être fabriqués de fines tôles magnétiques empilées dans le but de réduire les pertes fer dues champs magnétique alternatif.

Le stator est identique à celui de la machine synchrone. Le rotor, lui, comporte un bobinage en court-circuit ou un cylindre massif en matériau conducteur. Dans les deux cas, le bobinage rotorique forme un circuit fermé sur lui-même.

Dans une machine asynchrone, un champ tourne dans l'entrefer à une vitesse angulaire  $\Omega_s$ . En régime moteur, le rotor tourne à une vitesse angulaire de  $\Omega$  inférieur à  $\Omega_s$ . Les conducteurs du stator sont alors soumis à un champ magnétique variable de vitesse  $\Omega_s - \Omega$ . Il en résulte une tension induite dans les conducteurs.

$$\omega_r = p \cdot (\Omega_s - \Omega) = p \cdot s \cdot \Omega_s = s \cdot \omega$$

$$s = \left( \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \right) = \left( \frac{n_s - n}{n_s} \right)$$

$s$  est appelé glissement est n'a pas d'unité, il peut s'exprimer en [%].

En générateur, le glissement est négatif ( $n > n_s$ ), le rotor est en avance par rapport au champ tournant statorique.

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

La puissance active absorbée par un moteur ou fournie par une génératrice, peut s'exprimer par :

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

La puissance mécanique utile à l'arbre d'un moteur est calculée en fonction du couple utile et de la vitesse angulaire du rotor [rad/s].

$$P_u = M_u \cdot \Omega \quad [\text{W}]$$

Le rapport entre ces deux puissances nous donne le rendement en moteur :  $\eta = \frac{P_u}{P}$

La machine asynchrone peut fonctionner en générateur selon certaines conditions :

- elle doit être entraînée à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone ; ainsi le glissement est négatif. Pour fonctionner en génératrice, la puissance électrique fournie correspondra environ à la puissance mécanique nominale en moteur. Le glissement sera proche, au signe près, du glissement nominal pouvant être déterminé grâce à la vitesse indiquée sur la plaque signalétique.
- la machine asynchrone consomme toujours de la puissance réactive, aussi bien en moteur qu'en générateur du fait que l'enroulement statorique est toujours l'enroulement excitateur. Cette puissance réactive sera fournie par le réseau ou par une batterie de condensateurs.

En régime générateur, la puissance réactive est supérieure à celle consommée. D'où :

$$\cos \varphi_{\text{Gen.}} < \cos \varphi_{\text{mot.}}$$

Ce qui implique que le rendement est plus faible en génératrice qu'en moteur.



## 1.7. Composants et paramètres surveillés de l'aménagement

La Figure 19 présente les composants d'une petite centrale hydraulique avec conduite forcée.

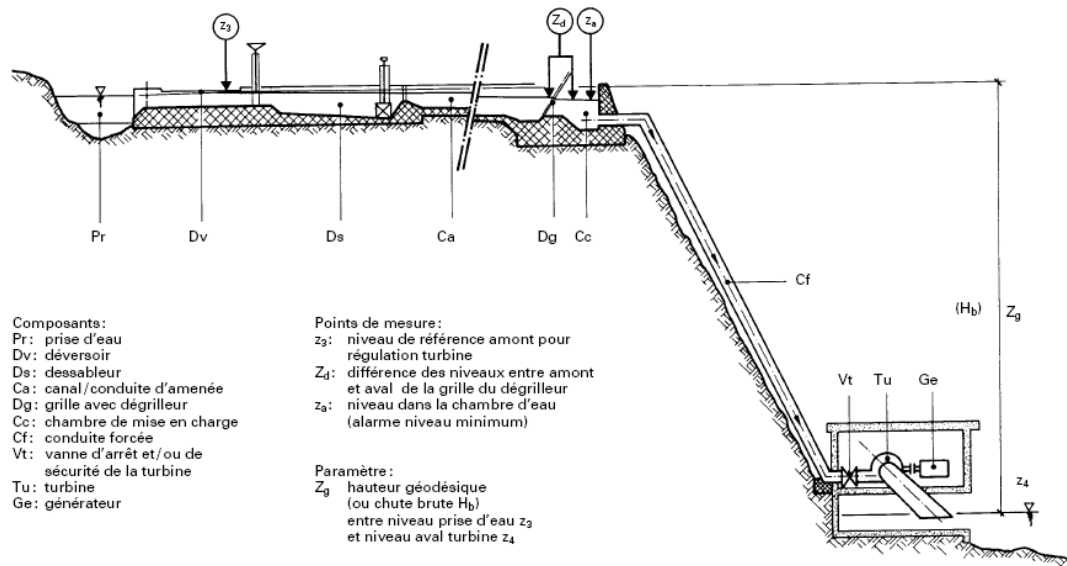


Figure 19 : Composants principaux d'une PCH et points de mesure de niveau

Les paramètres importants à surveiller, sans tenir compte de ceux qui concernent spécifiquement la vanne de sécurité, la turbine et le générateur, sont essentiellement des *niveaux*. En effet, il est important que, lors du fonctionnement, les ouvrages mouillés (prise d'eau, canal, conduite, turbines) restent en permanence en eau.

Lorsque le niveau s'abaisse trop dans la chambre de mise en charge, il en résulte une aspiration d'air dans la conduite forcée jusque dans la turbine, avec des perturbations qui peuvent endommager l'installation : chocs, vibrations, coups de bélier, interruption de l'exploitation.

Les niveaux qui sont généralement surveillés sont les suivants :

- le niveau amont de l'aménagement
- le niveau différentiel à la grille du dégrilleur
- le niveau bas d'alarme

Ceux-ci sont détaillés ci-dessous:

### 1.7.1. Le niveau amont de l'aménagement

Mesuré à proximité du déversoir du 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. Ce niveau est le plus souvent gardé constant par la régulation automatique de l'ouverture de la turbine.

Cependant, il existe deux cas particuliers :

- pour les turbines à débit fixe (pompe inversée), ce niveau peut varier entre deux valeurs limites, la turbine étant arrêtée au niveau inférieur et enclenchée au niveau supérieur ;
- si l'ouverture de la turbine est réglée manuellement, il faudra veiller à ce qu'il y ait toujours un certain débordement au déversoir du trop-plein afin d'éviter un abaissement du niveau.

La chute brute  $H_b$  est définie par  $H_b = z_3 - z_4$  où le niveau  $z_4$  (niveau du plan d'eau aval) est imposé par les conditions du site.

### 1.7.2. Le niveau différentiel à la grille du dégrilleur

En cas de fonctionnement automatique du dégrilleur, deux sondes mesurent la différence de niveau entre l'amont et l'aval de la grille. Si la grille est encombrée par des débris, sa section libre diminue, et cela produit une augmentation des pertes de charge et de la différence de niveau  $Z_d$ .

Lorsque cette différence atteint une certaine valeur, les sondes donnent un signal qui commande la mise en marche du dégrilleur. Ce dernier est arrêté, soit par minuterie, soit quand la différence de niveau est devenue normale.

### 1.7.3. Le niveau bas d'alarme

En cas de défaillance de la régulation du niveau  $Z_3$ , le plan d'eau peut s'abaisser accidentellement dans la chambre de mise en charge. Pour éviter l'entrée d'air dans la conduite, une sonde de mesure est chargée de détecter le niveau dans la chambre de mise en charge. Si ce niveau 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.

## 1.8. Paramètres de réglage de la turbine

Les seuls paramètres qui doivent être réglés pour qu'une petite centrale hydroélectrique fonctionne correctement sont le débit et la vitesse de rotation.

### 1.8.1. Le débit $Q$

Comme cité au paragraphe 1.7.1, le niveau amont  $z_3$  doit être maintenant au-dessus d'une cote minimale. Ceci signifie que le débit de la turbine ne doit pas dépasser, en moyenne, le débit capté à la prise d'eau.

L'ouverture du pointeau de la turbine doit donc être réglée en fonction de l'eau à disposition, et ne pas dépasser, en moyenne, celle correspondant au débit disponible.

C'est donc le débit capté à la prise d'eau qui détermine l'ouverture moyenne maximale de l'organe de réglage du débit de la turbine.

Cependant, la turbine peut temporairement absorber des débits supérieurs au débit moyen, en fonction du volume d'eau accumulé entre le captage et la chambre de mise en charge.

Donc toutes les turbines disposent d'un régulateur ou d'un dispositif (mécanique, hydraulique ou humain) qui limite l'ouverture. Ceci permet de maintenir le niveau amont au-dessus ou à la cote de référence  $z_3$ .

Le principe de fonctionnement d'un régulateur niveau-débit est le suivant :

- si le niveau d'eau est trop bas, le régulateur ferme la vanne (diminution du débit);
- si le niveau d'eau est plus haut que le niveau de référence, le régulateur ouvre la vanne (augmentation du débit).

### 1.8.2. La vitesse de rotation $\omega$ ou $n$

Les machines entraînées par une turbine sont conçues pour fonctionner à vitesse constante, en particulier les générateurs d'électricité. La fréquence du courant alternatif produit, qui est proportionnel à la vitesse de rotation de la turbine, doit être absolument maintenue à une valeur fixe de 50 Hz (ou 60 Hz pour certains pays) pour répondre aux exigences des appareils consommateurs.

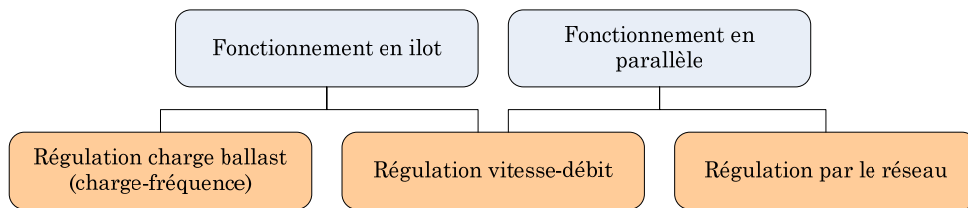
Le réglage de la vitesse peut être réalisé en agissant sur l'ouverture de la turbine :

- si la puissance consommée baisse, le générateur produit trop et la vitesse augmente. Le régulateur diminue le débit pour réduire la vitesse
- si la puissance consommée augmente, le générateur ne produit plus assez et la vitesse diminue. Le régulateur augmente le débit afin de ramener la vitesse à sa valeur de consigne.

## 2. Modes de fonctionnement et de régulation

### 2.1. Introduction

Mis à part les deux types de générateurs cités ci-dessus, il existe deux modes de fonctionnement et trois modes de régulation. Les combinaisons sont les suivantes :



### 2.2. Fonctionnement en réseau interconnecté (Parallèle)

On entend par réseau interconnecté, le réseau principal où la tension  $U$  et la fréquence  $f$  sont rigides, c'est-à-dire que leur valeur ne varie pratiquement pas en fonction de la charge. Dans ce mode de fonctionnement, les paramètres à régler sont les puissances actives et réactives puis le  $\cos \varphi$ . Dans ce mode de fonctionnement on peut trouver des générateurs synchrones et asynchrones.

Dans ce chapitre, les deux types de génératrices, synchrone et asynchrone, sont traités du point de vue de leurs caractéristiques et du réglage des puissances active et réactive.

#### 2.2.1. Réglage de la puissance active $P$

Pour les deux types de machine, la puissance active fournie par la génératrice est en fonction du débit d'eau à disposition. Il faut donc prévoir un régulateur qui agit sur le débit, par exemple grâce au pointeau d'une turbine Pelton. Le régulateur de la turbine a également pour fonction de maintenir un niveau d'eau constant, à la prise d'eau, afin d'assurer la mise sous pression de l'installation.

Si les puissances nominales de la turbine et de la génératrice ne correspondent pas tout à fait, la puissance active, donc le débit, doit être limitée de façon à ce que le courant nominal de la génératrice ne soit pas dépassé. C'est-à-dire qu'il faut prévoir une limitation de l'ouverture de la turbine.

Pour les génératrices asynchrone et synchrone, si le débit d'eau est trop faible, la machine peut fonctionner en moteur et absorber de la puissance au réseau. Dans ce cas, la génératrice doit être déconnectée du réseau.

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

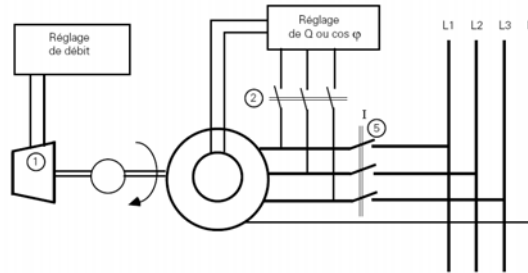
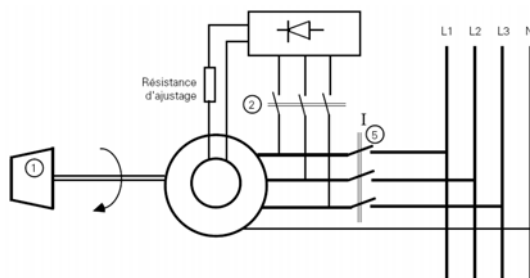


Figure 20 : Schéma d'une installation (machine synchrone) avec réglage de  $Q$  et  $I_{exc}$



Avec comme indices :

- 1. Turbine
- 2. Contacteur d'alimentation de l'excitation
- 5. Disjoncteur de connexion au réseau

Figure 21 : Schéma sans régulation de débit à  $I_{exc} = cte$  (machine synchrone)

### 2.2.2. Réglage de la puissance réactive et du $\cos \varphi$

La puissance réactive est nécessaire aux consommateurs qui possèdent des moteurs à courant alternatif.

#### a) Machines synchrones

Le réglage de la puissance réactive est réalisé au moyen du réglage du courant d'excitation. Pour augmenter la puissance réactive fournie au réseau (inductif  $\varphi > 0$ ), il s'agit d'augmenter le courant d'excitation par rapport au fonctionnement à vide. Si l'on diminue le courant d'excitation par rapport au fonctionnement à vide, la machine absorbe de l'énergie réactive (réseau capacitif  $\varphi < 0$ ).

Dans tous les cas, il faut surveiller le courant du stator pour qu'il ne dépasse pas le courant nominal.

En cas de coupure du réseau par défaut, le système d'excitation doit également être déconnecté.

#### b) Machines asynchrones

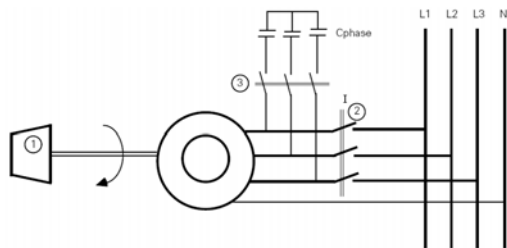
La machine asynchrone absorbe toujours de la puissance réactive, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice. L'amplitude de cette puissance réactive varie avec la charge. Si la valeur du  $\cos \varphi$  doit être corrigée, il sera nécessaire d'installer des condensateurs sur les phases afin de la ramener à une valeur proche de 0.9.

Le  $\cos \varphi$  peut être estimé, pour les petites machines, grâce à cette formule :

**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

$$\cos\varphi = \frac{P_{\text{mec } n}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne } n} \cdot I_{\text{ligne } n}}$$

En cas de coupure du réseau par défaut, les condensateurs doivent également être déclenchés.



Avec comme indices :

- 1. Turbine
- 2. Disjoncteur de connexion au réseau
- 3. Contacteur d'alimentation de l'excitation

Figure 22 : Schéma sans réglage de débit avec compensation d'une machine synchrone

### 2.2.1. Caractéristiques de fonctionnement sous $U = \text{cte}$ et $f = \text{cte}$

#### a) Machine synchrone

Les caractéristiques les plus intéressantes pour l'exploitant sont, en cas de fonctionnement à tension et fréquence constantes, sont les courbes en « V » représentant la variation du courant d'excitation pour différentes valeurs de puissance active à débit variable (Figure 23) :

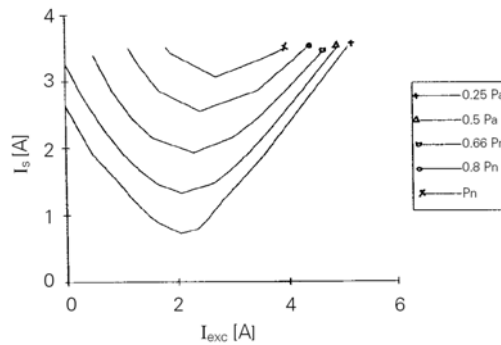


Figure 23 : Courbe en "V" d'une machine synchrone de 2,3 kVA - 3 x 380V - 50 Hz

Les caractéristiques de réglage représentant la variation du courant d'excitation en fonction du courant statorique, pour différentes valeurs du facteur de puissance  $\cos \varphi$ . Voici un exemple :

**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

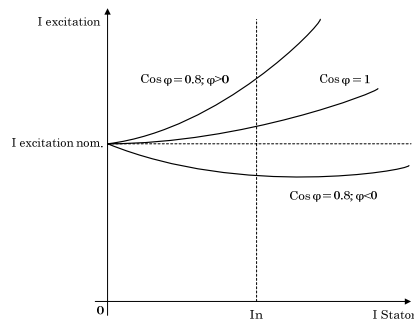


Figure 24 : Caractéristiques de réglage

**b) Machines asynchrones**

- Variation de la vitesse en fonction du couple mécanique. Cependant, une représentation avec la puissance utile est préférable dans le cas du fonctionnement en génératrice.

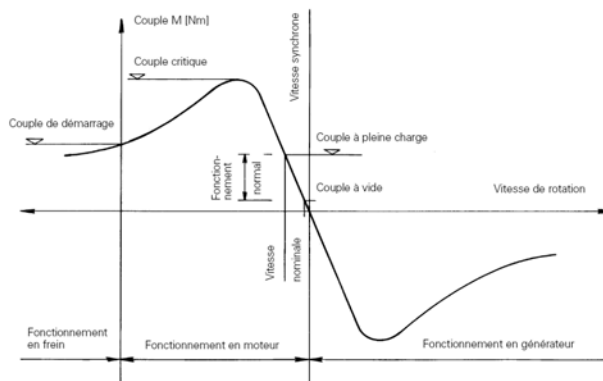


Figure 25 : Les domaines de fonctionnement de la machine asynchrone

En fonctionnement normal, le moteur travaille dans la partie linéaire de la courbe.

Voici la variation du courant, du facteur de puissance et du rendement en fonction de la puissance fournie.

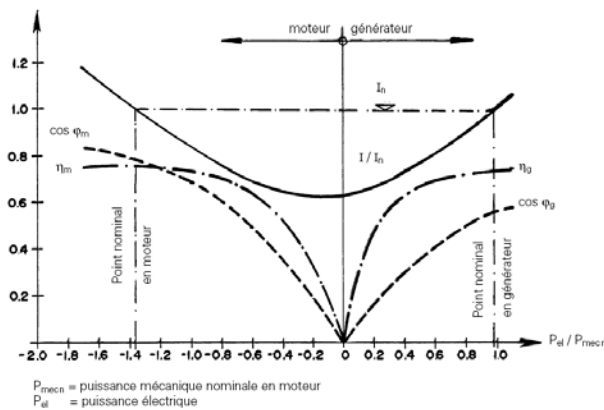


Figure 26 : Caractéristiques d'une machine asynchrone

## 2.3. Fonctionnement en réseau isolé

On appelle réseau isolé, le cas d'une station de production qui fournit de l'énergie électrique à un ou plusieurs consommateurs ; la centrale peut comporter plusieurs générateurs.

Dans le cas d'un réseau isolé, les tensions et fréquences délivrées varient en fonction de la charge.

$$U \neq \text{cte} \text{ et } f \neq \text{cte}$$

Les paramètres à régler dans cette configuration sont la fréquence du courant avec la vitesse de rotation de la turbine et la tension aux bornes du générateur par le courant d'excitation dans le cas d'un générateur synchrone.

En réseau isolé, il est à préciser que les machines asynchrones ne sont pas utilisées. En effet, la régulation est beaucoup plus difficile et plus coûteuse car elle demande une électronique de puissance sophistiquée. Cependant, la régulation est quand même traitée dans ce chapitre

### 2.3.1. Réglage de la fréquence

Afin de réguler la fréquence, il faut prendre un point de mesure qui a pour consigne, la fréquence nominale. La fréquence peut se mesurer par la fréquence de la tension de l'alternateur ou par une machine auxiliaire donnant une tension proportionnelle à la vitesse de rotation. Cette dernière méthode ne pouvant être utilisée que pour les machines synchrones.

Pour les deux types de machine, le réglage de la fréquence, c'est-à-dire de la vitesse de rotation, se fait par le réglage du débit d'eau dans la turbine en fonction de la charge.

Dans le cas où le débit n'est pas réglé, il faut alors prévoir une charge ballast.

#### a) Machine synchrone

Maintenir la vitesse constante égale à la vitesse synchrone.

#### b) Machine asynchrone

Il s'agit de faire varier la vitesse au-dessus de la vitesse de synchronisme. En pratique, nous pouvons obtenir une fréquence constante à plus ou moins 5% par le maintien d'une tension constante.



### 2.3.2. Réglage de la tension

La valeur à mesurer est la tension aux bornes des consommateurs, avec pour consigne la tension nominale. Cela est fait par le réglage du courant d'excitation par l'intermédiaire d'un régulateur de tension.

#### a) Machine synchrone

Si l'alternateur est entraîné à vitesse constante et qu'il alimente une charge en îlot les caractéristiques obtenues montrent que la tension varie beaucoup en fonction du courant débité et en fonction du déphasage imposé par la charge. Ces caractéristiques sont qualifiées d'externes (Figure 27).

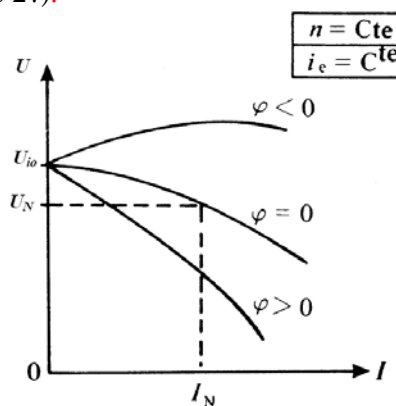


Figure 27 : Caractéristiques externes à  $I_{exc}$  constant pour différents  $\cos \varphi$

Pour différents courants d'excitation, la Figure 28 représente la variation de  $U(I_s)$  à  $f = cte$  et à  $\cos \varphi = 1$

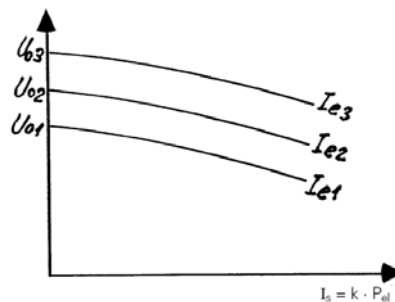


Figure 28 : Caractéristiques d'une génératrice synchrone en réseau isolé

La vitesse en fonction de la charge dépend de la caractéristique de la turbine.

Ainsi, pour avoir une tension fixe, il faudra régler le courant d'excitation du générateur. Et pour adapter la fréquence, il faudra régler le débit d'eau dans la turbine. Ces fonctions sont remplies par un organe de régulation.

**b) Machine asynchrone**

Cette régulation devrait se faire en variant les condensateurs d'excitation en fonction de la charge. Cependant, ceci n'étant pas réalisable à de faibles coûts, il faut choisir une capacité moyenne de manière à ce que les variations de tension ne dépassent pas les limites de  $\pm 10\%$ .

Voici la caractéristique de la tension en fonction de la charge ou du courant du stator pour une fréquence constante et pour différentes valeurs de capacité (Figure 29)

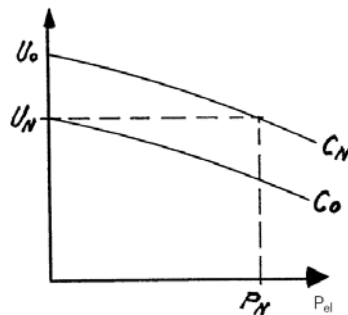


Figure 29 : Caractéristiques d'une génératrice asynchrone en réseau isolé

La variation de  $U(P)$  pour deux condensateurs de capacité  $C_0$  et  $C_N$ .

A titre d'exemple, la Figure 30 montre les caractéristiques  $U(P)$  et  $I(P)$ , mesurées à fréquence constante, pour une machine de 3 kW.

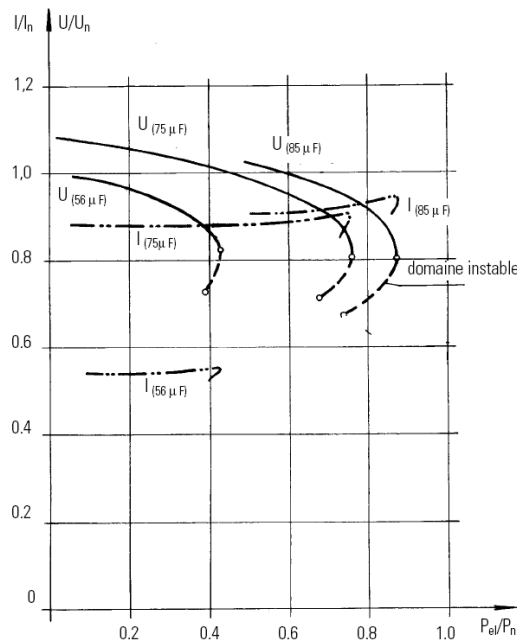


Figure 30 : Variation de  $U(P)$  et  $I(P)$

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

La Figure 31 montre la forme d' $U(P)$  à débit constant avec une caractéristique de turbine déterminée.

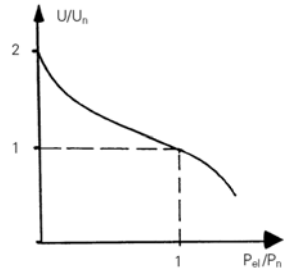


Figure 31 : Variation de  $U(P)$

### 2.3.3. Charge ballast

Dans le cas où le débit d'eau n'est pas réglé, il faut prévoir une charge ballast correspondant à la puissance électrique nominale. La résistance ballast est connectée en parallèle avec le consommateur.

La puissance totale fournie par la génératrice est :  $P_{eln} = P_{ballast} + P_{consommateur}$

Cette puissance ne doit pas dépasser la puissance nominale de la génératrice.

- Si  $P_{consommateur} = 0$ , alors :  $P_{ballast} = P_{eln}$
- Si  $P_{consommateur} = P_{eln}$ , alors :  $P_{ballast} = 0$
- Si  $P_{consommateur} > P_{eln}$ , alors : Il faut déclencher le groupe

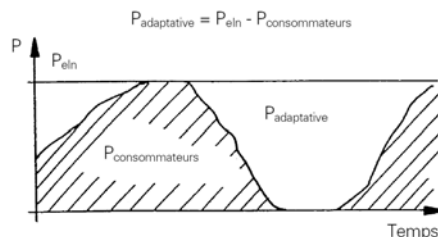


Figure 32 : Principe de la charge ballast

Si la fréquence ou la tension baissent, c'est que la puissance demandée par les consommateurs est plus élevée que la puissance nominale. Il faut alors diminuer la charge ballast. Il faut donc prévoir un régulateur de la charge ballast qui surveille la fréquence ou la tension aux bornes du consommateur.

Pour autant que le  $\cos \varphi$  de la charge ne varie pas, ce système permet d'éviter, pour la génératrice synchrone, un régulateur de tension. Pour la génératrice asynchrone, il permet d'éviter réglage de capacités.

## 2.4. Les modes de régulation des turbine

Il existe trois façons de maintenir la vitesse de rotation d'une turbine constante.

- Au moyen du réseau électrique
- Au moyen d'un régulateur électronique à charge ballast
- Au moyen d'un régulateur vitesse-débit

### 2.4.1. Au moyen du réseau électrique

Lorsqu'une petite centrale fonctionne en parallèle sur le réseau électrique (Figure 32), c'est ce dernier qui fixe la fréquence du courant produit par le générateur, et donc la vitesse de rotation de la turbine.

Dans ce cas, le régulateur de niveau adapte l'ouverture de la turbine afin de maintenir le niveau amont constant. La totalité de l'eau captée passe à travers la turbine, ce qui permet une valorisation optimale du potentiel hydraulique du site.

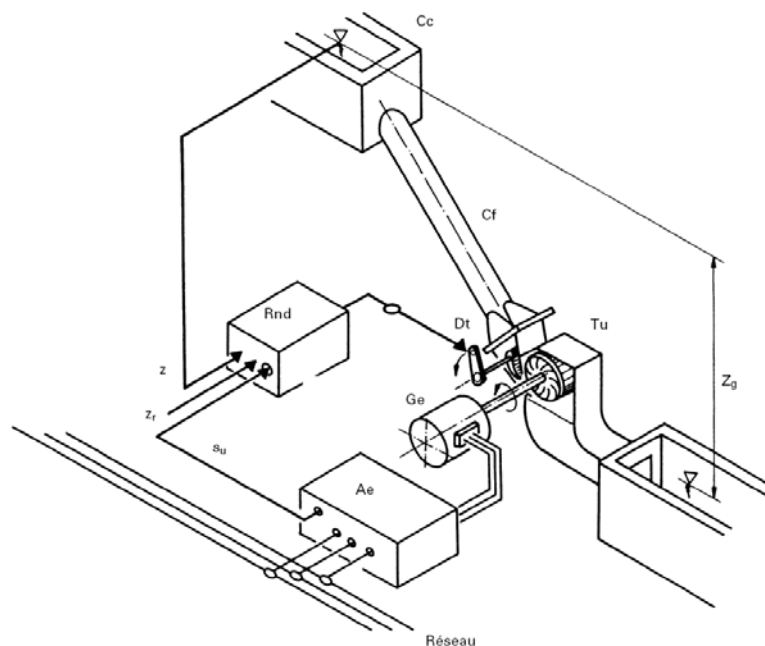


Figure 33 : PCH en parallèle sur le réseau avec régulation niveau-débit

Cc	: chambre de mise en charge
Cf	: conduite forcée
Tu	: turbine
Dt	: distributeur turbine
Ge	: générateur
Ae	: armoire électrique
Rnd	: régulateur niveau débit
z	: niveau mesuré
z <sub>r</sub>	: niveau de référence (consigne)
s <sub>u</sub>	: signal d'arrêt d'urgence
Z <sub>g</sub>	: hauteur géodésique

### 2.4.2. Au moyen d'un régulateur électronique à charge ballast

Dans ce cas de fonctionnement hors réseau (îlotage), la turbine travaille à un débit fixe donc à une puissance fixe, selon l'eau disponible. Un régulateur dit « charge-fréquence » règle la fréquence en répartissant l'énergie produite par la turbine entre le consommateur et une résistance ballast qui détruit le surplus d'énergie.

Si la consommation diminue, la turbine produit trop, et sa vitesse augmente. Le régulateur électronique rétablit la fréquence en dérivant un peu plus d'énergie vers la résistance ballast.

Si la consommation augmente, la fréquence baisse et le régulateur va diminuer la charge sur la résistance et libérer le supplément de la puissance demandée par le consommateur.

Le régulateur de niveau adapte l'ouverture de la turbine pour maintenir le niveau amont constant. La puissance à disposition du consommateur variera en fonction du débit capté par la prise d'eau.

Ce type de régulation est actuellement le plus répandu dans les petites centrales fonctionnant en îlot, ceci jusqu'à des puissances de l'ordre de 100 – 150 kW et lorsque la quantité d'eau disponible est en tout temps supérieure à la quantité d'eau requise par l'installation.

Ce régulateur a pour avantage de corriger rapidement la fréquence en cas de fluctuation brusque de consommation, grâce à l'électronique, sans devoir modifier le débit turbiné. Le débit, comme dans le cas du fonctionnement en parallèle sur le réseau, ne sera ajusté que pour le maintien du plan d'eau amont et variera donc lentement.

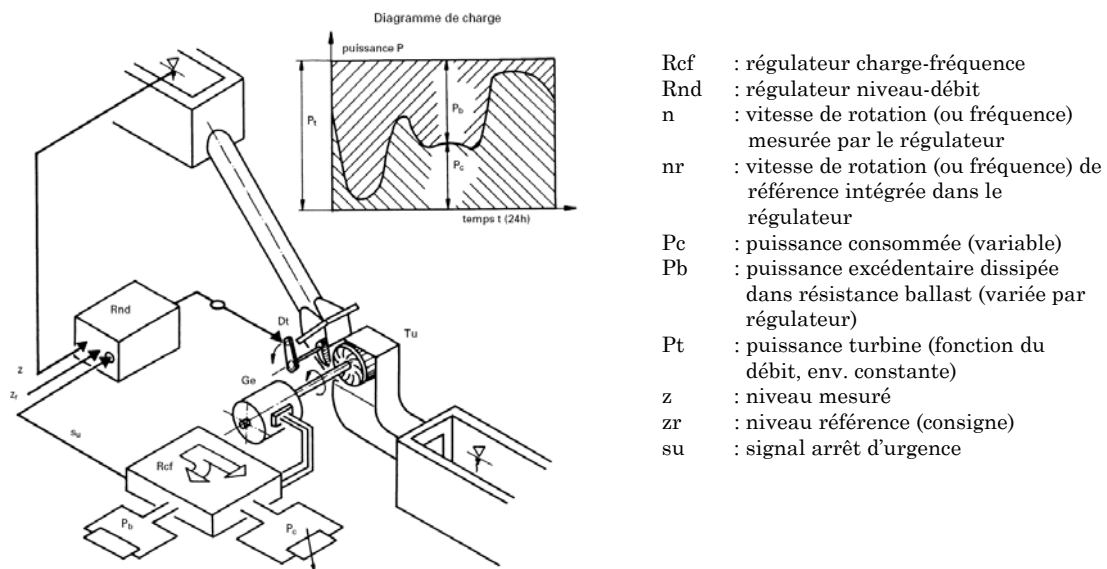


Figure 34 : PCH en îlot avec régulation électronique charge-fréquence et niveau-débit

### 2.4.3. Au moyen d'un régulateur vitesse-débit

Ce mode de régulation est la méthode traditionnelle des centrales électriques de moyennes et hautes puissances travaillant en îlot.

La vitesse de rotation de la turbine est maintenue constante en réglant l'arrivée d'eau par le pointeau; le débit varie en fonction de la puissance demandée au générateur.

Le régulateur de niveau a pour fonction de limiter l'ouverture de la turbine et, en conséquence, la puissance disponible, en vue de maintenir le niveau amont au-dessus de sa cote minimale.

La régulation vitesse-débit en régime isolé est plus complexe à traiter que la régulation charge-fréquence décrite précédemment. Du fait que le débit doit être adapté quasiment instantanément à la puissance, il pourra varier rapidement selon les fluctuations de la consommation. Ces variations de débit ne manquent pas de poser des problèmes au moment de la conception des installations, car elles induisent des coups de bélier qu'il s'agit de contrôler de diverses manières. Par exemple par un volant d'inertie, des amortisseurs hydropneumatiques, une chambre d'équilibre, etc.

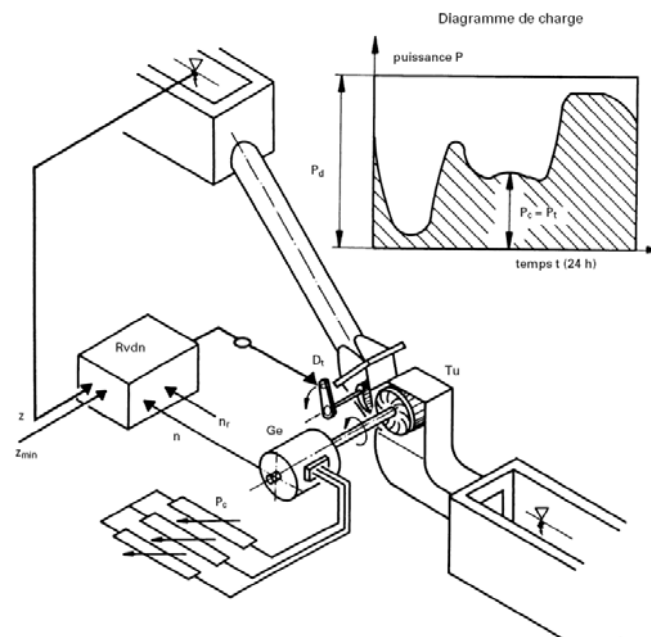


Figure 35 : PCH en îlot avec régulation vitesse-débit et limitation de l'ouverture en fonction du niveau

Tu	: turbine
Dt	: distributeur (ou pointeau) turbine
Ge	: générateur
Rvdn	: régulateur vitesse-débit avec limitation d'ouverture par niveau
n	: vitesse (fréquence) mesurée
nr	: vitesse (fréquence) de référence
z	: niveau mesuré
z <sub>min</sub>	: niveau minimum limite
P <sub>c</sub>	: puissance consommée (= puissance turbine P <sub>t</sub> )
P <sub>d</sub>	: puissance disponible (fonction du débit)



## Travail de diplôme

### Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

Cette analyse fonctionnelle purement graphique se complète par un descriptif grossier des différentes fonctions que doivent assurer tous les éléments de l'installation (Tableau 3).

Tableau 3 : Descriptif des fonctions

Pos.	Fonction	Type	Remarques, valeurs numériques, etc	Système de commande
1	Entrainer	arbre	La turbine entraine l'alternateur	
2	Soutenir	béton	L'alternateur tient la turbine	
3	Alimenter	eau	La turbine alimente le canal de fuite	
4	Alimenter	eau	L'injecteur produit un jet qui fait tourner la turbine (2 fois)	
5	Alimenter	eau	La conduite est reliée à l'injecteur	
6	Alimenter	eau	La chambre de mise en charge alimente la conduite	
7	Alimenter	400V/50Hz	L'alternateur est raccordé au disjoncteur de couplage	x
8	Alimenter	400V/50Hz	Le disj. de couplage est connecté au réseau	x
9	Commander	24Vdc	L'automate règle l'ouverture des pointeaux (2 fois)	x
10	Commander	24Vdc	L'automate règle le déplacement des déflecteurs (2 fois)	x
11	Dévier	métal	Les déflecteurs doivent dévier les jets (2 fois)	
12	Mesurer		Le capteur de vitesse mesure la vitesse sur l'arbre de l'alternateur	
13	Transmettre	0-10V	Le capteur de vitesse transmet un signal proportionnel à la vitesse à l'automate	x
14	Charger	12V	L'onduleur doit charger les batteries	x
15	Secourir	24Vdc	L'onduleur doit pouvoir maintenir l'alimentation de l'automate stable même en cas de coupure	x
16	Alimenter	230V	Le réseau alimente l'onduleur	x
17	Mesurer		Le capteur de niveau 1 mesure la profondeur d'eau de la chambre de mise en charge	
18	Transmettre	4-20mA	Le capteur de pression transmet les données concernant la pression à l'automate	x
19	Transmettre	4-20mA	Le débitmètre transmet un signal de débit à l'automate	x
20	Mesurer		Le débitmètre mesure le débit d'eau de la conduite à l'entrée de l'installation	
21	Mesurer		Le pressostat mesure la pression de la conduite	
22	Alimenter	eau	La conduite possède un by-pass	
23	Soutenir	béton	Le bâti doit soutenir l'alternateur	
24	Transmettre	4-20mA	Le capteur de niveau transmet un signal de niveau à l'automate	x
25	Alimenter	eau	Le by-pass refoule l'eau dans le canal de fuite en cas de défaut	
26	Transmettre		L'automate transmet les données au touch-panel	x
27	Commander		Le touch-panel envoie les données configurées par l'exploitant à l'automate	x
28	Inform		Le touch-panel doit apporter les informations nécessaires (panne, alarmes...) à l'exploitant	x
29	Entrer param.		L'exploitant doit pouvoir gérer les paramètres aisément au travers du touch-panel	x
30	Inform	GSM, FO, ...	Le module de télémaintenance doit envoyer à l'exploitant certaines alarmes, paramètres ou mesures de l'installation	x
31	Commander	GSM, FO, ...	L'exploitant doit pouvoir modifier certains paramètres à distance	x
32	Transmettre		Le module de télémaintenance fait le lien entre l'exploitant distant et l'automate	x
33	Transmettre		L'automate doit envoyer au module de télémaintenance les données voulues par l'exploitant	x
34	Mesurer		L'appareil de mesure électrique mesure la tension, le courant, le cos phi, les puissances, la fréquence	x
35	Transmettre		L'appareil de mesures électriques envoie les données mesurées à l'automate	x
36	Compenser		Les batteries de compensations doivent compenser le cos phi	x
37	Commander	24Vdc	L'automate gère l'enclenchement et le déclenchement des batteries de compensation	x
38	Commander	24Vdc	L'automate doit gérer l'engagement de la vanne du by-pass	x
39	Alimenter	eau	Le bassin avant la grille alimente le bassin de mise en charge et retient les corps étrangers	
40	Alimenter	eau	La grille retient les corps étrangers et laisse passer l'eau	
41	Transmettre	4-20mA	Le capteur de niveau 2 transmet le niveau d'eau avant la grille à l'automate (différentiel)	x
42	Mesurer		Le capteur de niveau 2 mesure le niveau avant la grille	x
43	Commander	24Vdc	L'automate commande la mise en marche du dégrilleur	x
44	Obstruer		Des débris de toutes sortes peuvent obstruer la grille	
45	Refroidir		Le climat peut refroidir considérablement le local est ainsi perturber le bon fonctionnement	
46	Inonder		Des inondations peuvent avoir lieu dans le local technique	
47	User		Du sable et autres impuretés peuvent abimer la turbine	
48	Commander	24Vdc	L'automate commande la fermeture ou l'ouverture du disjoncteur de couplage	x
50	Obstruer		Des débris de toutes sortes peuvent obstruer le canal de fuite	
51	Exciter		Le réseau doit exciter l'alternateur au travers d'un redresseur variable	x
52	Obstruer		Du gros stable et des branches peuvent obstruer le bon fonctionnement du dessableur	
53	Obstruer		Du gros stable et des branches peuvent obstruer le déversoir	
54	Obstruer		Des débris peuvent obstruer la prise d'eau	
55	Geler		Le froid peut geler la prise d'eau	
56	Alimenter	eau	la prise d'eau alimente le déversoir	
57	Alimenter	eau	le déversoir alimente le dessableur	
58	Alimenter	eau	le dessableur alimente le bassin avant la grille	
59	Alimenter		Les batteries alimentent l'onduleur en cas de défaut du réseau	x
60	Inform	24Vdc	L'onduleur doit informer l'automate en cas de défaut des batteries ou lorsqu'il est en mode secours	x
61	Mesurer		Les capteurs de position du pointeau (linéaire et fin de course) mesurent la position du pointeau	x
62	Transmettre	4-20mA/24 Vdc	La position du pointeau est transmise à l'automate	x
63	Mesurer		Un capteur de position de la vanne du by-pass (linéaire et fin de course) mesure la position de la vanne	x
64	Transmettre	4-20mA/24 Vdc	Les capteurs de la vanne du by-pass transmettent les informations de position à l'automate	x
65	Mesurer		Les capteurs de position du déflecteur (linéaire et fin de course) mesure la position du déflecteur (2 fois)	x
66	Transmettre	4-20mA/24 Vdc	Les capteurs de position des déflecteurs envoient les données de position à l'automate (2 fois)	x
67	Mesurer		L'appareil de mesures électriques mesure la tension, le courant, la fréquence, le cos phi du réseau	x
68	Mesurer		Le capteur de niveau du déversoir mesure le niveau à la prise d'eau	x
69	Transmettre	4-20mA	Le capteur de niveau du déversoir doit envoyer la mesure à l'automate	x
70	Eclairer		Le local est éclairé par une ampoule ou un TL et est commandé par BP par l'exploitant	
71	Alimenter	230V	Le réseau doit alimenter la lampe	x
72	Alimenter	230V	Le réseau doit alimenter le chauffage	x
73	Commander		Un thermostat commande l'enclenchement et le déclenchement du chauffage	x
74	Mesurer		Des capteurs de température prennent la température sur les paliers de l'alternateur (2 fois)	x
75	Transmettre	4-20mA	Les capteurs de température des paliers envoient un signal à l'automate	x
76	Mesurer		Des capteurs de température prennent la température des bobinages de l'alternateur (3 fois)	x
77	Transmettre	4-20mA	Les capteurs de température des bobinages envoient un signal à l'automate	x
78	Surveiller, contrôler	24Vdc	Le chargeur surveille les batteries	x
79	Mesurer		Les capteurs de vibrations mesure le vibration sur l'alternateur	
80	Transmettre	4-20mA	Les capteurs de vibrations transmettent les signaux de vibration à l'automate	



## 4. Analyse de risque

### 4.1. Introduction

L'analyse de risque reprend toutes les fonctions identifiées de l'analyse fonctionnelle. Pour chacune d'entre elles, j'ai indiqué la fréquence de la défaillance, la gravité de ses effets et comment les détecter.

La fréquence d'une défaillance est le nombre de fois que l'on est exposé à un événement durant un certain laps de temps. La durée de référence peut-être une année, un kilomètre parcouru. Mais dans notre cas, elle sera la durée de vie de l'installation (Tableau 4).

Tableau 4 : Tableau définissant les niveaux de fréquence

Niveau de fréquence	Condition définissant le niveau de fréquence : événement se produisant:
4	probablement une fois par mois
3	probablement une fois par année
2	probablement une fois tous les 5 à 10 ans
1	probablement moins d'une fois dans la durée de vie de l'installation

Afin de qualifier la gravité de la défaillance, j'utilise un tableau définissant le niveau de disponibilité de l'installation. En général la gravité est plus axée sur la sécurité, mais étant donné que l'installation est totalement automatisée, et que l'être humain n'intervient que peu sur le site, le niveau de gravité décrit plutôt les dommages qui pourraient être occasionnés et le temps pendant lequel l'installation ne sera plus productive (Tableau 5).

Tableau 5 : Tableau définissant les niveaux de gravité

Niveau de gravité	Condition définissant le niveau de disponibilité : caractérise un événement qui :
4	pourrait occasionner la destruction totale du système
3	pourrait occasionner des dégâts nécessitant une intervention humaine et l'arrêt de l'installation durant un certain temps
2	pourrait occasionner des dégâts mineurs sans intervention humaine immédiate
1	n'as pas de conséquences sur l'installation

La combinaison des niveaux de gravité et de fréquence se réalise sous forme matricielle et nous donne le niveau de risque : la criticité (Tableau 6,

Tableau 7).

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

Tableau 6 : Matrice de la criticité

Niveau de fréquence	4	II	II	III	III
	3	I	II	II	III
	2	I	I	II	III
	1	I	I	II	III
		1	2	3	4
		Niveau de gravité			

Tableau 7 : Tableau définissant le niveau de criticité

Niveau de criticité	Condition définissant la criticité
III	Inacceptable
II	A étudier
I	Acceptable

Les niveaux de criticité me donnent les points critiques sur lesquelles il faudra travailler pour minimiser les défaillances. Cependant, cette analyse fonctionnelle et de risque concerne toute l'installation. Dans le cadre de mon travail de diplôme, seule la partie commande sera approfondie.

## 4.2. Tableau de l'analyse de risque

Tableau 8 : Analyse de risque

No	Fonction	Mode de défaillance	Fréquence	Effet de la défaillance	Gravité	Détection de la défaillance	Détection après coup (Alarme)	Criticité	Arrêt N/U	Télémesure	Traité? O/N	Remarques	No détection
1	La turbine entraîne l'alternateur	Rupture d'un auget	1	Destruction du bâti	4	Aucune	Visuel après démontage	III	U	-	O	Est détecté en mesurant les vibrations.	D1.1
2	La turbine est fixée à l'alternateur	Fissure de l'arbre	1	Destruction du système	4	Aucune	Visuel après démontage	III	U	-	O	Est détecté en mesurant les vibrations.	D2.1
		Rupture de l'arbre				Effets visuels et sonores							
3 - 25	La turbine alimente le canal de fuite - Le by-pass refoule l'eau dans le canal de fuite	Canal de fuite obstrué	1	Noyage du bâti	3	Un capteur de niveau dans le canal de fuite peut indiquer un niveau d'eau anormal.	Alarme canal de fuite apparaîtrait l'installation serait mise hors service.	II	-	-	N	Cependant cette solution n'est pas envisagée dans le cadre d'une petite centrale. Cette défaillance n'est pas traitée.	-
4	Les injecteurs produisent les jets qui font tourner la turbine	Jet non cylindrique	2	Perte de rendement	2	Aucune	Pointeau, anneau d'embouchure ou tuyère abimé	I	-	-	N	Peut être détectée par un système qui calcule le rendement de l'installation et le compare à une référence.	-
		Jet mal orienté										Un revêtement spécial ralentit l'apparition de cette défaillance	

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

5	La conduite alimente les injecteurs	Rupture d'un raccord, fuite	1	Toute l'eau n'est pas turbinée	3	Visuel Capteur de pression	Visuel Alarme pression min	II	U	X	O	Si la fuite est importante cette défaillance peut être détectée par le capteur de pression.	D5.1
6	La chambre de mise en charge alimente la conduite	De l'air s'introduit dans la conduite	4	Détérioration de l'installation	3	Un capteur de niveau dans la chambre de mise en charge ne laisse pas descendre le niveau d'eau en-dessous d'un min.	Alarme niveau min.	III	N	-	O	Le capteur de pression peut contrôler la mise en charge de la conduite.	D6.1
7	L'alternateur alimente le disjoncteur de couplage	Court-circuit, L-N, L-L, L-PE	1	Surintensité sur une ou plusieurs phases	3	Disjoncteur de couplage	Alarme défaut départ alternateur.	II	U	X	O	Le disjoncteur de couplage est équipé d'un contact défaut.	D7.1
		Déconnexion d'une phase, câbles coupés, abimés				U			O		En cas de non détection par l'automate le disjoncteur de couplage se déclenche.	D7.2	
8	Le disjoncteur de couplage alimente le réseau	Court-circuit, L-N, L-L, L-PE	1	Surintensité sur une ou plusieurs phases	3	Disjoncteur de couplage	Alarme défaut couplage.	II	U	X	O	Le disjoncteur de couplage est équipé d'un contact défaut.	D8.1
		Ligne coupée, déconnexion d'une phase		L'alternateur n'a plus de charge donc plus de courant ne circule.		Par les mesures de courants l'automate détecte ce défaut.	Alarme défaut de ligne.		U		O	Des capteurs de vitesse détectent aussi cette défaillance car quand il n'y a plus de charge la machine part en survitesse.	D8.2
		Contacts du disjoncteur collés		Interruption automatique impossible et possibilité de surintensité dans la ligne en cas de défaut		Si l'automate donne l'ordre d'ouvrir le disjoncteur et que le contact auxiliaire du disj nous signale qu'il est fermé c'est que nous sommes ce cas de figure.	Alarme défaut couplage.		U		O	Cette défaillance nécessite qu'une alarme soit envoyée à l'exploitant afin qu'il vienne actionner le sectionneur manuellement et ainsi découpler la génératrice. Les fusibles d'introduction sont les derniers moyens de protection.	D8.3
9	L'automate commande l'ouverture des pointeaux	Connexion automate pointeau coupée, déconnectée	1	Régulation du pointeau impossible	3	Fonctionne au manque de tension	Alarme pointeau.	II	U	X	O	-	D9.1
		Les pointeaux ne se ferment pas totalement		Fuite lorsque le pointeau devrait se trouver en position totalement fermé		Un capteur de fin de course nous indique si le pointeau est totalement fermé ou pas.			U	X	O	-	D9.2
		Les pointeaux sont bloqués		Régulation impossible		L'automate détecte une corrélation entre les fin de courses et la capteur de position proportionnel			U	X	O	Un relais de contrôle de courant peut détecter cette défaillance.	D9.3
10 - 11	L'automate commande les déflecteurs - Les déflecteurs dévient les jets	Connexion automate déflecteur coupée	1	Commande des déflecteurs impossibles	3	La commande se fait manque de tension	Alarme défaut commande déflecteur	II	U	X	O	-	D10.1
		Rupture des déflecteurs	1	Dégâts au bâti	4	Aucune	Visuel après le démontage de maintenance	III	-	-	N	Ne peut pas être détectée. Un contrôle minutieux lors de la maintenance préviendrait de ce type de défaut	-
Déflecteurs bloqués	Aucune mesure d'intervention rapide afin d'arrêter la turbine.	Un relais de courant commande le déflecteur		Alarme défaut déflecteur		N	X		O	Lors de la maintenance il est important qu'un graissage généreux des parties mobiles soit effectué.	D10.2		
12 - 13	Le capteur de vitesse mesure la vitesse à l'arbre - Le capteur de vitesse transmet un signal de vitesse à l'automate	Le capteur ne mesure plus ou mal la vitesse, défaillance du capteur	1	Régulation de vitesse impossible	3	Cette défaillance est détectée en comparant le signal du capteur et la fréquence du courant produit.	Alarme capteur de vitesse	II	N	-	O	Ce capteur étant très important pour la régulation il pourrait être dédoublé afin d'éviter ce problème. Prix à étudier. Le choix du capteur se porte pour un modèle linéaire tachymétrique ce afin d'éviter tout problème d'optique avec les codeurs incrémentaux.	D12.1

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

		Connexion automate capteur de vitesse coupée				Aucune Le tachymètre ne renvoie pas de signal quand $n > 0$	Alarme défaut capteur de vitesse		U	X	O	La quittance ne peut pas se faire tant que la panne est présente.	D12.2	
14 - 59 - 78	L'onduleur charge les batteries - Les batteries alimentent l'onduleur en cas de défaut du réseau - Surveillance des batteries	Défaut batteries	1	Autonomie des batteries réduite, secours de l'automate incertain en cas de défaut.	3	L'onduleur est équipé d'une détection batteries non chargées ou défaut batteries.	Alarme défaut batterie.	II	N	X	O	Une mesure courant de charge et de tension annexe à l'onduleur peuvent détecter le défaut. Solution non prévue.  Une maintenance régulière évite ce problème.	D14.1	
		Connexion onduleur batteries coupée				Secours de l'installation et charge impossible			L'onduleur détecte ce type de défaut.	N	X	N	L'installation ne pourra pas redémarrer tant que la connexion n'est pas rétablie	-
		Court-circuit sur les batteries				Les batteries deviennent inutilisables			L'onduleur est équipé d'un dispositif de coupure telle qu'un fusible ou un disjoncteur.	N	X	O	L'installation ne peut pas redémarrer tant que des batteries saines ne sont pas raccordées.	-
15	L'onduleur secoure l'automate en cas de chute du réseau	L'onduleur ne détecte pas la chute du réseau	3	Commande non secourue en cas de chute du réseau	3	Un dispositif de fermeture en cas de non alimentation actionnerait automatiquement les déflecteurs à l'aide d'un ressort, le pointeau d'après sont usinage a une tendance à se fermer.	Un historique de toutes les défaillances est établi, cet historique apparait directement sur l'IHM lors de la remise sous tension de l'installation.	II	U	X	O	Une maintenance régulière de l'onduleur peut diminuer le risque	-	
		Connexion onduleur automate coupée				L'automate envoie périodiquement un signal à l'onduleur qui lui doit répondre.	Alarme défaut ligne automate onduleur.		N	X	N	Cette méthode de détection est à analyser avec les différents fabricants d'onduleurs.	-	
16	Le réseau alimente l'onduleur	Connexion réseau onduleur coupée	1	L'onduleur ne peut plus charger les batteries	3	L'onduleur est équipé d'une alarme en cas de perte d'alimentation.	Alarme défaut alimentation onduleur	II	N	X	O	Les onduleurs sont généralement munis d'alarme coupure alimentation qui automatiquement envoie un signal à l'automate quand cela arrive.	D16.1	
		Le disjoncteur de protection amont à l'onduleur se déclenche (court-circuit, ...)				Le disjoncteur protégeant l'onduleur est équipé d'un contact auxiliaire qui en cas de déclenchement du disj. par défaut de ligne il envoie un signal à l'automate.	Lorsqu'un disjoncteur de protection se déclenche une alarme défaut disjoncteur apparait.		N	X	O		D16.2	
17 - 24	Le capteur C6 mesure le niveau de la chambre de mise en charge - Le capteur de niveau C6 transmet une indication de niveau à l'automate	Le capteur ne mesure plus le niveau	1	Risque d'introduction d'air dans la conduite, Risque de séchage de l'installation, la régulation ne peut plus se faire correctement.	3	Le capteur de niveau est équipé d'un contact défaut.	Alarme défaut capteur	II	N	-	O	-	D17.1	
		Le capteur ne transmet pas la bonne mesure du niveau				Le capteur transmet une valeur de niveau qui ne se trouve pas dans une certaine plage	Alarme défaut capteur de niveau C6.		N	X	O	Cette méthode ne permet pas de détecter les petites différences	D17.2	
		Connexion capteur automate coupée				Signal 4-20mA	Alarme défaut de ligne.		N	X	O	Cette méthode prévient du défaut capteur mais aussi si la ligne est coupée.	D17.3	
19 - 20	Le débitmètre transmet un signal de débit à l'automate - Le débitmètre mesure le débit de la conduite	Le capteur ne transmet pas la bonne mesure de débit	1	Plus d'indication sur la quantité d'eau consommée	3	Si le débit indiqué est démesuré par rapports aux paramètres connus de l'installation c'est qu'il y a défaut.	Alarme défaut débitmètre.	II	N	-	O	Cette mesure de débit ne sert qu'à savoir quelle quantité d'eau a été consommée.	D19.1	
		Connexion capteur automate coupée				Signal 4-20mA	Alarme défaut connexion débitmètre.		N	-	O	Cette méthode prévient du défaut capteur mais aussi si la ligne est coupée.	D19.2	
		Le capteur de débit ne mesure plus le débit.				Le capteur est équipé d'un contact défaut	Alarme défaut débitmètre		N	-	O	-	D19.3	
22	La conduite alimente un by-pass	Défaillance de l'assemblage (raccord)	1	Inondation du local, plus d'alimentation en eau du bassin aval	4	Le capteur de pression (pression min) ainsi qu'un capteur de niveau max dans le local.	Alarme pression min Alarme eau le dans local	III	U	X	N	La conduite est surveillée par le capteur de pression	D22.1	
23	L'alternateur est fixé au bâti	Fissure, usure du bâti	1	L'alternateur et la turbine ne sont plus stables	4	Aucune	Visuel après démontage et maintenance	III	-	-	N	Seule une maintenance périodique peut prévenir de cette défaillance	-	

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

18 - 21	Le capteur de pression transmet à l'automate la pression mesurée - Le capteur de pression mesure la pression dans la conduite	Connexion capteur automate coupée	1	Plusieurs défaillances telles que les défauts capteurs de niveau ou la mauvaise mise en charge de la conduite ne peuvent plus être détectées	4	Signal 4-20mA	Alarme défaut connexion capteur de pression	III	U	X	O	Le capteur de pression est un élément qui permet de déceler beaucoup de défaillances.	D18.1		
		Le capteur transmet une mesure erronée de la pression				La pression doit rester dans une certaine plage.	Alarme défaut capteur pression					-	D18.2		
		Le capteur ne mesure plus la pression dans la conduite				Le capteur de pression est équipé d'un contact défaut	-					-	D18.3		
26 - 27	L'IHM et l'automate échange des informations	Connexion IHM automate coupée	1	Plus de contrôle ni d'indication sur l'état de fonctionnement de la machine	3	Visuel	-	II	N	-	O	Un arrêt d'urgence se trouve sur le tableau de commande.	D26.1		
28 - 29	L'IHM informe l'exploitant des pannes, défauts, alarmes, ... et l'exploitant entre ses paramètres	Défaillance de l'écran de contrôle	1	Plus de contrôle ni d'indication sur l'état de fonctionnement de la machine	3	Visuel	-	II	N	-	O	Un arrêt d'urgence se trouve sur le tableau de commande. La télémaintenance est aussi possible.	-		
30 - 31	L'IHM2 envoie des infos sur l'installation à l'exploitant - L'exploitant doit pouvoir commander la machine à distance	Défaillance de l'IHM2, il n'envoie plus de données à l'exploitant Défaillance de l'IHM2, malgré les envoies de commandes l'installation ne réagit pas.	2	L'exploitant n'est plus au courant des événements particuliers qui se produisent sur la machine L'IHM2 ne traite plus les commandes envoyées par l'exploitant distant	2	L'IHM2 est muni d'un contact défaut signalant ses pannes	Alarme défaut télé-maintenance	I	N	-	O	Cette défaillance dépend beaucoup du système de communication choisit.	D30.1		
32 - 33	L'automate et l'IHM2 se transmettent les données	Connexion automate IHM2 coupée	1	L'automate ne peut plus transmettre les alarmes et les défauts à l'IHM2 et l'automate ne reçoit plus de commandes distantes	3	Le module de télémaintenance doit pouvoir détecter une déconnexion	Alarme défaut télé-maintenance	II	-	X	O	Le fabricant d'automate prévoit ce type de disfonctionnement.	-		
34 - 35	L'appareil de mesures électriques C12 mesure les paramètres électriques à la sortie de l'alternateur - C12 envoie les données à l'automate	Court-circuit des prises de tension entre l'appareil C12 et les TI	1	Les mesures de tensions ne parviennent plus à l'appareil de mesure. Régulation impossible.	3	Des fusibles entre l'appareil C12 et les prises de tension protègent le circuit.	Alarme défaut mesure alternateur	II	U	X	O	-	-		
		Défaut d'un ou plusieurs TI		Absence de mesures de courant. Régulation impossible.		C12 détecte le manque de courant sur une ou plusieurs phases.	Alarme défaut courant alternateur					U	X	O	-
		Une ou plusieurs connexions de C12 à l'automate coupées		Régulation impossible		Signaux 4-20mA	Alarme défaut connexion mesures alternateur					U	X	O	-
36	La batterie de compensation compense la puissance réactive	Défaut d'une ou plusieurs des inductances	1	Surintensité dans les phases. Compensation impossible.	2	Une mesure de courant sur les trois phases détecte un déséquilibre.	Alarme Défaut compensation	I	N	-	O	Les batteries de compensations sont munies de leur propre système de détection défaut.	D36.1		
		Court-circuit ou surcharge		Surintensités		Des fusibles protègent la batterie de compensation.									
37	L'automate commande la batterie de compensation	Connexion automate batterie de compensation coupée	1	Commande de l'enclenchement des batteries impossible, installation non compensée.	2	Une mesure du cos φ détecte que l'installation n'est plus compensée.	Alarme compensation	I	N	-	O	-	D37.1		
38	L'automate commande la vanne du by-pass	Connexion vanne automate coupée	1	Commande du by-pass impossible.	3	La détection de cette défaillance peut se faire avec des fin de courses placés en position fermé et ouvert.	Alarme défaut vanne by-pass.	II	N	X	O	-	D38.1		
		Vanne by-pass bloquée				Relais de courant						-	D38.2		

Travail de diplôme  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

39 - 40 - 52	Le dessableur alimente le bassin de mise en charge où se trouve la grille.	La grille est encombrée	1	Manque d'eau dans l'installation.	2	La conception du dessableur limite cette défaillance. Visuel	-	I	-	-	O	Une visite régulière de l'aménagement extérieur prévient de ce genre de défaillance.	-
41 - 42	Le capteur de niveau C7 mesure le niveau avant la grille et transmet un signal de niveau à l'automate	Connexion capteur automate coupée	1	Plus d'indication de niveau avant la grille. L'eau et les débris passent par-dessus la grille. Risque de séchage.	3	Signal 4-20mA	Alarme défaut capteur de niveau (C7)	II	N	X	O	Un capteur de niveau tout ou rien pourrait être la dernière mesure avant de créer des dégâts. → solution non envisagée.	D41.1
		Capteur mal étalonné		Risque de séchage ou de débordement de l'installation		Valeur transmise à l'automate ne se trouve pas dans une certaine plage	Alarme défaut capteur de niveau					N	-
43	L'automate commande le dégrilleur	Connexion automate dégrilleur coupée	1	Des débris s'accumulent devant la grille et séchent le bassin en aval de la grille. Débordement par-dessus.	4	Capteur dégrilleur en marche.	Alarme défaut dégrilleur	III	N	X	O	Le risque de séchage est maîtrisé par un capteur de niveau min et max placé après la grille.	D43.1
44	Des débris obstruent la grille	Débris obstruant la grille	4	Risque de séchage ou de débordement de l'installation	1	Deux capteurs de niveau mesurent les niveaux avant et après la grille	Signalisation dégrilleur en marche	II	-	-	O	Un dégrilleur est prévu	D44.1
45	Refroidissement du local	Durant l'hiver la température baisse. Risque de gèle	3	Le froid empêche le bon fonctionnement des appareils électriques	2	Un thermostat règle la température du local	Aucune signalisation sur l'IHM.	II	-	-	O	Un chauffage est présent dans le local.	-
46	Des inondations peuvent noyer le local	Lors de fortes pluies. L'eau s'infiltré.	1	De l'eau en quantité abondante s'infiltré dans le local et peut abîmer l'installation.	4	Un capteur de niveau max dans le local pourrait arrêter toute l'installation.	Une alarme niveau max dans local pourrait s'afficher sur l'IHM et par la même occasion avertir l'exploitant distant.	III	N	X	N	Un hydrostat pourrait réguler l'humidité du local en agissant sur le chauffage.	-
47	Des impuretés dans l'eau peuvent éroder la turbine	Usure anormale de la turbine	2	Perte de rendement	2	Aucune	Visuel après démontage de maintenance	I	-	-	N	Une mesure comparative de rendement pourrait aider à déceler cette défaillance. Un revêtement spécial sur la turbine ralentirait l'érosion.	-
48	L'automate commande le disjoncteur de couplage	Connexion automate disjoncteur de couplage coupée	1	Plus de contrôle sur le disjoncteur de couplage.	1	Fonctionne au manque de tension	Alarme défaut connexion disj. couplage	I	U	X	O	Une autre méthode est de mettre sur le disjoncteur de couplage un contact auxiliaire qui indique à l'automate si le disj. est fermé ou ouvert. Et de vérifier l'état de ce contact quand il est censé est fermé.	D48.1
		Mauvaise synchronisation lors de la fermeture du disjoncteur de couplage	1	Endommagement de la génératrice	3	Gestion par synchrotract	Alarme défaut couplage	II	U	-	O	La synchronisation peut être assurée par l'automate en se basant sur les appareils de mesure.	D48.2
50	Canal de fuite obstrué par éléments d'environnement hostile	Des débris bouchent la sortie	3	De l'eau risque de remonter dans le bâti.	3	Un capteur de niveau nous prévient une montée d'eau anormale.	Alarme niveau max canal de fuite	II	N	-	N	Les conséquences dépendant du type d'installation. (eau potable, eaux usées, en rivière)	-
51	Le réseau au travers d'un circuit redresseur doit exciter l'alternateur synchrone.	Plus d'excitation sur la génératrice	3	Emballement de la machine	4	L'automate détecte une survitesse. Mesure du courant d'excitation	Alarme survitesse Alarme défaut excitation	III	U	X	O	La régulation de l'excitation peut se faire par l'automate ou par un module séparer.	D51.1
53 - 54	Des débris entravent le déversoir et la prise d'eau	L'eau ne circule pas correctement	3	Manque d'eau dans l'installation. Risque de séchage.	3	La mesure de débit de la chambre de mise en charge détecte le manque d'eau	Alarme niveau min	II	N	X	O	Une visite régulière de l'aménagement extérieur prévient de ce genre de défaillance. Un capteur de niveau au déversoir peut nous prévenir.	D53.1 - D53.2

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

55	Le froid gèle la prise d'eau	L'eau ne circule pas correctement	3	Manque d'eau dans l'installation. Risque de séchage.	2	Une sonde extérieure de température informe l'automate de la température	Alarme température extérieur basse	II	N	X	O	-	D55.1
56	La prise d'eau n'alimente plus le déversoir	La prise d'eau n'alimente plus le déversoir	3	Séchage de l'aménagement	2	Capteur de niveau min au déversoir	Alarme niveau min déversoir	II	N	-	O	-	D56.1
57	Le déversoir alimente le dessableur	Le déversoir n'alimente plus le dessableur	3	Séchage de l'aménagement	2	Capteur de niveau min au déversoir	Alarme niveau min déversoir	II	-	-	N	Une sonde de niveau au déversoir pourrait nous avertir de la défaillance	D57.1
58	Le réseau alimente l'alternateur	Le réseau fait tourner l'alternateur Retour d'énergie	3	Consommation d'énergie	1	La mesure des puissances actives peut détecter ce type de défaillance.	Alarme retour d'énergie	II	U	-	O	Aucune intervention humaine n'est nécessaire. Une indication figure dans le journal des alarmes	D58.1
60	L'onduleur transmet les défauts batteries ou réseau à l'automate	L'onduleur ne signale plus les défauts à l'automate	1	Défauts des batteries non signalés	4	Mesures auxiliaires à l'onduleur	-	III	N	-	N	Faire une mesure annexe à l'onduleur sur les batteries directement.	D60.1
61 - 62	Les capteurs de position des poteaux mesurent et transmettent un signal de position à l'automate	Mauvaise mesure de la position	1	Régulation de débit impossible	3	L'automate détecte les signaux incohérents à l'aide des fin de courses	Alarme défaut capteurs poteaux	II	U	X	O	-	D61.1
		Connexion capteur automate coupée				-						D61.2	
63 - 64	Les capteurs de position de la vanne du by-pass mesurent et transmettent un signal à l'automate	Connexion capteur automate coupée	1	Plus d'information sur l'état de la vanne	2	Capteur travaillant en manque de tension	Alarme défaut capteur by-pass	I	N	X	O	Les capteurs du by-pass sont des fin de courses.	D63.1
65 - 66	Les capteurs de position des déflecteurs mesurent et transmettent un signal de position à l'automate	Connexion capteur automate coupée	1	Aucune indication sur la position des déflecteurs	3	Capteur travaillant en manque de tension	Alarme défaut capteur déflecteur	II	U	X	O	-	D65.1
67	L'appareil de mesures électriques C12 mesure les paramètres électriques du réseau	Court-circuit des prises de tension	1	Les mesures de tensions ne parviennent plus à l'appareil de mesure. Régulation impossible	4	Fusible	Alarme défaut mesure alternateur	III	O	X	O	-	D67.1
		Défaut d'un TI		Plus de mesure de courant. Régulation impossible.		L'automate détecte le manque de courant sur une phase	Alarme défaut mesures alternateur					O	
68 - 69	Le capteur de niveau du déversoir mesure et transmet un signal de niveau à l'automate	Mauvaise mesure du niveau.	1	Le niveau donné par le capteur ne correspond à la réalité. Risque de séchage	2	Le capteur est équipé d'un contact défaut	Alarme capteur de niveau déversoir	I	N	X	N	-	D68.1
		Connexion capteur automate coupée		Plus d'indication sur le niveau d'eau entrant dans l'installation		Signal 4-20mA	Alarme défaut capteur de niveau					-	D68.2
70	Le local est éclairé par une ampoule	Ampoule grillée	3	Local non éclairé	1	Visuel par l'exploitant	-	I	-	-	N	-	-
71	Le réseau alimente la lampe du local	Coupure du réseau	3	Local non éclairé	1	Local plus éclairé	-	I	-	-	N	Une lampe de poche de secours dans le local pourrait contourner momentanément la défaillance.	-
72	Le réseau alimente le chauffage du local	Coupure du réseau	3	Local non chauffé. Température anormalement basse dans le local	2	Une sonde de température informe l'automate de la température du local	Alarme température basse	II	N	X	O	-	-
		Défaut de ligne				Disjoncteur de protection avec contact auxiliaire	Alarme défaut disjoncteur					-	-
73	Un thermostat règle la mise en service du chauffage local	Défaillance du thermostat	2	Température local non réglée	2	Une sonde de température informe l'automate de la température du local	Alarme température basse	I	N	X	O	-	-

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

74 - 75	Les capteurs de température des paliers mesurent et transmettent un signal de température à l'automate	Défaillance des capteurs	1	Paliers non ou mal surveillés, risque de surchauffe et d'endommagement de l'alternateur.	3	Les mesures des capteurs doivent rester dans une certaine plage	Alarme température paliers	II	U	X	O	-	D74.1
		Connexion capteurs automate coupée	1	Plus d'indication de température des paliers	3	Signaux 4-20mA	Alarme défaut ligne capteur de température paliers	II				-	D74.2
76 - 77	Les capteurs de température des bobinages de l'alternateur mesurent et transmettent la température des bobinages à l'automate	Défaillance des capteurs	1	Bobinages non ou mal surveillés. Risque d'endommagement de l'alternateur.	3	Les mesures des capteurs doivent rester dans une certaine plage	Alarme température bobinage	II	U	X	O	-	D76.1
		Connexion capteurs automate coupée	1	Plus d'indication de température des bobinages	3	Signaux 4-20mA	Alarme défaut ligne capteur de température bobinage	II				-	D76.2

### 4.3. Interprétation

Comme cité au paragraphe 4.1, cette analyse est basée uniquement sur la disponibilité de l'installation en cas de défaillance et sur les dommages qui pourraient être causés.

On constate que l'on trouve une majorité de mode défaillance de criticité II. En effet, sur une petite installation de production électrique, les conséquences d'un incident sont généralement peu ou pas destructrices mais nécessitent néanmoins l'arrêt de la production. Ou alors elles influent uniquement sur le bon fonctionnement de l'installation (I).

A chaque mode de défaillance correspond une mesure technique à prendre afin de limiter les risques d'incidents en tenant compte du degré de criticité. Un degré de criticité élevé (III) implique des mesures sévères car l'incident n'est quasiment pas tolérable. Un degré de criticité faible (I) tolère une prise de risque supérieure et d'autres influences (fonctionnelles, économiques, etc...) peuvent rentrer en compte pour la conception.

Dans l'analyse de risque (Tableau 8), les mesures prises afin de limiter les risques d'incidents sont décrites dans la colonne « Détection de la défaillance ». Des plus, une précision ou une amélioration du dispositif est apportée dans la colonne « Remarques ».

Tous les modes de défaillance conduisent à l'arrêt normal, rapide ou d'urgence de l'installation.

### 4.4. Traitement des données obtenues

Quand l'analyse de risque est terminée, il s'agit de relever dans un tableau (que j'ai nommé « Détection »), tout le matériel qu'il sera nécessaire d'utiliser dans une installation pour contrer les défaillances trouvées. Ce tableau comporte le maximum d'informations sur chaque défaillance, à savoir le numéro de défaillance, le numéro de détection, sa position dans l'installation, la plage de mesure, le type et le nombre approximatif de signaux d'entrées/sorties, la condition de la détection, etc. Voici ce que cela donne (Tableau 9) :



Travail de diplôme  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

Tableau 9 : Détection

No	No Det	Désignation	Position	Appareil	Entrée/Sortie	Type de signal	Signal	Nbre de capteur	Nbr entrée A	Nbre entrée D	Nbre sortie	Condition de détection	Alarme générée	Alarme sonore
1,2	D1.1.D2.1	C14	ALT	Capteur de vibration	E	A	4-20mA	2	2	-	-	... < f_vibr < ...	Alarme vibration	X
5	D5.1	C3	COND	Capteur de pression	E	A	4-20mA	1	1	-	-	... < p < ...	Alarme pression min	X
6	D6.1	C6	RES	Capteur de niveau CmC	E	A	4-20mA	1	1	-	-	... < z < ...	Alarme niveau min	X
7	D7.1	E2	CMD	Contact défaut disj. Couplage	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut départ alternateur	X
	D7.2	C12	ALT	Relais surveillance courant alt	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut départ alternateur	X
8	D8.1.D8.3	E2	CMD	Contact auxiliaire de défaut couplage	E	D	24V	1	-	2	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut couplage	X
	D8.2	C11	ALT	Surveillance vitesse	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme survitesse	X
		C11	ALT	Tachymètre	E	A	0-10V	1	1	-	-	-	Indication de la vitesse	
9	D9.1	A8	TUR	Commande pointeau	S	D	24V	-	-	-	4	si entrée = 0V	Alarme pointeau	X
	D9.2	C1	TUR	Fin de course injecteur	E	D	24V	4	-	-	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme pointeau	X
	D9.3	C1	TUR	Capteur position linéaire pointeau	E	A	4-20mA	2	2	-	-	-	Alarme pointeau	X
10, 11	D10.1	A12	TUR	Commande déflecteur	S	D	24V	-	-	-	2	-	Déflecteur en marche	
	D10.2	A12	TUR	Relais de courant pour déflecteur	E	D	24V	2	-	2	-	-	Alarme défaut déflecteur	X
12, 13	D12.1	C11	ALT	Contrôle défaut tachymètre	-	-	-	-	-	-	-	si n pas égal f courant	Alarme défaut tachymètre	X
	D12.2	C11	ALT	Contrôle défaut tachymètre	-	-	-	-	-	-	-	si n = 0 & f > 0	Alarme défaut capteur de vitesse	X
14, 59, 78	D14.1	S1	BAT	Contact défaut chargeur	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut chargeur	X
		S2	BAT	Contact Surcharge Batterie	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme surcharge batterie	X
16	D16.1	S1	BAT	Défaut alimentation réseau	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme automate secours	X
	D16.2	C1	BAT	Contact défaut disj. Chargeur	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut aim. onduleur	X
17, 24	D17.1	C6	RES	Contact défaut capteur de niveau C6	E	D	24V	-	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut capteur C6	X
	D17.2	C6	RES	Détection défaut cpteur C6	-	-	-	-	-	-	-	... < z < ...	Alarme défaut capteur C6	X
	D17.3	C6	RES	Détection défaut ligne C6	-	-	-	-	-	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme connexion capteur C6	X
19, 20	D19.1	C4	COND	Débitmètre	E	A	4-20mA	1	1	-	-	... < Qnom < ...	Alarme défaut débitmètre	X
	D19.2	C4	COND	Détection défaut ligne débitmètre	E	D	24V	1	-	1	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme connexion débitmètre	X
	D19.3	C4	COND	Contact défaut débitmètre	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut débitmètre	X
22	D22.1	C3	COND	Détection défaut by-pass avec p	-	-	-	-	-	-	-	... < p < ...	Alarme pression min max	X
18, 21	D18.1	C3	COND	Détection ligne coupée capteur de pression	-	-	-	-	-	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut connexion capteur de pression	X
	D18.2	C3	COND	Détection défaut capteur pression	-	-	-	-	-	-	-	... < p < ...	Alarme défaut mesure courant	X
	D18.3	C3	COND	Contact défaut capteur pression	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut capteur de pression	X
26, 27	D26.1	IHM1	CMD	Arrêt d'urgence tableau	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme arrêt d'urgence	X
30, 31	D30.1	IHM2	CMD	Contact défaut télémaintenance	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut télémaintenance	X
34	D34.1	C12	CMD	Cos phi Alternateur	E	A	4-20mA	1	1	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut mesure cos phi	X
		C12	CMD	Courant alternateur	E	A	4-20mA	1	1	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut mesure courant	X
		C12	CMD	Fréquence alternateur	E	A	4-20mA	1	1	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut mesure fréquence	X
		C12	CMD	Puissance active alt.	E	A	4-20mA	1	1	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut mesure puissance active	X
		C12	CMD	Puissance réactive alt.	E	A	4-20mA	1	1	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut mesure puissance réactive	X
		C12	CMD	Tension alt.	E	A	4-20mA	1	1	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut mesure tension	X
36	D36.1	COMP	COMP	Contact défaut compensation	E	D	24V	1	-	2	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut compensation	X
37	D37.1	COMP	COMP	Contrôle cos phi	E	D	24V	1	-	1	-	si ... > cos_phi > ...	Alarme défaut compensation	X
		COMP	COMP	Commande compensation	S	D	24V	-	-	-	1	-	Réseau compensé	
38	D38.1	A10	BYP	Fin de course by-pass	E	D	24V	2	-	2	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut by-pass	X
		A10	BYP	Commande vanne by-pass	S	D	24V	-	-	-	1	-	Vanne actionnée	
		A10	BYP	Relais de courant vanne by-pass	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut by-pass	X
	D38.2	A10	BYP	Relais de courant vanne by-pass	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut by-pass	X
41, 42	D41.1	C7	RES	Capteur de niveau avant grille	E	A	4-20mA	1	1	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme connexion capteur niveau	X
	D41.2	C7	RES	Contact défaut capteur de niveau avant grille	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ? / ... < z < ...	Alarme défaut capteur C7	X
43	D43.1	A5	RES	Détection ligne coupée dégrilleur	-	-	-	-	-	-	-	?	Alarme défaut connexion dégrilleur	X
		A5	RES	Commande dégrilleur	S	D	24V	-	-	-	1	-	Marche dégrilleur	
		A5	RES	Fin de course dégrilleur	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut dégrilleur	X
44	D44.1	A5	RES	Détection détritris avec C6 et C7	-	-	-	-	-	-	-	0 < C7 - C6 < ...	Alarme dégrilleur bouché	X
48	D48.1	E2	CMD	Commande disjoncteur de couplage	-	D	24V	-	-	-	1	Si plus de 24V	Alarme défaut couplage	X
	D48.2	E2	CMD	Contact défaut synchrotact	-	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme couplage	X
51	D51.1	E4	ALT	Contact défaut excitation	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme excitation	X
		E4	ALT	Commande excitation	S	D	24V	1	-	-	2	-	-	
53, 54	D53.1	C8	RES	Détection déversoir bouché	-	-	-	-	-	-	-	... < z < ...	Alarme niveau min	X
	D53.2	C8	RES	Capteur de niveau déversoir	-	A	4-20mA	1	1	-	-	... < z < ...	Alarme niveau min	X
55	D55.1	A1	RES	Capteur de température extérieur	E	A	4-20mA	1	1	-	-	... < 0 < ...	Alarme température basse	X
56	D56.1	C8	RES	Détection niveau min dévesoir	-	-	-	-	-	-	-	... < z < ...	Alarme niveau min	X
57	D57.1	C8	RES	Détection niveau min dévesoir	-	-	-	-	-	-	-	... < z < ...	Alarme niveau min	X
58	D58.1	C12	CMD	Contact anti-retour	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme retour d'énergie	X
60	D60.1	S1	BAT	Détection ligne coupée chargeur	-	-	-	-	-	-	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut chargeur	X
61, 62	D61.1	C1	TUR	Détection défaut capteur lin	-	-	-	-	-	-	-	si 1 sur fdc alors pot = 20mA	Alarme défaut capteur linéaire	X
	D61.2	C1	TUR	Détection ligne capteur lin	-	-	-	-	-	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut connexion capteur pointeau	X
63, 64	D63.1	C13	BYP	Capteur pos. Vanne by-pass	-	-	-	-	-	-	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme capteur position by-pass	X
65, 66	D65.1	C2	TUR	Capteur pos. Déflecteur	E	D	24V	2	-	2	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme défaut déflecteur	X
67	D67.1	C12	CMD	Surveillance réseau	-	-	-	-	-	-	-	-	Alarme défaut mesures alternateur	X
		C12	CMD	Mesure tension réseau	E	A	4-20mA	1	1	-	-	-	Indication de la tension réseau	
		C12	CMD	Mesure fréquence réseau	E	A	4-20mA	1	1	-	-	-	Indication de la fréquence du réseau	
68, 69	D68.1	C8	RES	Contact défaut niveau déversoir	E	D	24V	1	-	1	-	si = 1 ou = 0 ?	Alarme niveau min déversoir	X
	D68.2	C8	RES	Défaut niveau déversoir	-	-	-	-	-	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut connexion capt. Niv. Déversoir	X
74, 75	D74.1	E1	ALT	Capteur température paliers	E	-	4-20mA	2	2	-	-	01 =02	Alarme température paliers	X
	D74.2	E1	ALT	Détection défaut ligne temp. Paliers	-	-	-	-	-	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut capteur temp. paliers	X
76, 77	D76.1	E1	ALT	Capteur température bobinage	E	A	4-20mA	3	3	-	-	01 =02=03	Alarme temp. bobinage	X
	D76.2	E1	ALT	Détection défaut ligne temp. Bobine	-	-	-	-	-	-	-	si signal 4-20mA =0A	Alarme défaut connexion capt. Temp. Bob.	X
		CMD	CMD	Alarme sonore	S	D	24V	1	-	-	1	-	-	
		S2	BAT	Tension batteries	E	A	4-20mA	1	1	-	-	-	-	
		S2	BAT	Courant de charge batteries	E	A	4-20mA	1	1	-	-	-	-	
		CMD	CMD	Contact défaut synchrotact	E	D	24V	1	-	1	-	-	Indication de la tension de batteries	

Après avoir relevé le matériel à utiliser selon chaque défaillance, il s'agit de classer ces données en fonction de leur position dans l'aménagement, d'apporter des précisions sur les types d'arrêts qu'elles vont générer et de quantifier les entrées/sorties. Pour cela, il a fallu se documenter sur l'appareillage compatible à l'installation. Ce premier classement se trouve à l'annexe 1.

En parallèle à la recherche de matériel, j'ai pu établir le cahier des charges me permettant de définir la structure de la commande et de choisir le bon appareillage. Ce cahier des charges se trouve au chapitre suivant.

Connaissant le matériel que j'allais intégrer à la commande, j'ai défini le nombre d'entrées/sorties. C'est également à ce moment que j'ai défini la disposition des I/O sur les cartes de l'automate. Et ceci car le but de mon projet est que l'automate soit modulaire et puisse s'adapter aux différentes configurations sans avoir besoin d'être reprogrammé à chaque nouvelle installation. Quelques cartes seront communes à toutes les installations et d'autres sont dédiées aux particularités de la centrale à commander. Par exemple, il y a une carte génératrice synchrone, une carte pour un deuxième injecteur, etc.

La liste des emplacements des différentes entrées/sorties se trouve en annexe 2.

## 5. Cahier des charges de la commande

### 5.1. Introduction

Après avoir identifié les points critiques et trouvé une solution pour les détecter et limiter leurs conséquences, je suis en mesure de remplir le cahier des charges.

Ce cahier des charges est établi sur la base des différentes configurations possibles, des impératifs techniques, des règlements, des normes et conjointement avec les désirs de la maison Telsa SA.

### 5.2. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement prévu de l'installation est le suivant :

- Tant que le débit à disposition est inférieur au débit minimum de fonctionnement de la turbine, l'eau est acheminée dans le réservoir. La turbine ne tourne pas.
- Tant que le débit à disposition est compris entre les valeurs minimum et maximum de la turbine, toute l'eau passe par l'installation hydro-électrique.
- Dès que le débit à disposition dépasse le débit maximum de la turbine, l'eau supplémentaire est déversée dans la rivière ou par un by-pass s'il n'y a pas de rivière.

### 5.3. Schéma de l'installation

Les aménagements traités dans le cadre de ce projet se limitent aux installations standards possédant un déversoir, un dessableur, un éventuelle dégrilleur automatique, une chambre de mise en charge, une conduite forcée, une turbine Pelton à deux injecteurs au maximum et un alternateur (Figure 37)

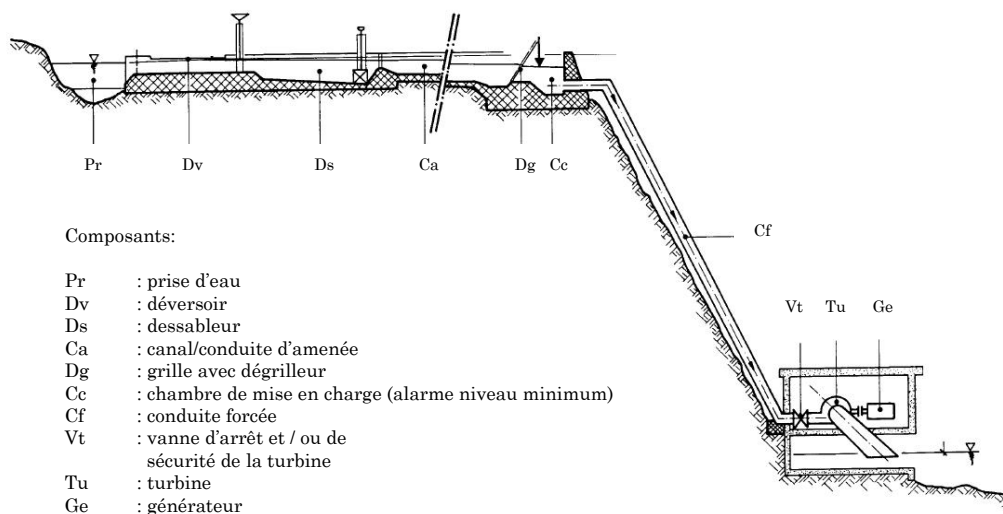


Figure 37 : Schéma général de l'installation considérée

### 5.4. Schéma de processus

L'analyse fonctionnelle, l'analyse de risque et le cahier des charges m'ont permis de dessiner le schéma de processus de l'installation avec les capteurs (Figure 38).

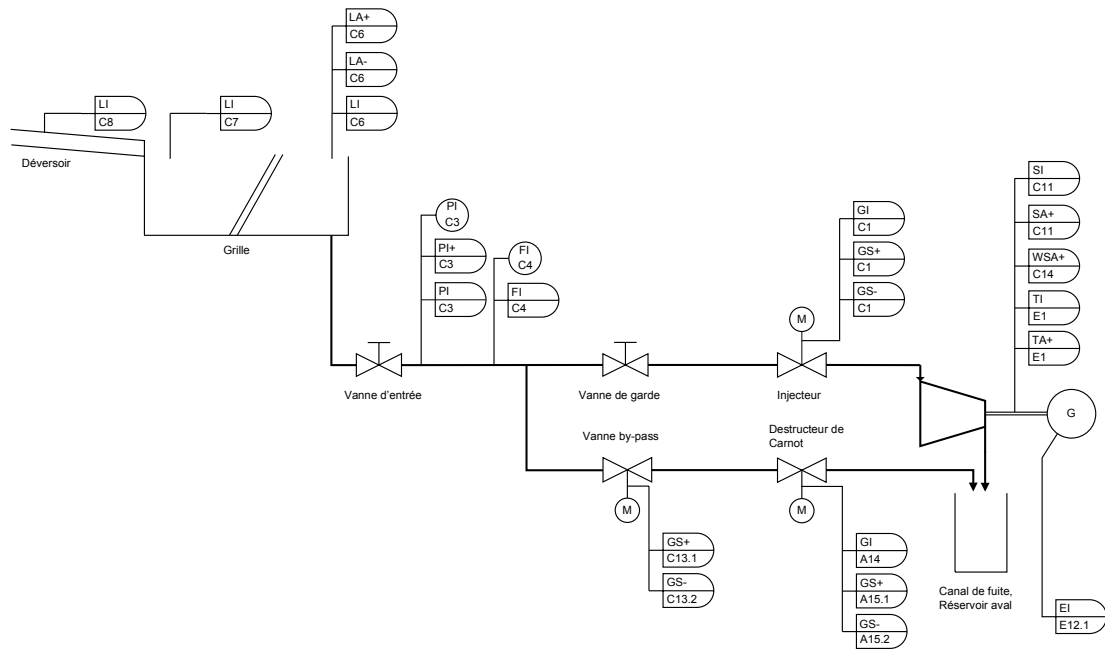


Figure 38 : Scéma de processus

## 5.5. Les capteurs de niveau

Dans les petites centrales turbinant de l'eau potable, il n'y a généralement qu'une sonde de niveau permettant la régulation. Celle-ci se trouve dans la chambre de mise en charge et permet d'éviter de dépasser un niveau minimum qui pourrait entraîner des dommages irréversibles.

Néanmoins, une autre sonde peut être installée en amont de la grille. Celle-ci effectuerait une mesure différentielle avec la sonde de la chambre de mise en charge et pourrait ainsi détecter une accumulation de débris. Cela aurait pour effet d'actionner un éventuel dégrilleur.

Il se peut également qu'il y ait une troisième sonde à proximité d'un éventuel déversoir. Cette dernière, indiquant la quantité d'eau disponible à l'entrée de l'aménagement, permettrait de régler l'ouverture automatique de la turbine.

L'analyse de risque révèle que d'autres sondes de niveau peuvent intervenir dans l'installation, comme par exemple des flotteurs assurant un niveau d'eau minimum dans la chambre de mise en charge en cas de défaut du capteur de niveau linéaires. Les flotteurs ont un but la protection de l'installation et non sa régulation. Des entrées supplémentaires sont prévues pour ces éventuels capteurs. Il faut préciser que ces capteurs peuvent, s'ils ne sont pas bien fixés, obstruer l'installation. C'est pourquoi ils doivent être utilisés avec précaution.

## 5.6. Les vannes

Les vannes d'une installation standard à deux injecteurs sont au nombre de cinq.

- Vanne d'entrée
- Vanne du by-pass
- Vanne de garde
- Injecteurs

Cependant, il est possible d'avoir d'autres vannes dans l'installation. Il se peut, par exemple, qu'il y ait une vanne au sommet de l'installation, en aval de la chambre de mise en charge, ou un destructeur de pression Carnot placé après le by-pass.

Les vannes utilisées sont généralement sphériques. Certaines peuvent être commandées à distance et d'autres ne sont actionnables que manuellement. Cela dépend de leurs fonctions.

Dans le cadre de ma commande, les vannes commandées sont la vanne du by-pass, la vanne de garde et les pointeaux.

### 5.6.1. La vanne d'entrée

Cette vanne manuelle sert à couper l'arrivée d'eau dans toute la centrale. Ainsi, même le by-pass n'est plus alimenté. Elle permet la maintenance de l'équipement hydraulique de l'installation. Dépourvue de tout capteur, elle possède un système de verrouillage pour sécuriser l'installation lors de la maintenance.

### 5.6.2. La vanne de garde

Le rôle de la vanne de garde, manuelle ou télécommandée, est de sécher les injecteurs lors des révisions de maintenance. Sa position dans l'installation permet l'alimentation en eau du by-pass afin qu'un éventuel réservoir en aval de l'installation soit en permanence alimenté. Lorsqu'elle est commandée, elle est munie de capteurs de type fin de course pour informer l'automate de sa position.

### 5.6.3. La vanne du by-pass

En cas de défaut ou d'arrêt dans les installations d'eau potable, toute l'eau doit être évacuée par un by-pass pour continuer à alimenter réservoir en aval où sont reliés les consommateurs d'eau potable. La vanne du by-pass est uniquement munie de fin de courses informant sur son état d'ouverture et de fermeture. Un capteur linéaire n'est pas nécessaire pour cette vanne. Cependant, comme elle doit être actionnée lors d'arrêts, elle nécessite d'être pilotée par l'automate.

### 5.6.4. Destructeur de Carnot

Le destructeur de Carnot est une vanne à pointeau qui permet de dissiper la pression lorsque l'eau n'est pas turbinée.

## 5.7. La turbine

Comme convenu avec M. Caloz, seul le cas des turbines Pelton sera traité dans ce travail (Figure 39).



Figure 39 : Turbine Pelton

Afin de faciliter les opérations d'entretien de la turbine (§ 1.6.1), seules les machines à axe vertical seront prises en considérations.

Les injecteurs sont au nombre de deux au maximum. D'après leur fabrication, ils ont tendance à se fermer lorsque l'alimentation électrique est coupée. Chacun d'eux est muni d'un déflecteur qui permet de dévier le jet en cas d'arrêt de l'installation. Ainsi, on évite que l'alternateur parte en survitesse lors du déclenchement du disjoncteur de couplage. Ils sont commandés par ressort et possèdent un moteur électrique pour le réarmement. Des fins de courses à l'ouverture et à la fermeture sont installés afin de contrôler leur position.

Le rendement d'une Pelton est satisfaisant de 20 % à 100 % du débit maximum pour une turbine à un injecteur, et de moins de 10 % à 100 % pour une turbine à 2 injecteurs ou plus. La commande des pointeaux se fait par vérins électriques (signaux +,-) et sont munis d'un capteur de position linéaire ainsi que de fins de courses pour surveiller leur position.

## 5.8. L'équipement électrique

### 5.8.1. L'alternateur

L'alternateur est à axe vertical et à accouplement direct. Sa régulation se fait sur des machines synchrones comme asynchrones. Les deux modes de fonctionnement (parallèle, îlot) sont pris en charge. Les paliers et les enroulements font l'objet d'une surveillance grâce à des sondes de température. Afin d'avoir un point de mesure de la vitesse de rotation du groupe, un capteur à effet Hall y est installé. Cette mesure asservit toute la régulation. Les mesures telles que la puissance active et réactive, le  $\cos \varphi$ , la fréquence, la tension, le courant et le retour d'énergie de l'alternateur ne se font pas directement sur la machine mais dans le tableau de commande.

### 5.8.2. Connexion au réseau

La connexion au réseau s'effectue en 400 V / 50 Hz pour les réseaux standard. Cependant, ces paramètres pourront varier selon le pays où la centrale est prévue.

## 5.9. Contrôle commande

Comme les petites centrales peuvent être incluses dans des réseaux d'eau potable, leur régulation et leur exploitation doivent être des plus simple. Ainsi, les interventions du personnel d'exploitation sont réduites au minimum.

La commande est prévue pour fonctionner en mode parallèle ou en îlot. En îlot, seule la régulation vitesse-débit est traitée. Cependant, dans les deux cas de fonctionnement, la régulation est asservie au niveau de la chambre de mise en charge.

Les deux types de génératrices peuvent être installés et, dans le cas d'une machine synchrone, un dispositif de synchronisation est prévu.

L'installation peut fonctionner en mode automatique, manuel ou télécommandé.

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

Un système de télémaintenance est également installé afin de gérer et de collecter les données de la petite centrale à distance.

En cas de déclenchement du réseau, le redémarrage se fait de manière automatique. Il en est de même en cas d'arrêt consécutif à une alarme, si celle-ci disparaît sans l'intervention humaine.

Les réglages de tous les paramètres peuvent être réalisés sur place grâce à un touch-panel réunissant toutes les informations sur une interface illustrée. Ce touch panel contient au minimum les informations suivantes:

- Voltmètre, ampèremètre, wattmètre (active et réactive), fréquencemètre, mesure du  $\cos \varphi$ , synchronoscope, compte tour,
- Indicateur d'ouverture du pointeau,
- Indication du niveau amont,
- Indication de charge des batteries de secours,
- Compteur d'heures, compteur de démarrages,
- Températures des paliers et du bobinage de l'alternateur,
- Commande manuelle des consignes de charge, vitesse et tension
- Arrêt d'urgence (sur tableau)

Au minimum, les alarmes suivantes sont traitées :

- Alarme générale,
- Arrêt d'urgence,
- Arrêt sur défaut,
- Conditions de démarrage non remplies,
- Défaut réseau,
- Défaut séquence d'arrêt,
- Défaut séquence de démarrage,
- Niveau amont insuffisant,
- Surcharge alternateur,
- Survitesse,
- Palier alternateur,
- Bobinage,
- Retour de courant,
- Surcharge batterie,
- Défaut batterie.

La commande se fait en 24 VDC et est secourue par des batteries. Elle comprend un chargeur muni d'un contrôleur de charge.

Afin de garder un  $\cos \varphi$  proche de 0.9, une batterie de compensation peut être présente.

La commande se fait exclusivement par relais et automate programmable, choisi par mes soins, ce qui constitue la suite de mon travail de diplôme.



## 6. Structure proposée

### 6.1. Introduction

Étant donné que le but de mon travail était de développer un système standard de commande, il a fallu que je fixe plusieurs paramètres afin de proposer une solution plausible et avoir une idée précise lors des discussions avec les différents fournisseurs. Il sera nécessaire d'adapter le matériel selon les caractéristiques de l'aménagement considéré.

Les références utilisées proviennent d'un ancien projet exécuté par la maison Telsa SA. Voici les données que je nécessitais:

#### Aménagement

Longueur de la conduite	:	2000 m
Dénivellation	:	500 m
Diamètre nominal conduite	:	DN150
Température extérieure	:	-20°C à +30°C
Température de l'eau	:	4°C à 10°C
Installation des équipements	:	Intérieur
Réseau	:	400V / 50 Hz
Volume de régulation à la chambre de mise en charge	:	1 m <sup>3</sup>
Fonctionnement prévu	:	24/24, 365/365

#### Alternateur

Nombre	:	1
Fréquence	:	50Hz
Tension aux bornes	:	400V
Vitesse nominale	:	3000 tr/min
Vitesse d'emballément	:	5700 tr/min
Puissance	:	125 kW

Au cours de ce chapitre, je développe les caractéristiques principales de l'appareillage.

Le matériel choisi devra être adapté selon les caractéristiques des aménagements

## 6.2. L'automate

### 6.2.1. Introduction

Les automates programmables sont des systèmes informatiques spécialisés pour la commande. Leur programmation est réalisée par PC avec une application spécifique au fabricant de l'automate. Dans le cadre de ce projet, l'automate modulaire est celui qui convient le mieux pour réaliser une commande standard à différents aménagements. Un automate modulaire est composé d'un rack, d'une alimentation, d'une carte processeur, de cartes d'entrées/sorties (I/O) digitales et analogiques et, dans mon projet, d'une carte de communication pour la télémaintenance et d'un écran de contrôle (interface homme machine nommé également Touch-Panel). Des cartes de régulation peuvent être envisagées pour la régulation du débit et de la tension. Mais dans le cadre des petites centrales hydrauliques, les constantes de temps sont relativement grandes.

Un très grand nombre de fabricants, comme Siemens, Allen Bradley, Modicon et Saia, se partagent le marché.

La transmission des signaux peut être réalisée de trois façons:

- Transmission point à point
- Entrées/sorties déportées
- Réseau de terrain

La *transmission point à point* est un système centralisé où les signaux provenant des capteurs ou des actionneurs sont directement connectés à l'automate (Figure 40). Une installation de grande taille, qui demande de grandes longueurs de câble, pourrait occasionner des coûts élevés. D'autant plus si, pour une raison ou une autre, un câble devait être tiré après coup le long d'une conduite.

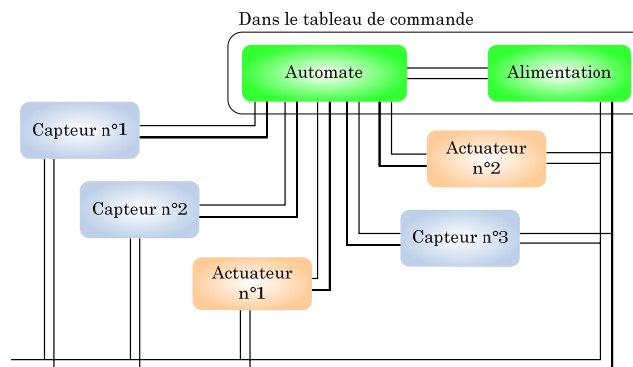


Figure 40 : Structure point à point

### Travail de diplôme

#### Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

Les *entrées/sorties déportées* se font sur des unités qui regroupent les signaux à proximité des capteurs et des actuateurs et sont en liaison avec l'automate à l'aide d'un câble unique et d'un protocole. Ce système permet d'économiser de grandes quantités de câble. Néanmoins, cette méthode présente un désavantage en cas de rupture du bus. En effet, tout un groupe de capteurs et d'actuateurs peuvent devenir inopérants. Cependant, il existe des versions sécurisées d'automates qui détectent ce type de défaillance à prix nettement plus élevé. Les protocoles les plus répandus sur le marché sont Profibus PA/DP, Modbus, Interbus, CAN, AS, Profi-S-Net, etc.

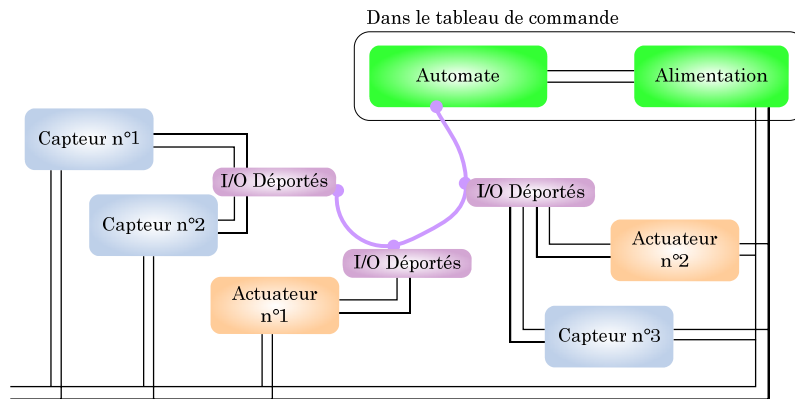


Figure 41 : Structure entrées/sorties déportées

La troisième possibilité est le *bus de terrain*. Il s'agit de relier chaque élément à l'aide d'une seule ligne. Chaque élément relié au réseau contient l'intelligence nécessaire pour échanger des données sur le réseau. Cela implique qu'un même protocole soit implémenté dans les différents capteurs et actuators. Ceci peut poser des problèmes lors du choix du matériel et peut entraîner des coûts supplémentaires par rapport à un capteur traditionnel. L'alimentation peut se faire par le même câble que le bus, si cela est réalisable, et dépend du fabricant et des longueurs de câbles. Les avantages sont donc l'économie de câblage et l'aisance à faire évoluer notre installation lorsque nous devons ajouter des composants.

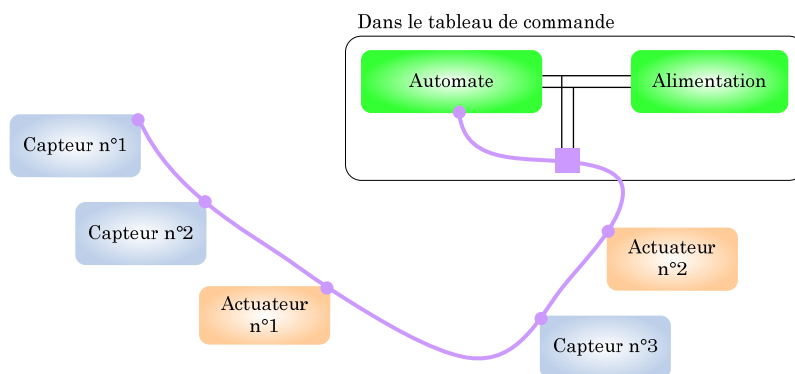


Figure 42 : Structure bus de terrain

### 6.2.2. Solutions proposées

Dans le cadre de ce travail, le problème se situe sur le tronçon de câble qui longe la conduite afin de récupérer les signaux de niveaux délivrés par les sondes et de commander le dégrilleur. Les solutions étudiées ici sont les transmissions points à points et entrées/sortie déportées. Après renseignements, il s'est avéré que le bus de terrain était inutilisable sur le tronçon qui relie la centrale aux capteurs de niveau. Et ceci en raison des grandes longueurs de câbles qui sont mises en jeu.

Ma manière de procéder a été de préparer une demande d'offre (voir annexe 3) réunissant tous les points importants afin que les fournisseurs puissent évaluer le coût de la partie automate. Dans un deuxième temps, j'ai choisi les fournisseurs qui seraient aptes à me proposer une solution.

Les fabricants que j'ai choisis sont Siemens du fait que la maison Telsa SA a l'habitude de travailler avec ce matériel, et Saia-Burgess, pour leurs prix intéressants.

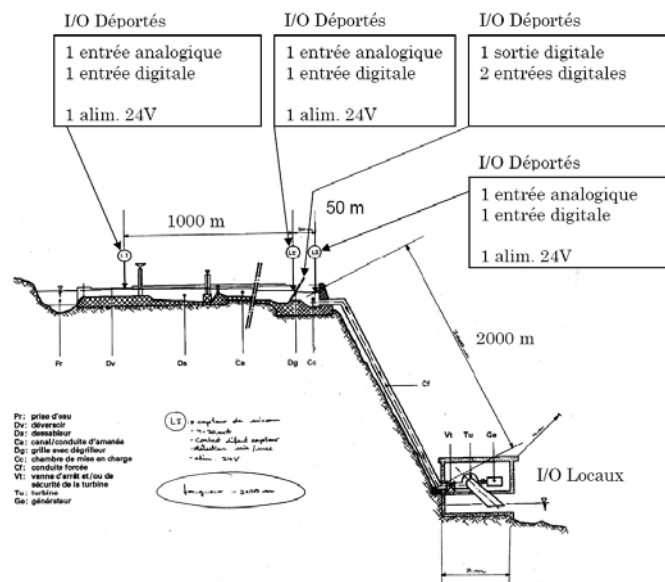


Figure 43 : Schéma soumis aux fournisseurs

Suite à plusieurs entretiens téléphoniques afin d'éclaircir l'environnement de la commande, ces maisons ont été en mesure de me proposer une solution.

Une précision que j'ai dû apporter durant ces entretiens, et que je trouve utile de citer ici, est le fait qu'une alimentation électrique du réseau est disponible au sommet de l'installation. Ce paramètre a pour conséquences une variation du coût et d'équipement à utiliser.

**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales  
 hydro-électriques

La proposition de Siemens (annexe 4) (Figure 44) consiste à relier un automate de type S7-300 aux I/O déportés par fibre optique double canal et de connecter, via des modules prévus à cette effet, les capteurs situés au sommet de l'aménagement. Le matériel pour la transmission par radiofréquences n'est pas fabriqué par Siemens mais est proposé par d'autres fabricants. Cependant, ce sujet n'est pas traité ici pour cause de sécurité. La télémaintenance se fait par GPRS, l'utilisateur n'ayant plus qu'à envoyer des mots clefs à un numéro prédéfini pour commander l'installation. De cette proposition, il en ressort un système de téléservice permettant le branchement de son PC distant à une ligne téléphonique, ou ISDN, et de configurer le programme de l'automate, donnant par la même occasion accès aux paramètres de la turbine. De plus, les cartes analogiques, munies d'entrées avec séparations galvaniques, détectent les coupures de lignes. Voici un schéma de principe de la proposition de Siemens :

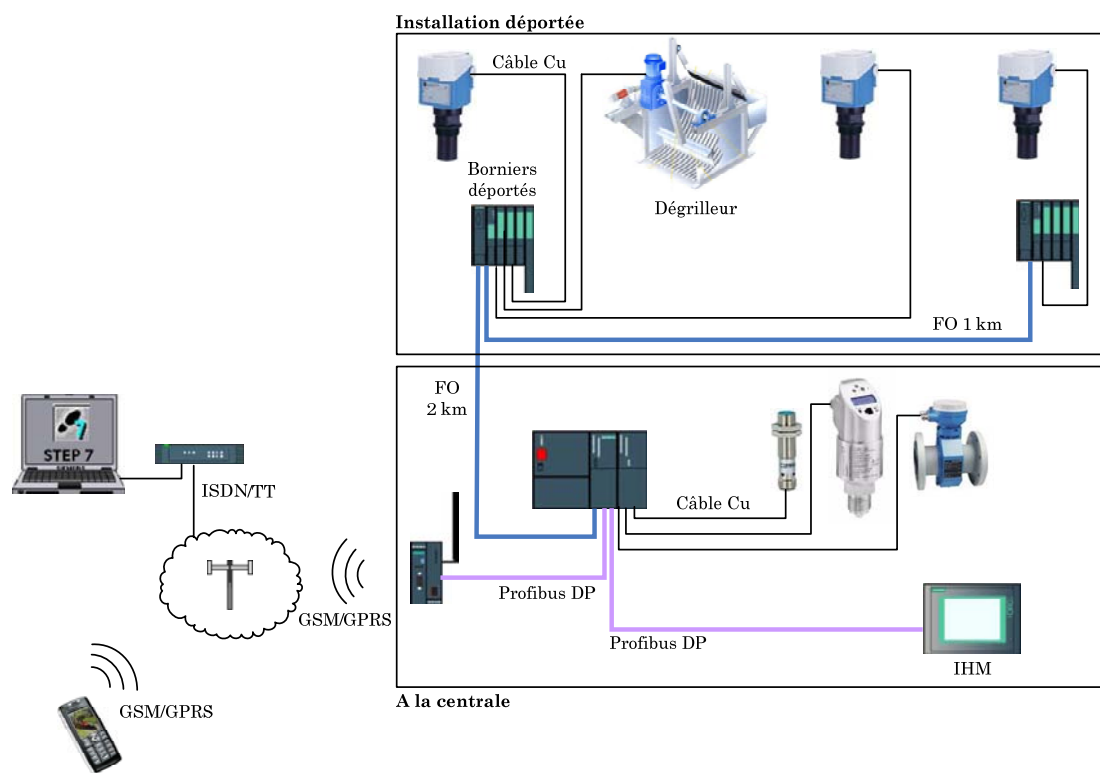


Figure 44 : Disposition de l'appareillage Siemens

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

La maison Saia-Burgess a opté pour une solution Profi-S-Bus (câble RS485) avec répéteurs sur le tronçon reliant les I/O déportés à la centrale (Annexe 5) (Figure 45). Aux emplacements où se trouvent les capteurs et le dégrilleur, des borniers déportés ont été prévus pour enficher les cartes d'entrées/sorties souhaitées. La télémaintenance se fait par réseau GSM. Le téléservice m'a aussi été proposé par Saia, mais par protocole Ethernet, ce qui permet d'avoir un accès au programme de l'automate et aux paramètres de la turbine via le Web.

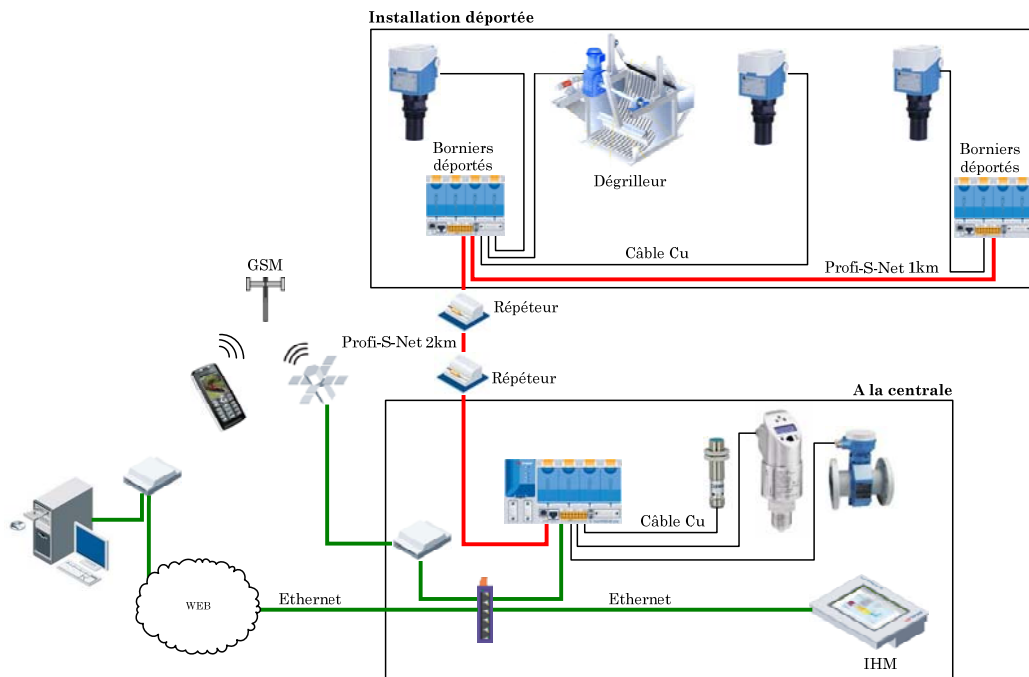


Figure 45 : Disposition de l'appareillage Saia

Dans l'offre de la maison Saia, il a fallu ajouter le câble permettant de faire la liaison entre la centrale et les I/O déportés.

Prix au mètre du câble pour RS485	: 6.89 Frs/m
Longueur de la ligne Profi-S-Net	: 3000 m
Prix du câble	: <u>20'670 Frs</u>

Je précise que dans un premier temps, la maison Saia m'a proposé une solution avec des modules d'I/O déportés à chaque capteur de niveau. Ne trouvant pas cette solution optimale, j'ai supprimé deux borniers déportés ce qui a légèrement baissé le coût de l'automate.

La troisième possibilité est de faire une *liaison point à point*. Mais après une brève étude du coût des câbles et de l'infrastructure à mettre en place, je me suis aperçu que le support de transmission est aussi cher que le matériel à utiliser dans les propositions faites par les deux fournisseurs. Donc cette solution ne sera pas envisagée, à moins que les longueurs de câbles soit plus courtes.

Donc après réflexion, j'ai opté pour la proposition de la maison Siemens qui est moins onéreuse que les autres. Néanmoins, une comparaison financière est faite au § 7.

## 6.3. Les capteurs

### 6.3.1. Introduction

Les capteurs présentés ici sont les plus importants pour qu'une petite centrale puisse produire de l'électricité. Ainsi, des capteurs comme ceux de la température extérieure ou des vibrations n'ont pas été pris en compte.

### 6.3.2. Les capteurs de niveau

Les capteurs de niveau généralement utilisés pour les installations hydrauliques sont des capteurs de pression capacitifs qui renvoient une indication de niveau absolue ou relative. Avec ces capteurs, il faut rester vigilant à ce que la vitesse de l'écoulement ne soit pas trop élevée. En effet, selon le principe de Bernoulli, un changement de la vitesse d'écoulement entraîne un changement de pression dynamique et, par conséquent, du niveau indiqué par le capteur. Ainsi, un système de mesure hydrostatique est mis en place. La meilleure solution est d'encastrer tout le dispositif à l'intérieur de la paroi, comme représenté à la Figure 46. Cependant, cela demande des travaux de génie civil.

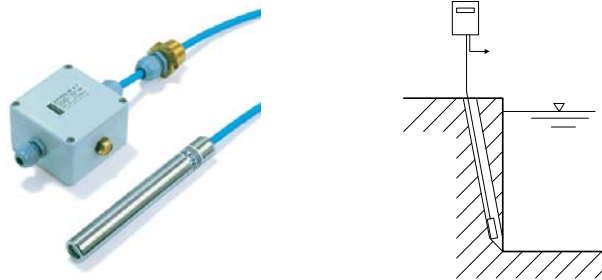


Figure 46 : Capteur de niveau capacitif et disposition

Le signal renvoyé à l'automate est du type analogique 4-20 mA. Ces capteurs sont munis de contacts défaut permettant de signaler une éventuelle défaillance. Ils sont également équipés d'un système de détection de niveau min et max et sont compatibles avec les bus de terrain Profibus.

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

Les capteurs de niveau à ultrasons sont également intéressants car leur montage ne demande pas de structure spéciale dans le béton comme pour les capteurs capacitifs (Figure 47). De plus, ils ont les mêmes propriétés en ce qui concerne les contacts de défaut, les seuils et le mode de communication. Ils présentent l'avantage qu'ils peuvent être configurés pour une mesure de débit au déversoir. Dans notre projet, ils sont au nombre de trois.



Figure 47 : Capteur de niveau à ultrasons

Fabricant	Endress+Hauser
Type	Proline Promag 50W
Portée dans les liquides	5m
Sorties	- 4-20mA - Profibus
Signal de défaut	- Affichage local - Sortie de courant réglable - Interface numérique
Temps de réaction	$\geq 0.5s$ (dépend des paramètres)
Résolution	1mm
Fréquence de mesure	2Hz
Classe de protection	IP67

En cas de raccordement point à point, il se peut que la chute de tension, due à la longueur des câbles, perturbe le système. J'ai donc choisi un raccordement sur quatre fils (2 fils alim 24V et 2 fils signal 4-20mA) qui présente en plus l'avantage de posséder un temps de réaction plus élevé que la version à deux fils.

Voir annexe 6.



### 6.3.3. Le capteur de pression

Le capteur de pression est également appelé pressostat (Figure 48). Il est installé sur le collecteur de la machine afin de surveiller la mise en pression de l'installation et de prévenir les défauts de la conduite ou des raccords. Il est équipé d'une sortie analogique de 4-20mA et de sorties digitales permettant de signaler d'éventuels défauts de l'appareil ainsi que des seuils min et max. Il possède aussi le protocole Profibus DP. Le modèle choisi est équipé d'un petit écran LCD permettant la programmation sur place et l'affichage des éventuels défauts. Ce capteur s'adapte aux normes hygiéniques dans le cas de turbinage d'eau potable.



Figure 48 : Photo du pressostat

Fabricant	Endress+Hauser
Type	Ceraphant T PTP31
Gamme de mesure	0 à 100 bar (réglable)
Grandeur de mesure	absolue et relative
Sorties	- 4-20mA - Profibus DA
Sortie digitale	TOR 24Vdc
Tension d'alimentation	24 Vdc
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C
Classe de protection	IP65

Lors du choix du capteur, il a fallu choisir une plage de mesure et, pour se faire, un petit calcul de pression s'est imposé. La pression à mesurer est la pression maximum qu'il peut y avoir dans la conduite. Cette pression peut être estimée lorsque l'installation n'est pas en service et que l'eau ne circule pas, grâce à la formule suivante:

$$p = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{10^5} \quad [\text{bar}]$$

Voir annexe 7.

### 6.3.4. Le débitmètre

Un débitmètre est prévu sur la conduite principale, afin de connaître la quantité d'eau qui passe au travers de notre installation. D'après l'analyse de risque, il peut également aider à la détection de plusieurs défaillances. Le modèle électromagnétique a été choisi pour notre projet car les pertes de charge sont nulles (Figure 49).



Figure 49 : Capteur de débit électromagnétique

Fabriquant	Endress+Hauser
Type	Proline Promag 50W
Gamme de mesure	0.01 à 10 m/s
Grandeur de mesure	Vitesse d'écoulement
Sorties	- 4-20mA - Profibus
Signal de défaut	TOR 24Vdc
Tension d'alimentation	24 Vdc
Température de fonctionnement	-20C à +60
Classe de protection	IP67

Voir annexe 8.

### 6.3.5. Le capteur de vitesse

Pour le capteur de vitesse j'ai opté pour une solution sans contact (Figure 50). Il nécessite un usinage spécial sur l'arbre mais présente l'avantage d'être facilement démontable.



Figure 50 : Capteur de vitesse et son convertisseur de signal

Fabriquant	Jaquet
Type	T401/402
Gamme de mesure	0 à 5000 tr/min
Sorties	4-20mA ou 2-10V
Signal de défaut	TOR 24Vdc
Tension d'alimentation	24 Vdc
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C
Classe de protection	IP40 (capteur) IP20(convertisseur)

Le capteur mesure la vitesse à l'arbre et transmet son signal au convertisseur qui enverra son signal 4-20mA ou 2-10V à l'automate. La sortie en tension a été choisie.

Voir annexe 9.

## 6.4. Les actionneurs

### 6.4.1. Le vérin

Le vérin, comme mentionné dans le cahier des charges, est commandé par un vérin électrique et est surveillé par un capteur de position linéaire et deux autres tout ou rien.



Figure 51 : Vérin électrique, capteur de position linéaire et fin de course

Vérin électrique :

Fabriquant	SKF
Type	CATR32Bx200x1A2G2F/C24CU
Gamme de mesure	0 à 200 mm
Sorties	4-20mA
Tension d'alimentation	24 Vdc
Vitesse	17-11 mm/s
Charge applicable	3000 N
Courant de consommation	16 A
Classe de protection	IP65

Ceci implique que lorsque l'on pressera sur le bouton -, le vérin se fermera jusqu'à ce que le bouton soit relâché. Il en va de même pour l'ouverture. Voir annexe 10.

Capteur de position linéaire :

Fabriquant	Sensorex
Type	CER300
Gamme de mesure	± 150 mm
Sorties	4-20mA
Consommation	TOR 24Vdc
Tension d'alimentation conv.	24 Vdc
Température de fonctionnement	-40°C à +80°C
Classe de protection	IP67

Le capteur de position possède également son convertisseur alimenté en 24Vdc et délivre un signal de 4-20mA à l'automate. Voir annexe 11.

Fin de course :

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

Fabriquant	Baumer
Type	IFRM 18P17A3/S14L
Portée	8 mm
Circuit de sortie	PNP à fermeture
Tension d'alimentation	24 Vdc
Température de fonctionnement	-25°C à +75°C
Classe de protection	IP67

Voir annexe 12.

### 6.4.2. Les vannes pilotées

Les vannes pilotées sont commandées électriquement grâce à la présence d'un moteur (Figure 52). Chacune d'elle est équipée de fin de courses intégrés. Certains fabricants livrent avec leurs vannes un relais détectant les surcharges du moteur (entrée automate prévue). La commande peut se faire par un bus de terrain Profibus ou par méthode traditionnelle. Certains modèles peuvent même être équipés d'une batterie qui alimente le système lors de coupure du réseau électrique. En annexe 13 se trouve les caractéristiques d'un modèle qui pourrait parfaitement convenir à une installation hydroélectrique.



Figure 52 : Vanne pilotée

## 6.5. L'équipement des mesures électriques

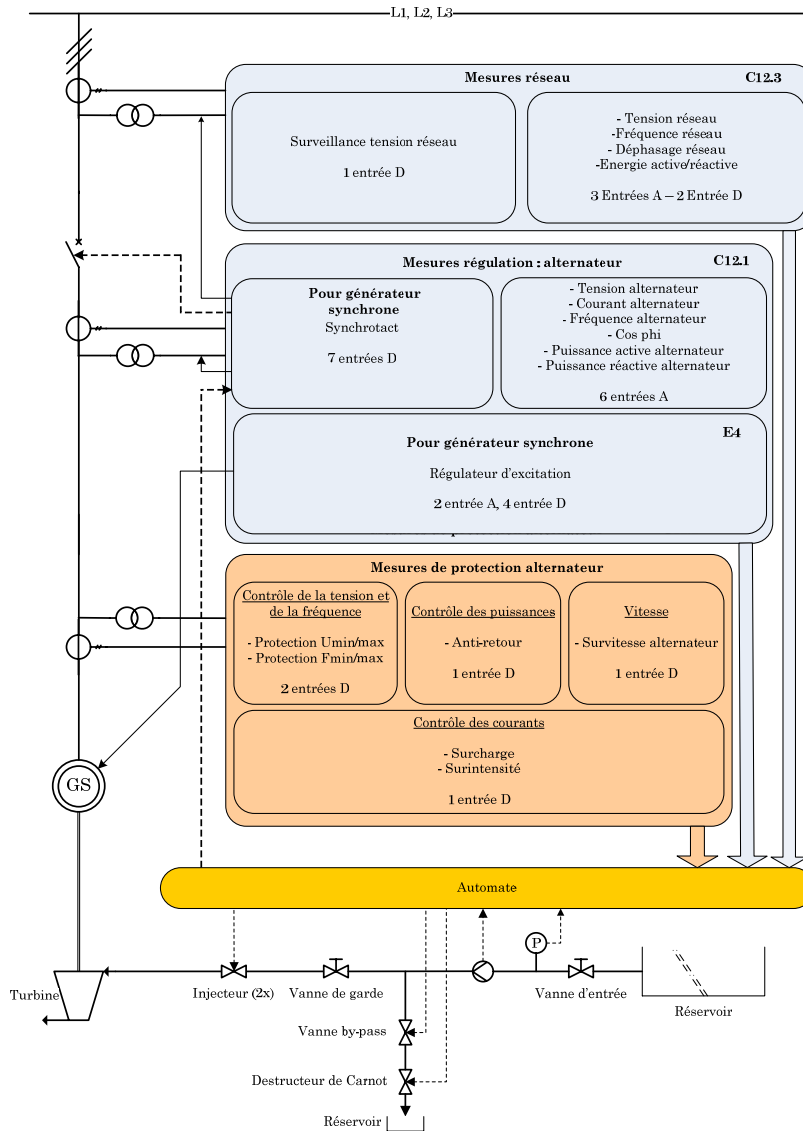


Figure 53 : Schéma de principe des mesures électriques

### 6.5.1. Mesures du réseau

Les mesures de réseau sont effectuées à l'entrée du tableau de commande et sont transmises à l'automate. Certaines servent à la régulation et d'autres ne sont que des indicateurs.

En ce qui concerne la surveillance de la tension du réseau, j'ai prévu un relais permettant de détecter les sur et sous-tensions, les désordres des phases et les écarts de

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

fréquence et de déphasage (Figure 54). L'automate récupère tous ces signaux. Voir annexe 14.

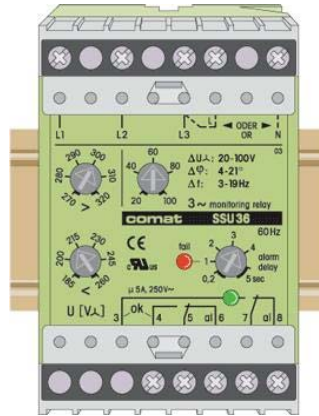


Figure 54: Relais surveillance tension réseau

Fabriquant	Comat
Type	SSU34
Tension nominal	230/400Vac
Fréquence	50 Hz
Surtension $>U_{max}$	235-275V Y / 410-480V Δ
Sous-tension $<U_{min}$	160-225V Y / 280-390V Δ
Plage de différence	IP67

Afin de caractériser le réseau, il est prévu des prises de tensions et des transformateurs de courant (TI) qui, au travers d'un convertisseur, envoient les données à l'automate. Les paramètres mesurés sont les suivants :

- Tension
- Courant
- Déphasage
- Energie active/réactive

Le convertisseur récupère les différentes grandeurs citées ci-dessus et fournit quatre signaux de sorties analogiques (Figure 55). Les caractéristiques de cet appareil conviennent parfaitement à notre utilisation (annexe 15).



Figure 55 : Convertisseur de mesures DME 442

### 6.5.2. Mesures de régulation

Les mesures de régulation et de synchronisation se situent en aval du disjoncteur de couplage, elles permettent la régulation de la turbine et de l'alternateur. Les paramètres mesurés sont les suivants :

- Tension
- Courant
- Fréquence
- Déphasage
- Puissance active
- Puissance réactive

Ces mesures sont effectuées avec le même convertisseur que les mesures de réseau.

Dans le cas d'une génératrice synchrone les disjoncteurs de couplage ne doivent être fermés que lorsque les tensions des deux côtés du disjoncteur ouvert sont synchrones, il est nécessaire d'y installer un dispositif de synchronisation. Cela demande une grande précision. Voir annexe 16.

Ce modèle de ABB convient parfaitement à cette application (Figure 56).



Figure 56 : Synchronotact ABB SYN5202

Cet appareil peut synchroniser l'alternateur en mode automatique en réglant lui-même les consignes de tension et de fréquence. La synchronisation manuelle est assurée par un dispositif de surveillance (Synchrocheck), qui sera placé en série avec le bouton ou le signal d'ordre de mise en parallèle (Figure 57).

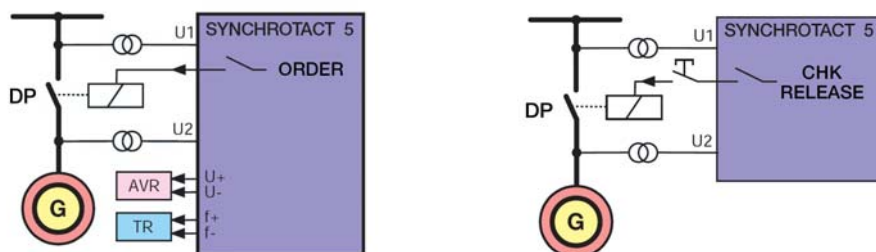


Figure 57 : Schéma de principe synchronotact



Et toujours pour les génératrices synchrones, le régulateur de tension.



Figure 58 : Régulateur de tension pour machine synchrone ABB Unitrol 1000-15

Ce régulateur maintient stable la tension aux bornes du générateur dans le cas d'ilotage, régule la puissance apparente ou le  $\cos \varphi$  et permet également de limiter le courant statorique et rotorique (annexe 17).

### 6.5.3. Mesures de protection de l'alternateur

Les mesures de protection servent à détecter une éventuelle défaillance de l'alternateur afin que l'automate puisse prendre les mesures nécessaires. Comme le but de ces mesures est la protection de l'alternateur, le matériel choisit est très spécifique. Cet appareillage provient du même fabricant, Woodward SEG, spécialiste dans le domaine. Voici les paramètres contrôlés :

- Surveillance tension et fréquence
- Contrôle anti-retour
- Survitesse
- Contrôle des courants (Surcharge, surintensité)

#### 6.5.3.1. Surveillance tension-fréquence

Le relais surveillance tension-fréquence présente une différence à celui prévu pour les mesures de réseau. Celui que je propose ici est conçu pour les génératrices. Il indique l'origine de la défaillance ( $>f$  /  $<f$ ,  $>U$  /  $<U$ ) et contrôle toutes les phases séparément, ce qui n'est pas le cas pour la surveillance du réseau (Figure 59).

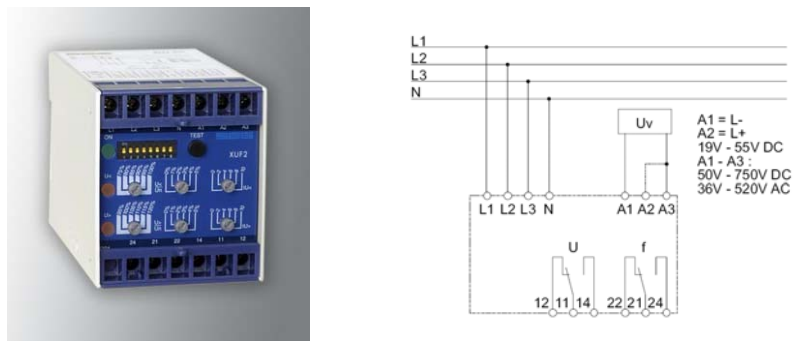
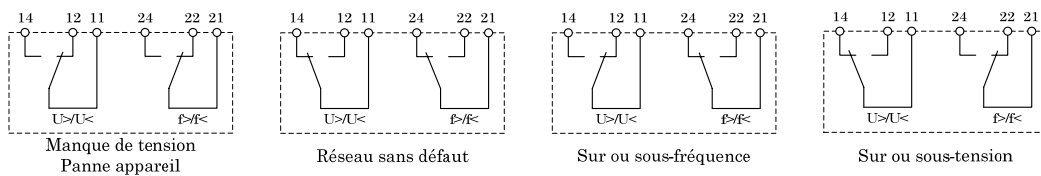


Figure 59 : Relais de surveillance tension-fréquence XUF2

Voici le système qui est utilisé pour différencier l'origine des défauts:



Caractéristiques en annexe 18.

### 6.5.3.2. Relais de puissance anti-retour

Le relais anti-retour permet de détecter un retour de puissance. En effet, les générateurs peuvent se mettre à tourner en moteur, et ceci n'est pas désiré dans les installations hydroélectriques. Dans le schéma de câblage présenté ci-dessous, on peut distinguer un TI, en effet un jeu de trois TI et de prises de tension sont placés entre la génératrice et les prises de mesures de régulation (Figure 53, Figure 60).

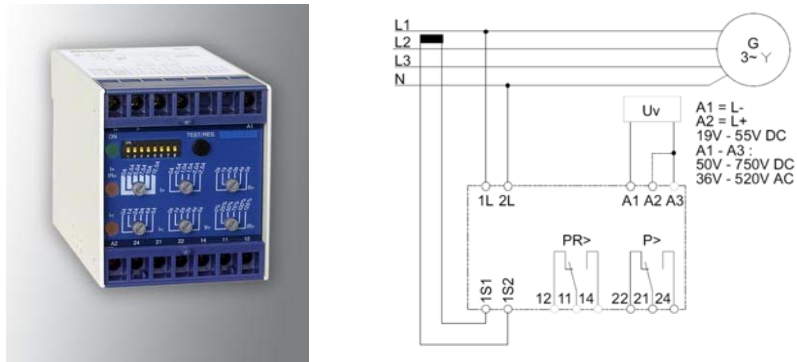
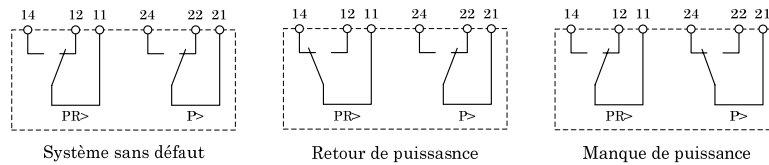


Figure 60 : Relais anti-retour XP2-R

Voici la position des contacts dans les différents cas de figure:



Caractéristiques en annexe 19.

### 6.5.3.3. Relais surveillance vitesse

La vitesse est aussi un paramètre à surveiller. La génératrice et la turbine ont des vitesses d'emballement à ne dépasser en aucun cas (Figure 61).

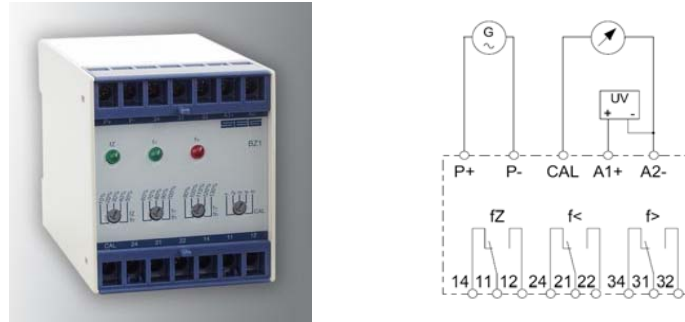
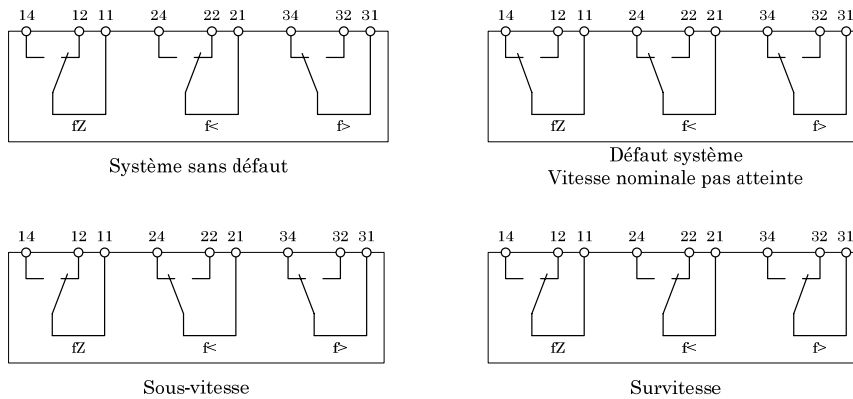


Figure 61 : Relais surveillance vitesse BZ1-G

Voici la position des contacts dans les différents cas de figure:



Caractéristiques en annexe 20.

**6.5.3.4. Relais surveillance courant**

Un contrôle des courants est aussi effectué afin d'éviter les surcharges ou les court-circuits qui pourraient endommager l'alternateur. Sur le modèle de la Figure 62, le courant de surcharge, de court-circuit et les temps admissibles peuvent être réglés.

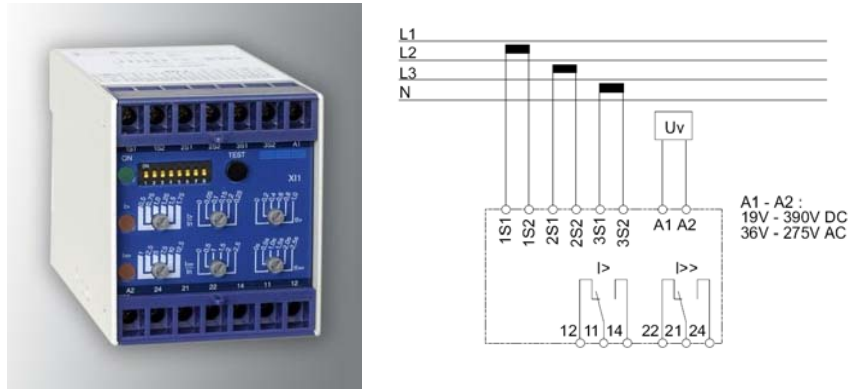
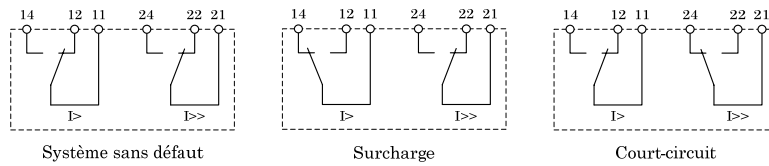


Figure 62 : Relais surveille courant XI1-I

Position des contactes :



Caractéristiques en annexe 21.

## 7. Analyse des coûts

### 7.1. Introduction

Dans ce chapitre, il s'agit d'évaluer le coût de cette commande standard pour petites centrales hydrauliques. Ces coûts vont varier selon la configuration de l'installation.

Ici est considéré un aménagement complet, comme présenté tout au long de ce travail. Le nombre d'injecteurs est aussi un facteur à prendre en compte. Dans notre cas, il n'y en a qu'un.

Les vannes n'entrent pas dans cette évaluation car j'estime qu'elles font parties du matériel hydraulique. Elles sont tout de même prises en considération dans la commande.

Les sondes de température pour l'alternateur et les paliers font partie des fournitures du fournisseur d'alternateur. Elles ne sont donc pas prises en compte dans mon évaluation.

Les coûts changent également selon le matériel qui a été choisi. Le matériel que j'ai choisi est en partie celui déjà utilisé par la maison Telsa SA. Le reste du matériel a été choisi par mes soins. Une comparaison des prix chez plusieurs fabricants aurait été la manière optimale de réduire les coûts. Cependant, comme le temps est compté pour ce travail, cette solution n'a pu être envisagée.

## 7.2. Le coût du matériel

Voici le tableau récapitulatif du matériel qui entre dans les régulations sauf exceptions.

Tableau 10 : Table récapitulatif du coût du matériel qui entre dans l'estimation

Quantité	Matériel	Fabricant	Type	Prix unitaire	Prix
3	Capteur de niveau à ultrasons	Endress+Hauser	Prosonic M FMU40	SFr. 1'583.00	SFr. 4'749.00
1	Capteur de pression	Endress+Hauser	PTP31	SFr. 325.00	SFr. 325.00
1	Débitmètre	Endress+Hauser	Promag 50W	SFr. 4'494.00	SFr. 4'494.00
1	Vérin pointeau	SKF	CATR32Bx200x1A2G2F/C24CU	SFr. 870.00	SFr. 870.00
1	Capteur de position linéaire pointeau	Sensorex	CER 300	SFr. 1'780.00	SFr. 1'780.00
4	Capteur de proximité inductif	Baumer	IFRM 18P17A3/S14L	SFr. 42.00	SFr. 168.00
1	Capteur de vitesse	Jaquet	T411	SFr. 1'006.00	SFr. 1'006.00
0	Automate	Siemens	S7-300	SFr. 29'157.00	SFr. -
1	Automate	Saia	PCD 3	SFr. 16'806.00	SFr. 16'806.00
1	Câble Profi-S-Bus	Distrelec	RS485	SFr. 20'670.00	SFr. 20'670.00
1	Relais de surveillance tension réseau	Comat	SSU34	SFr. 209.50	SFr. 209.50
1	Surveillance tension fréquence alternateur	WoodWard SEG	XUF2	SFr. 1'130.00	SFr. 1'130.00
3	Convertisseur de mesures	Camille Bauer	Sineax DME 442	SFr. 1'330.00	SFr. 3'990.00
1	Relais anti-retours	WoodWard SEG	XP2-R	SFr. 661.00	SFr. 661.00
1	Relais surveillance vitesse	WoodWard SEG	BZ1-G	SFr. 284.00	SFr. 284.00
1	Surveillance courant	WoodWard SEG	X11-I	SFr. 954.00	SFr. 954.00
1	Synchrotact	ABB	Synchrotac 5 SYN 5202-3271	SFr. 7'895.00	SFr. 7'895.00
1	Régulateur excitation	ABB	Unitrol 1000-15	SFr. 8'700.00	SFr. 8'700.00
0	Compensation 75 kvar	Tri-Elec	-	SFr. 3'866.00	SFr. -
<b>Total</b>					<b>SFr. 74'691.50</b>

Comme précisé dans l'introduction, plusieurs variantes sont envisageables (Tableau 11).

Tableau 11 : Comparaison du coût du matériel

Variante		Coût matériel					
		Excitation	Synchrotact	Compensation	Saia	Siemens	
Variante 1	Parallèle	Synchrone	X	X		SFr. 74'691.50	SFr. 66'372.50
Variante 2		Asynchrone			X	SFr. 61'962.50	SFr. 53'643.50
Variante 3	Îlot	Synchrone	X	X		SFr. 74'691.50	SFr. 66'372.50

Figure 63 : Comparaison du coût du matériel

La variante îlot avec machine asynchrone ne fait pas partie de cette évaluation car, comme cité dans la première partie du rapport, elle demande une électronique de puissance qui ferait beaucoup varier le coût.

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

Nous pouvons remarquer que le choix du fabricant de l'automate est prépondérant dans l'évaluation des coûts. Le deuxième paramètre qui ressort est le type de génératrice utilisé. Les machines synchrones sont en effet plus onéreuses et demandent un équipement de commande très coûteux. Il s'agit maintenant d'évaluer les performances techniques des différentes variantes. Je précise que le type de générateur est choisi selon la qualité de l'énergie électrique fournie au consommateur (tolérances tension, fréquence).

Lors de ma recherche d'informations sur les installations hydroélectriques, j'ai pu constater les données suivantes [1]:

En fonctionnement parallèle, la machine synchrone est plus avantageuse pour des puissances jusqu'à 50kVA voir 100kVA. Pour des puissances moyennes, au-dessus 100kVA, les prix sont compétitifs du fait que les machines asynchrones de cette puissance ne sont pas disponibles couramment.

En fonctionnement en réseau isolé, jusqu'à 25 kVA, la génératrice asynchrone est plus avantageuse, à condition d'accepter des variations de fréquence et de tension. Comme cité à plusieurs reprises, les génératrices synchrones sont les plus courantes dans ce type de fonctionnement.



## 8. La commande

### 8.1. Introduction

Les procédures de mise en marche ou d'arrêt des installations hydrauliques, qu'elles soient en îlot ou en parallèle, avec générateur synchrone ou asynchrone, sont les mêmes à quelques près. Les différences se situent au niveau de la compensation pour les machines asynchrones et de l'excitation et de la précision des valeurs de tensions, fréquences et phases lors du couplage pour les génératrices synchrones. En effet, une machine asynchrone n'a pas besoin de la même précision des paramètres électriques qu'une machine synchrone, qui elle nécessite un dispositif très pointu de synchronisation. C'est pourquoi mon programme est divisé en deux parties, dont chacune concerne un type de machine.

La commande des éléments comme le by-pass, le destructeur de Carnot et la vanne de garde si celle-ci est pilotée, n'est pas traitée.

Le langage que j'ai choisi pour développer ces différentes phases de fonctionnement est le Grafcet. Cette technique a pour avantage d'être simple à comprendre et à lire, et peut être implémentée dans un grand nombre d'automates.

### 8.2. Gestion des modes

Un système automatisé est complexe et l'installation des modes de marches et d'arrêts est difficile. C'est pour cela qu'un groupe de travail réuni sous l'égide de l'ADEPA (Agence pour le Développement de la Productique Appliquée à l'industrie) a mis au point un guide graphique. Ce guide se nomme GEMMA (Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts).

Cet outil graphique permet d'exprimer clairement dès l'étude, les modes de marches et d'arrêts puis de les réaliser.

Voici le schéma général utilisé :

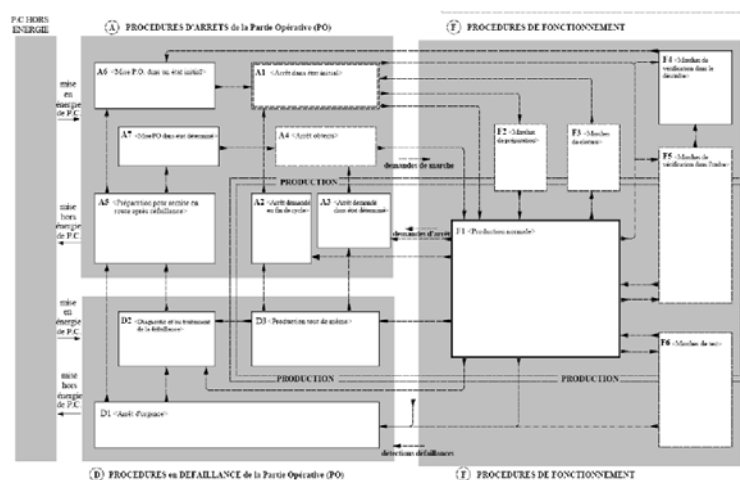


Figure 64 : Schéma du GEMMA

Ce graphique se divise en trois parties :

- Les procédures de fonctionnement
- Les procédures d'arrêts
- Les procédures de défaillance

Les procédures de fonctionnement se divisent en six états : « F1 - production normale », « F2 - marche de préparation », « F3 - marche de clôture », « F4 - marche de vérification dans le désordre », « F5 - marche de vérification dans l'ordre » et « F6 - marche de test ». Tous les états ne sont nécessairement utilisés. Ici, ne sont utilisés que l'état « F1 - production normale » et l'état de « F5 - vérification dans l'ordre »

Dans l'état de production normale (F1), la machine produit normalement. Ce qui correspond aux grafquets de la Figure 69 et de la Figure 72. L'état « de vérification dans l'ordre » permet de vérifier la séquence de démarrage au rythme voulu par la personne qui désire contrôler toutes les étapes de démarrage. Les grafquets sont les mêmes que ceux utilisés dans les démarrages mais des conditions supplémentaires sont implémentées sur chaque transition et les boutons de réglages manuels apparaissent (entre autres vitesse, tension, charge).

Les procédures d'arrêt sont découpées en sept états. L'arrêt « A1 - dans l'état initial » correspond à la situation initiale des grafquets de la Figure 69 et de la Figure 72. L'arrêt « A2 - obtenu en fin de cycle » correspond à un arrêt normal. L'arrêt « A4 - obtenu », n'est pas utilisé. L'état « A5 - préparation pour remise en route après défaillance » est utilisé afin que l'installation redémarre après une coupure de réseau par exemple. On trouve aussi un état « A6 - mise de la partie opérationnelle dans l'état initial », cet état permet de remettre l'installation dans son état initial manuellement ou automatiquement à la suite d'une défaillance ou lors de la mise en service de l'installation. Et pour finir, l'état « A7 - mise de la partie opérationnelle dans un état défini », n'est pas utilisé.

Les procédures de défaillance se divisent en trois états :

- Arrêt d'urgence - D1
- Diagnostic et/ou traitement de défaillance - D2
- Production tout de même – D3

Les états D1 et D2 sont utilisés.

Après avoir déterminé les états qui font partis de la commande, il s'agit de reprendre le schéma GEMMA et de noter dans tous les rectangles d'états choisis une description du fonctionnement attendu.

En un deuxième temps il faut biffer tous les états non utilisés et tracer les transitions qui relient les états restants en y indiquant les conditions (Figure 65).

A partir de l'imprimé complété, il est possible d'obtenir un grafquet de conduite (Figure 66), appelé aussi grafquet de gestion des modes. Il gèrera les états de la machine

**GEMMA** Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts

**LEGENDE**  
P.O. = Partie Opérative  
P.C. = Partie Commande

**Références de l'équipement**

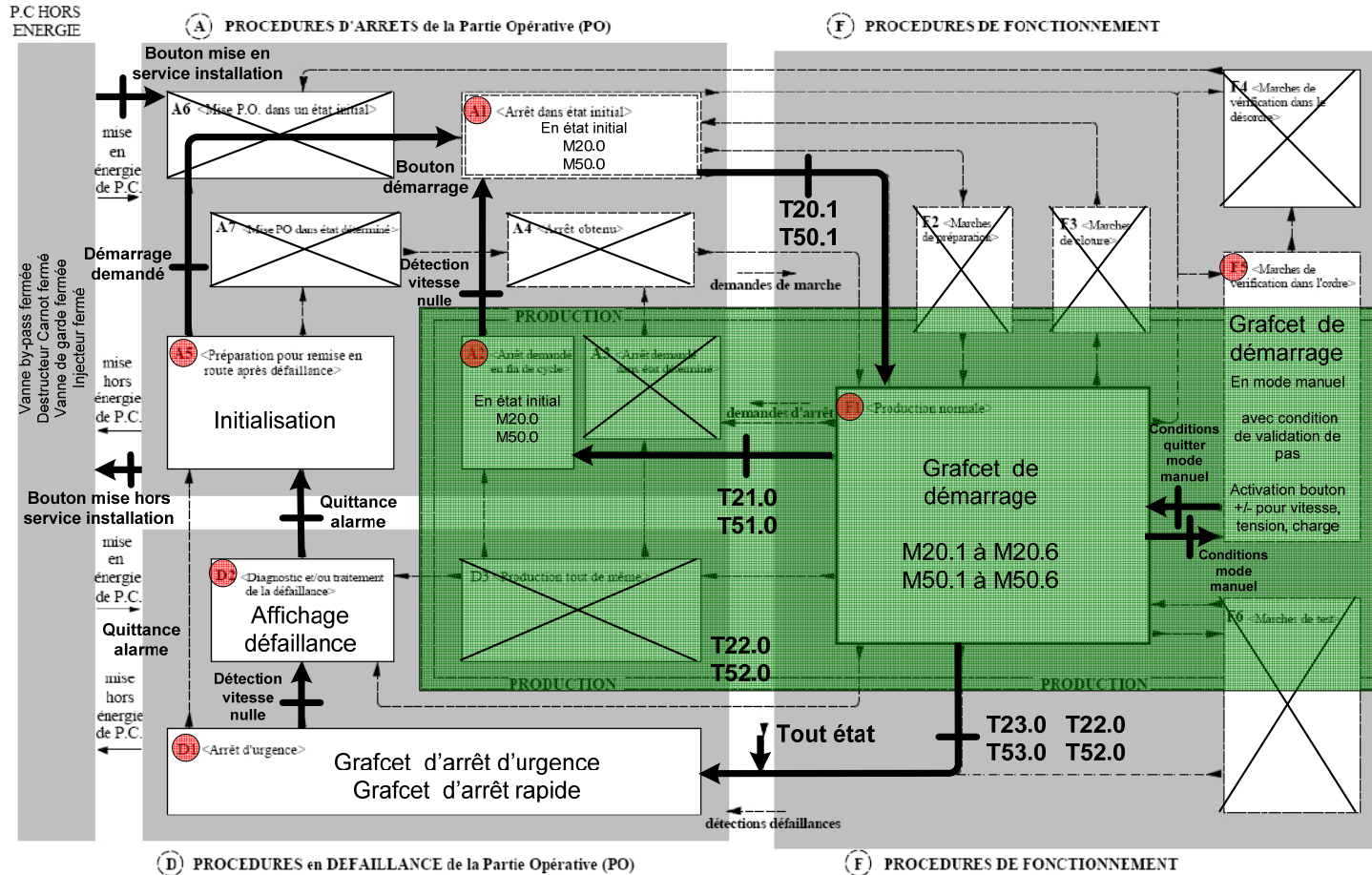


Figure 65 : Schéma GEMMA complété

**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

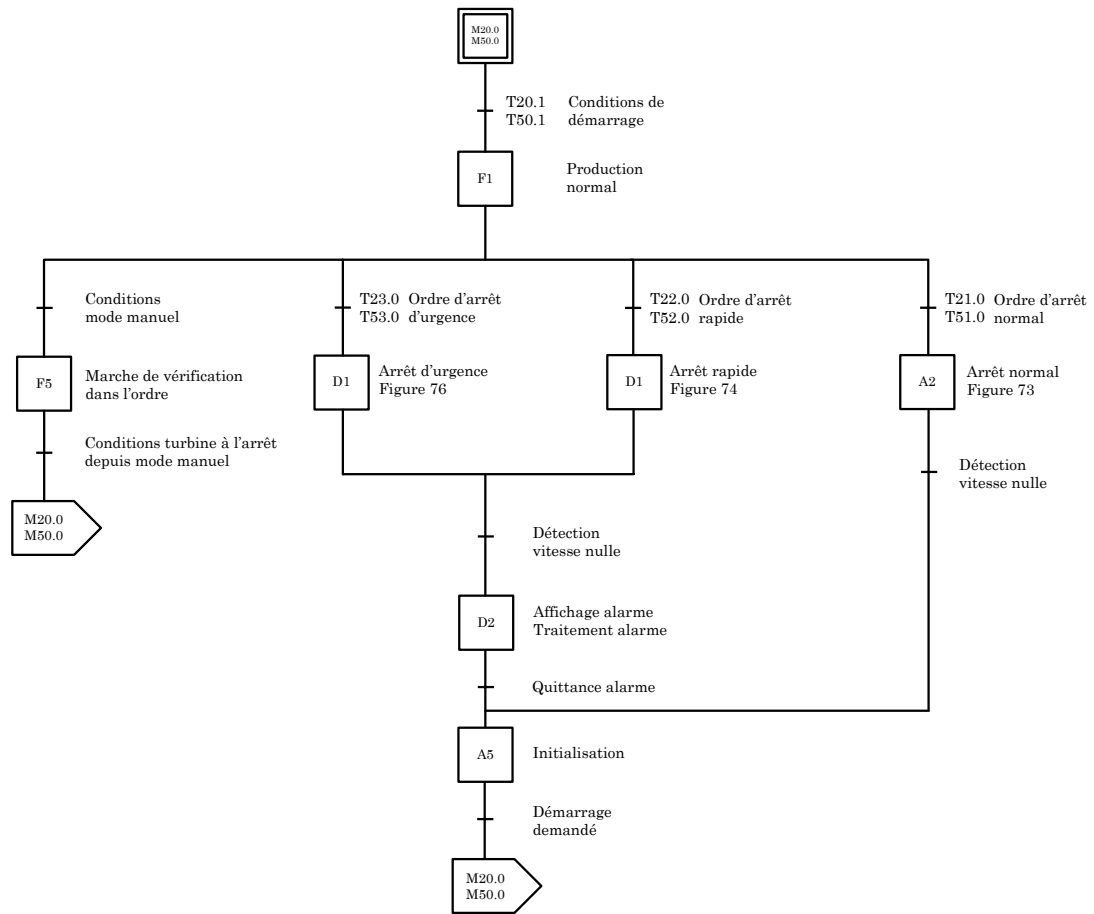


Figure 66: Grafcet de gestion des modes

### 8.3. Démarrage du groupe

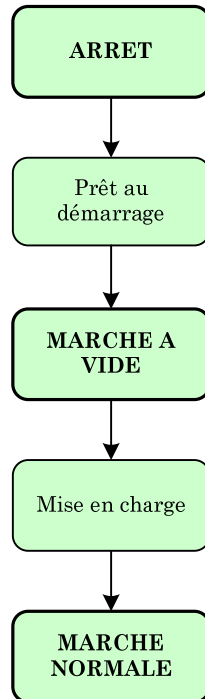


Figure 67 : Séquence de démarrage

La séquence de démarrage est une succession d'états qui permettent de passer de l'état d'arrêt à l'état de marche de production (Figure 69Figure 72).

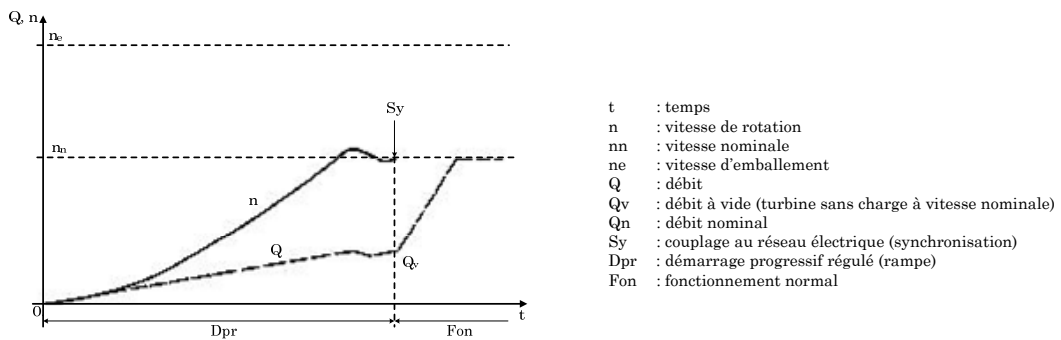


Figure 68 : Démarrage du groupe

#### Arrêt

L'état « Arrêt » caractérise l'installation lorsqu'elle est hors service. La turbine ne tourne pas, les injecteurs sont fermés, les déflecteurs sont engagés, la vanne de sécurité, du by-pass et d'entrée sont ouvertes. Un éventuel destructeur de Carnot serait également ouvert. L'alternateur est quant à lui débranché du réseau.

Lorsqu'une alarme ou un arrêt est demandé l'installation mettra dans cet état.

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales  
hydro-électriques

### Séquence de démarrage

La séquence de mise en marche est l'étape où l'installation est prête au démarrage. La turbine va alors pouvoir se mettre à tourner jusqu'à la marche à vide.

### Marche à vide

Lorsque la turbine tourne proche de la vitesse de synchronisation (sans charge) correspond à la phase de marche à vide. Le disjoncteur de couplage est ouvert et le pointeau n'est ouvert qu'à  $\approx 30\%$  de sa course maximale.

C'est à ce moment qu'il faut alimenter l'excitation de la machine synchrone, au moyen d'une source variable à courant continu (régulateur de tension), jusqu'à obtenir la tension nominale aux bornes stator.

### Mise en charge

La mise en charge est l'instant où l'on va fermer le disjoncteur de couplage. Lorsque le disjoncteur se ferme, l'alternateur est chargé et la vitesse chute, c'est à ce moment qu'il faut ouvrir les pointeaux afin de libérer toute l'énergie hydraulique mise à disposition lors de l'accumulation.

Il y a aussi enclenchement de la batterie de condensateurs, s'il y a compensation du  $\cos \varphi$ .

### Marche normale

La marche normale représente l'état où la machine produit normalement, les consommateurs ou le réseau sont branchés.

Les régulateurs de fréquence et de tension, ou éventuellement le régulateur par charge ballast, entrent automatiquement en fonction sitôt que la vitesse synchrone est atteinte.

Voici les graficets correspondant :



**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales  
 hydro-électriques

Certaines conditions comme celles de démarrage et de synchronisation sont détaillées grâce à un schéma bloc :

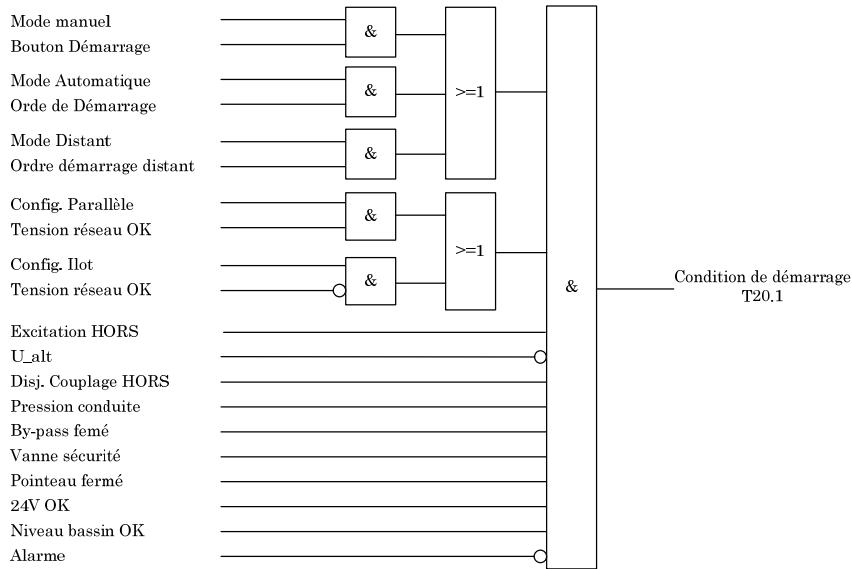


Figure 70 : Conditions de démarrage générateur synchrone

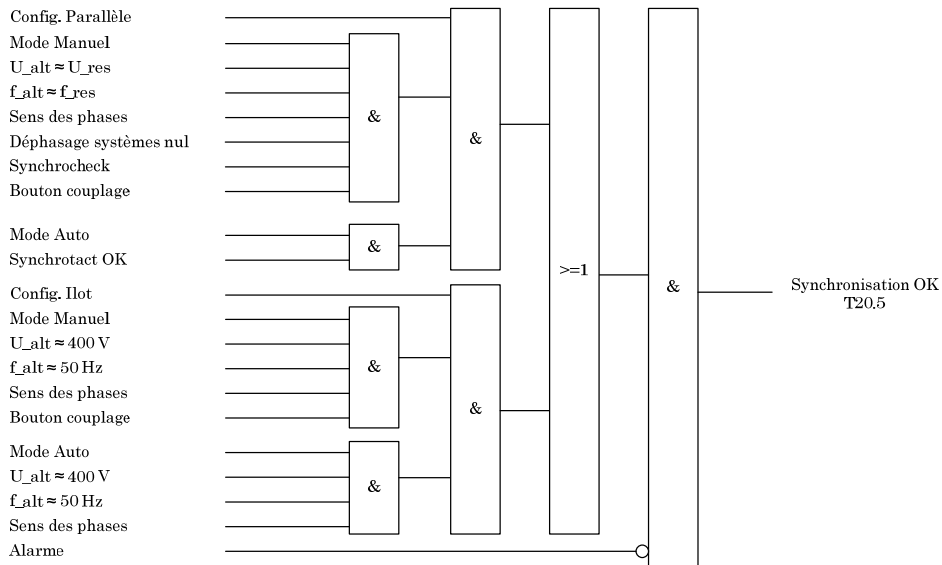


Figure 71 : Conditions de synchronisation générateur synchrone



**b) Alternateur asynchrone**

La mise en marche de la génératrice asynchrone est plus simple que pour la machine synchrone.

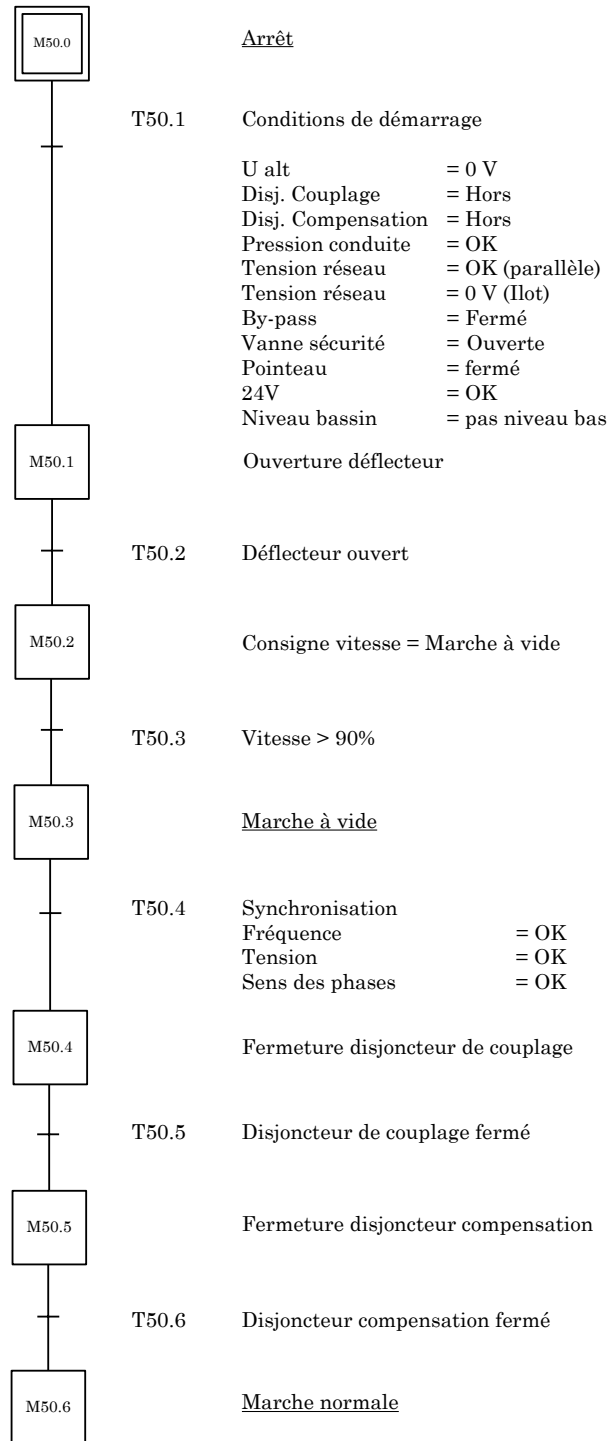


Figure 72 : Grafset démarrage asynchrone

**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

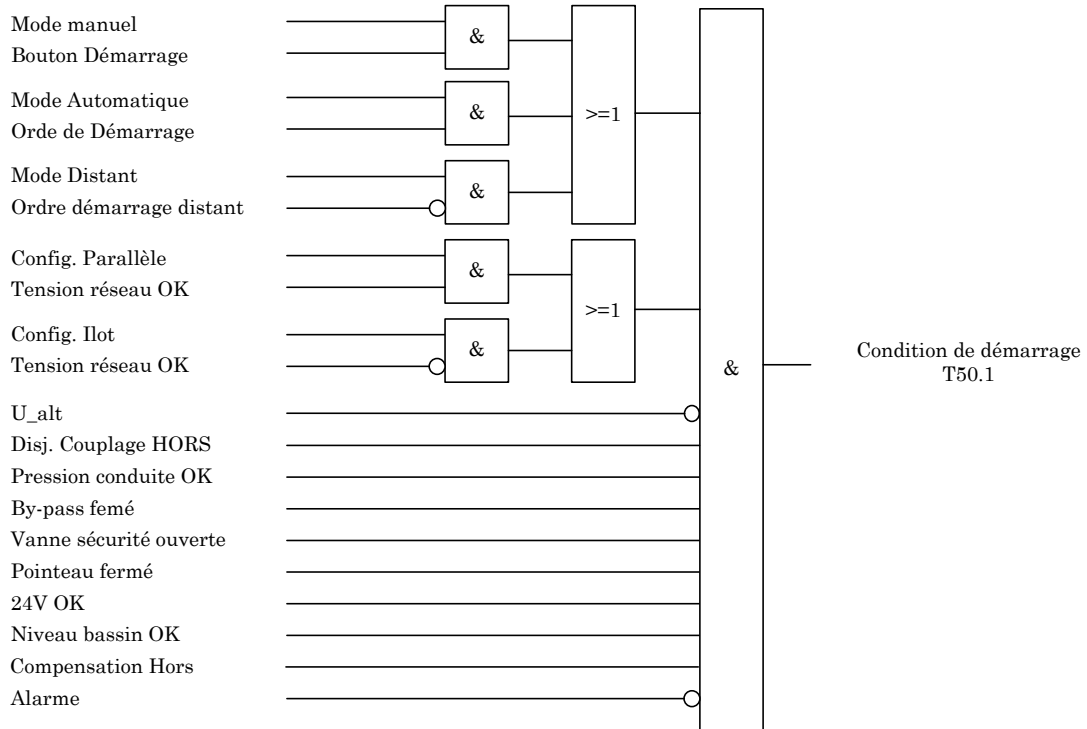


Figure 73 : Conditions de démarrage générateur asynchrone

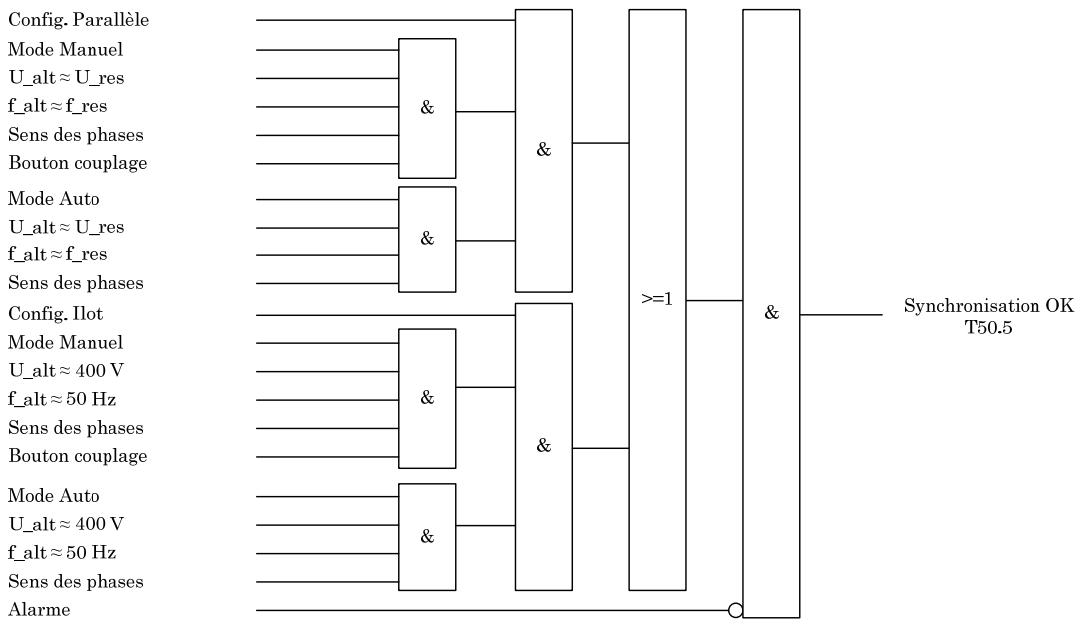


Figure 74 : Conditions de synchronisation générateur asynchrone

## 8.4. Les arrêts

Les arrêts représentent les différentes méthodes pour passer de l'état normal de marche à l'état d'arrêt. Les arrêts peuvent provenir d'un désir de l'exploitant ou sont dus à des anomalies qui nécessitent une mise hors service plus ou moins rapide selon leur origine. Les séquences d'arrêt changent également selon le type de génératrice installée.

### 8.4.1. Arrêt normal

Lorsque que l'exploitant désire arrêter l'installation au poste de commandement (télémaintenance) ou dans le local technique, c'est un arrêt normal qui va être lancé. Ce type d'arrêt est lent car on prend le temps de mettre la consigne de débit à « marche à vide » et l'on attend que la puissance fournie tombe aux alentours de 0.5% de la puissance nominale avant d'ouvrir le disjoncteur de couplage.

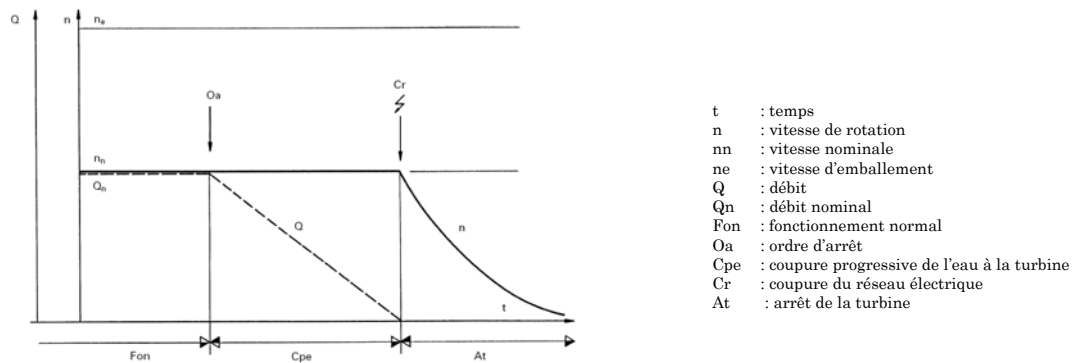


Figure 75 : Arrêt normal d'une turbine

**Travail de diplôme**  
Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

**a) Alternateur synchrone**

**b) Alternateur asynchrone**

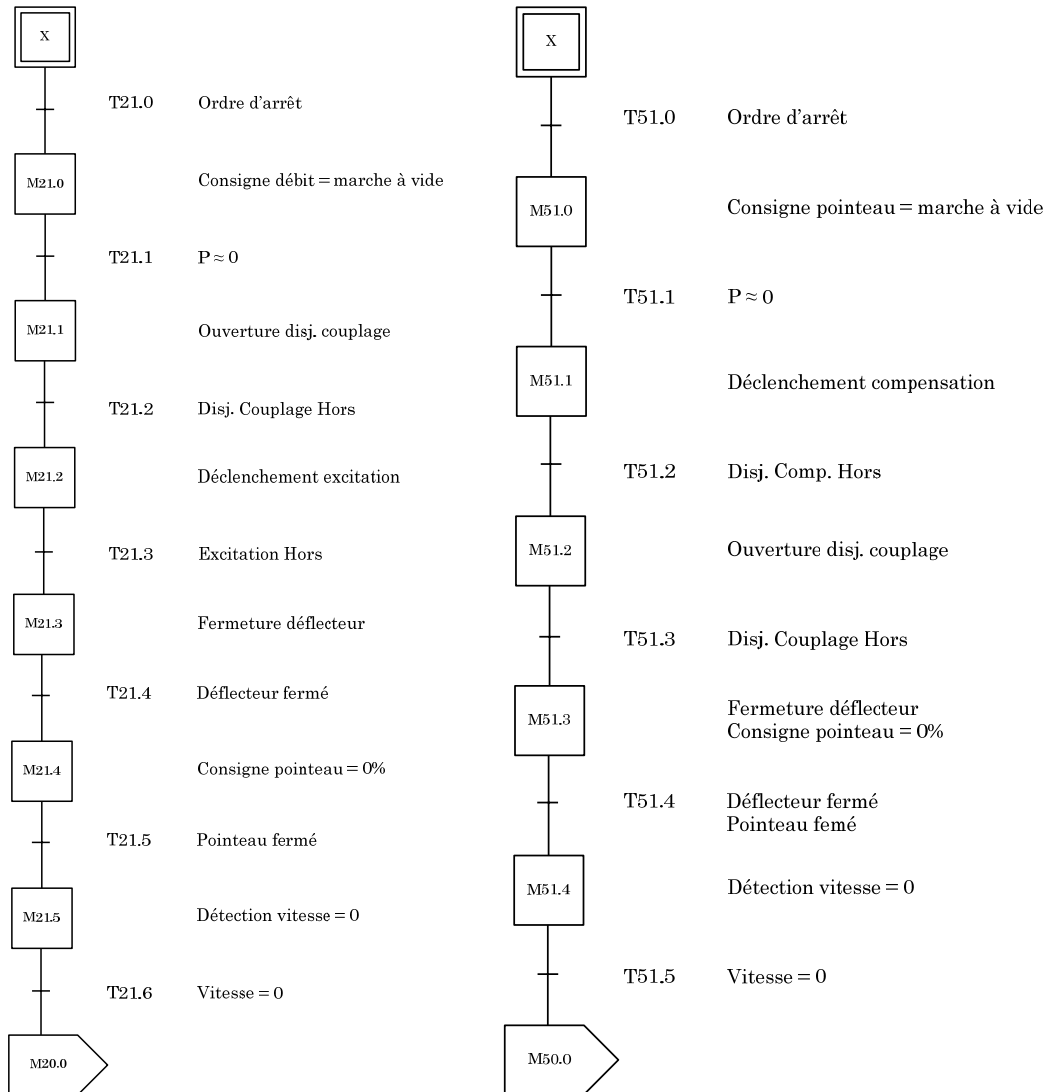


Figure 76 : Grafset arrêt normal synchrone et arrêt normal asynchrone

### 8.4.2. Arrêt rapide

L'arrêt rapide est la conséquence d'une défaillance de l'installation nécessitant pas une déconnexion immédiate au réseau qui créerait une survitesse de l'alternateur.

#### a) Alternateur synchrone

#### b) Alternateur asynchrone

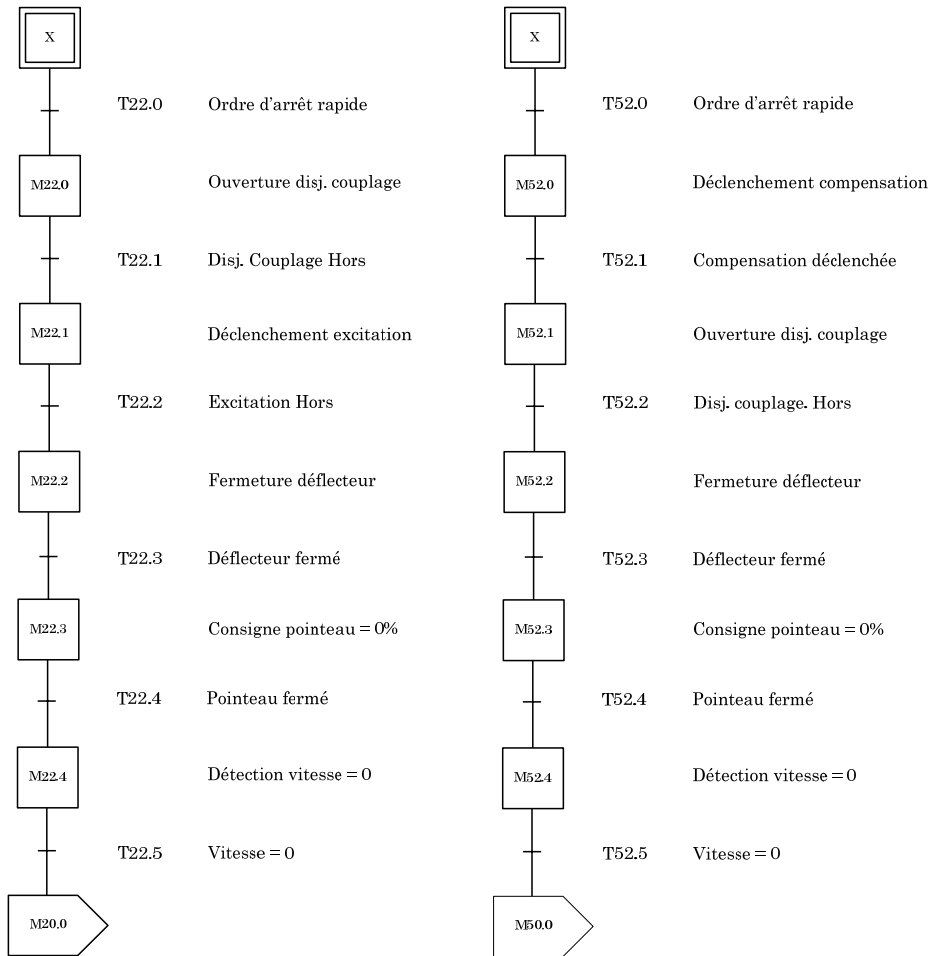


Figure 77 : Grafset arrêt rapide synchrone et arrêt rapide asynchrone

### 8.4.3. Arrêt d'urgence

L'arrêt d'urgence est la conséquence d'une défaillance qui nécessite une déconnexion urgente du réseau, par exemple à la suite d'un court circuit ou d'une perte de réseau.

- Déclenchement de l'alternateur du réseau
- Mise en service du déflecteur
- Fermeture du pointeau

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

Le groupe va donc fonctionner un moment sous la pleine puissance hydraulique sans être freiné. Sa vitesse va augmenter jusqu'à une valeur maximum dite de survitesse.

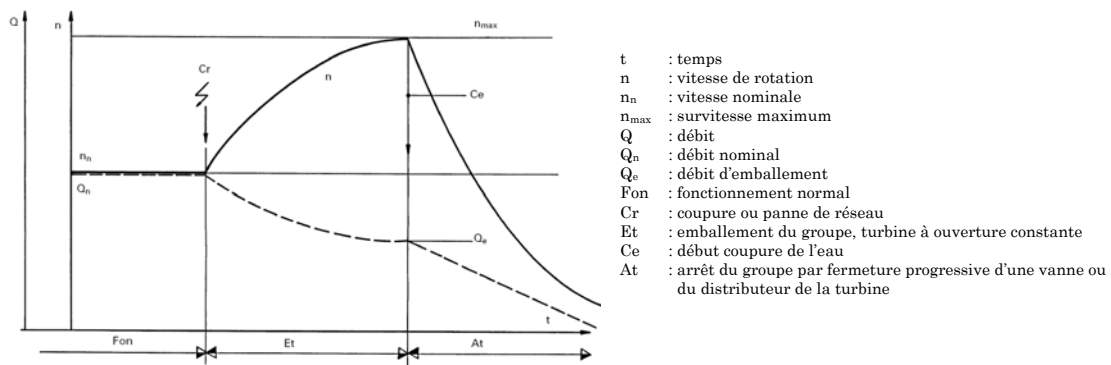


Figure 78 : Arrêt d'urgence

Remarque :

Une défaillance du réseau provoque un arrêt d'urgence, mais pas de signal d'alarme, l'installation étant remise en service automatiquement au retour de la tension.

**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

**a) Alternateur synchrone**

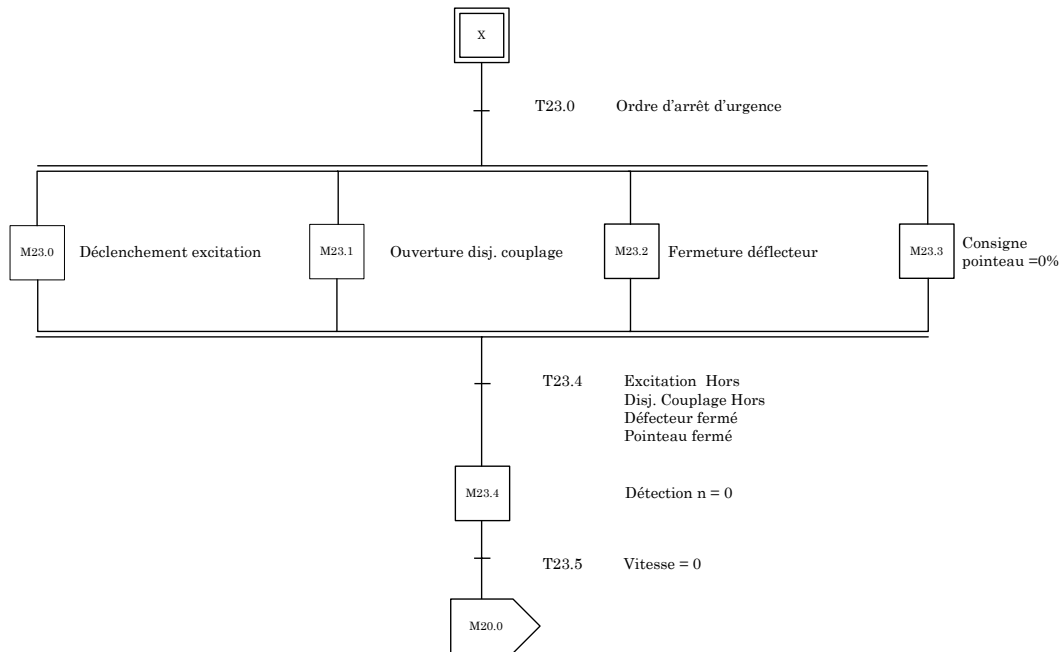


Figure 79 : Grafcet arrêt d'urgence synchrone

**b) Alternateur asynchrone**

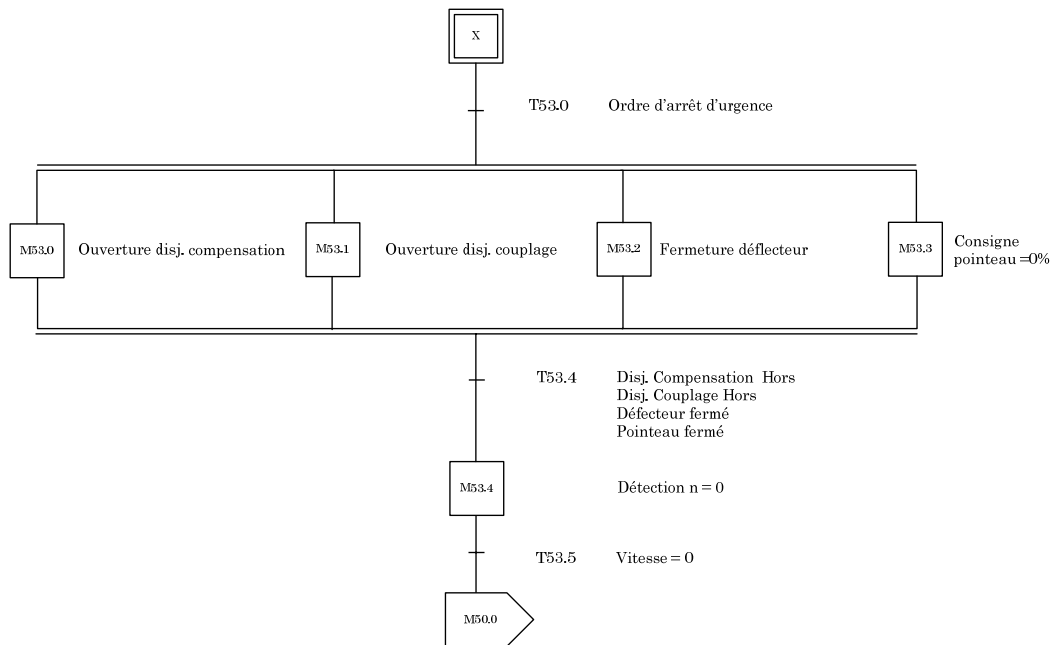


Figure 80 : Grafcet arrêt d'urgence asynchrone

**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales  
 hydro-électriques

Voici les schémas blocs correspondant aux ordres d'arrêts :

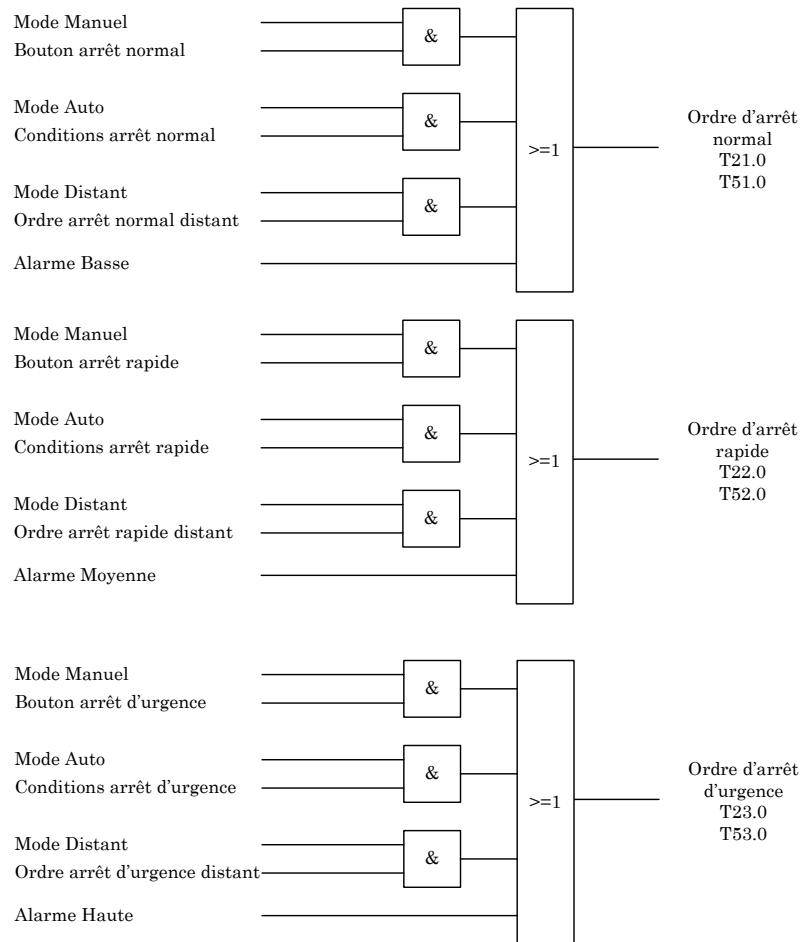


Figure 81 : Conditions des ordres d'arrêt



**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

Voici les schémas blocs de la commande du pointeau :

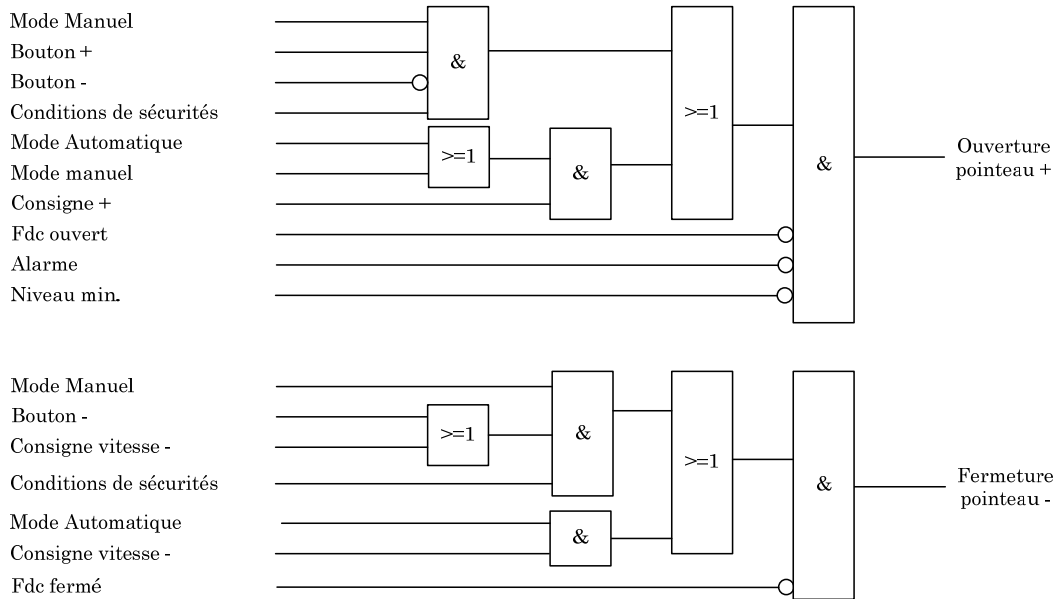


Figure 82 : Conditions de commande pointeau

Les ordres d'arrêts sont les conséquences d'anomalies détectées dans l'installation. Elles se divisent en trois catégories :

L'alarme basse :

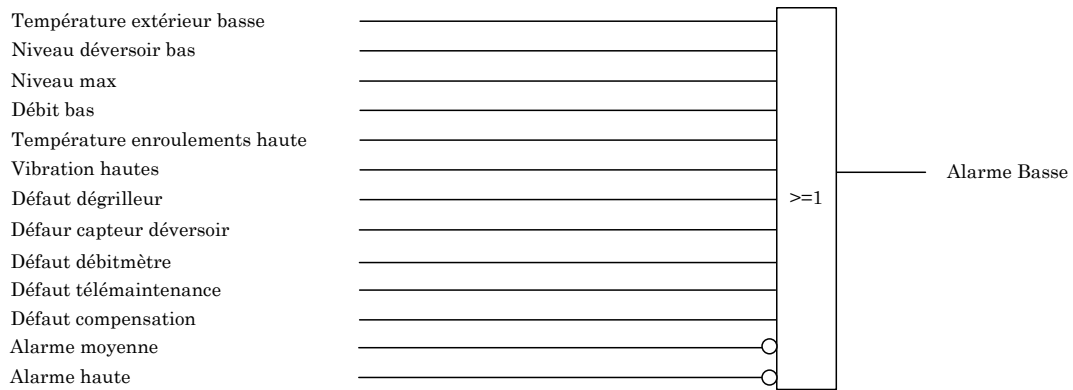


Figure 83 : Conditions d'alarme basse

L'alarme moyenne :

**Travail de diplôme**  
 Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques

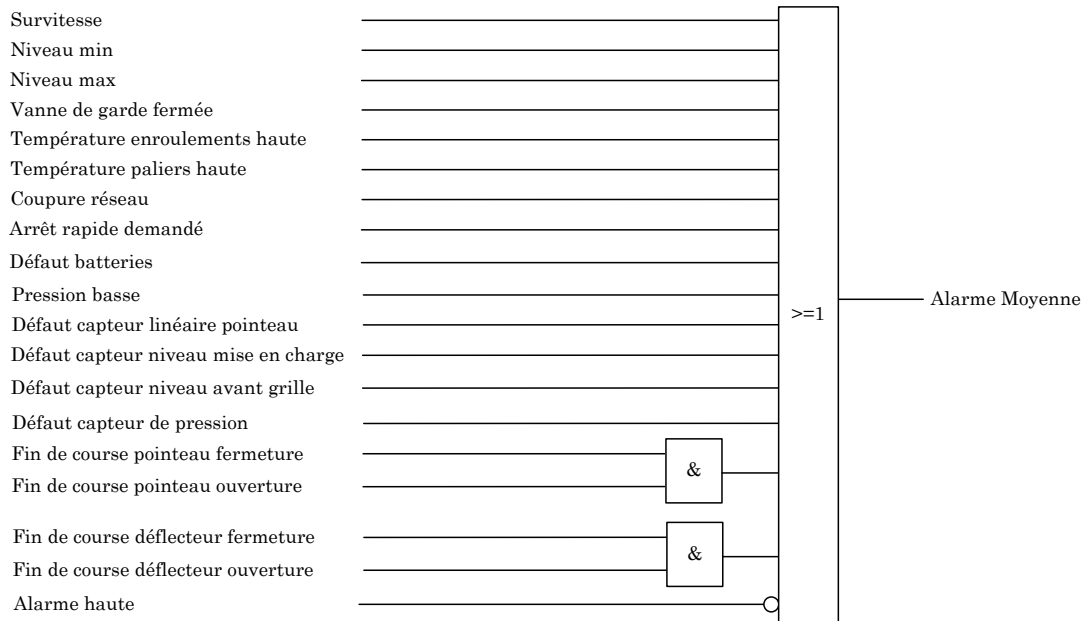


Figure 84 : Conditions d'alarme moyenne

**L'alarme haute :**



Figure 85 : Conditions d'arrêt d'urgence

## 9. Conclusion

Durant ce projet, j'ai pu découvrir toutes les phases de l'étude de développement d'une commande. Cependant, j'ai pu apprendre que la conception n'est pas une tâche aisée et qu'elle demande beaucoup de travail et de connaissances sur les installations hydroélectriques.

En ce qui concerne la partie analyse de risque, j'ai pu me rendre compte qu'il fallait avoir une expérience dans le domaine de l'hydroélectricité afin de pouvoir évaluer les différents paramètres à prendre en compte. Cependant, cette expérience je l'ai obtenue par la littérature et les rencontres organisées avec M. Caloz et M. Biner.

Concernant la programmation, il est évident que je présente ici la structure générale et une ébauche de certains blocs de fonction, qui pourra éventuellement servir de base à un développeur désireux de prendre en main ce projet. Mise à part ce dernier point il me semble avoir atteint le but, à savoir, proposer une commande standard pour différents types d'aménagements.

Sur le plan personnel, je suis très content d'avoir découvert et approfondi une parcelle du monde de l'automatisme tout en élargissant mes connaissances sur l'hydroélectricité. Un bémol est à soulever, c'est celui de ne pas avoir pu programmer un automate. Toutefois, je reste conscient que le temps à disposition est court et que l'analyse de risque m'a pris beaucoup de temps.

## 10. Remerciements

J'aimerais commencer par remercier Monsieur Jean-Daniel Marcuard, professeur à la Haute Ecole Valaisanne de Sion pour avoir accepté de suivre mon travail de diplôme.

Je remercie également Monsieur Steve Caloz de la maison Telsa SA, qui m'a offert la possibilité d'effectuer mon travail de diplôme dans le domaine complexe mais fascinant de l'hydroélectricité.

Je remercie aussi Monsieur Christophe Truffer, adjoint scientifique, pour m'avoir accordé de son temps. Mais aussi pour les conseils qu'il a pu me donner concernant la partie « Automate » de mon travail.

En outre mes remerciements vont à Monsieur Hans-Peter Biner, professeur à la Haute Ecole Valaisanne de Sion, pour avoir contribué à élargir mes connaissances sur la mise en réseau des alternateurs.

Arrivé au terme de mes études à la Haute Ecole Valaisanne de Sion, j'aimerais également remercier un de mes compatriotes Yann Pitteloud, lui-aussi engagé dans les mêmes études, pour son soutien moral pendant ces dernières années.

Mon dernier Merci s'adresse à mes parents et à mon frère Andreas, pour m'avoir donné la possibilité de faire mes études et pour m'avoir constamment encouragé pendant ces cinq années.

## 11. Références

- [1] Publications du programme d'action PACER (1995) :
- « Turbines hydrauliques »
  - « Générateurs et installations électriques »
  - « Régulation et sécurité d'exploitation »
  - « Le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une miniturbine »
- [2] Cours MCR2 d'automatisation de processus de M. Marcuard, avril 2007
- [3] Cours MCR2 Sécurité de M. Marcuard, mai 2007
- [5] Travail de semestre d'été 2007 de Ivan Sanchez, Dimensionnement de mini-centrales hydroélectriques
- [4] Internet

## 12. Liste des figures

Figure 1 : Comparaison électrique-hydraulique .....	6
Figure 2 : Comparaison courant continu et alternatif .....	7
Figure 3 : Représentation de la puissance .....	8
Figure 4 : Exemple de déphasage tension-courant.....	9
Figure 5 : Carte des fréquences et tensions domestiques utilisées de nos jours .....	10
Figure 6 : Circuit résistif pur et Représentation par phaseurs .....	11
Figure 7 : Allure des signaux pour une résistance .....	11
Figure 8 : Circuit inductif pur et Représentation par phaseurs.....	12
Figure 9 : Allure des signaux pour une inductance.....	12
Figure 10 : Circuit capacitif pur et Représentation par phaseurs.....	13
Figure 11 : Allure des signaux pour une capacité .....	13
Figure 12 : Allure des signaux pour une charge mixte .....	14
Figure 13 : Vue d'ensemble d'une centrale à haute pression.....	15
Figure 14 : Exemple de prise d'eau par en-dessous.....	16
Figure 15 : Schéma de principe d'un dégrilleur.....	17
Figure 16 : Machine synchrone.....	19
Figure 17 : Caractéristique à vide .....	20
Figure 18 : Moteur asynchrone .....	21
Figure 19 : Composants principaux d'une PCH et points de mesure de niveau.....	23
Figure 20 : Schéma d'une installation (machine synchrone) avec réglage de Q et $I_{exc}$ .....	27
Figure 21 : Schéma sans régulation de débit à $I_{exc} = cte$ (machine synchrone) .....	27
Figure 22 : Schéma sans réglage de débit avec compensation d'une machine synchrone	28
Figure 23 : Courbe en "V" d'une machine synchrone de 2,3 kVA - 3 x 380V - 50 Hz .....	28
Figure 24 : Caractéristiques de réglage .....	29
Figure 25 : Les domaines de fonctionnement de la machine asynchrone .....	29
Figure 26 : Caractéristiques d'une machine asynchrone .....	29
Figure 27 : Caractéristiques externes à $I_{exc}$ constant pour différents $\cos \varphi$ .....	31
Figure 28 : Caractéristiques d'une génératrice synchrone en réseau isolé.....	31
Figure 29 : Caractéristiques d'une génératrice asynchrone en réseau isolé.....	32
Figure 30 : Variation de U(P) et I(P) .....	32
Figure 31 : Variation de U(P).....	33
Figure 32 : Principe de la charge ballast.....	33
Figure 33 : PCH en parallèle sur le réseau avec régulation niveau-débit .....	34
Figure 34 : PCH en îlot avec régulation électronique charge-fréquence et niveau-débit .....	35

Figure 35 : PCH en îlot avec régulation vitesse-débit et limitation de l'ouverture en fonction du niveau .....	36
Figure 36 : Analyse Fonctionnelle .....	37
Figure 37 : Schéma général de l'installation considérée .....	49
Figure 38 : Scéma de processus .....	50
Figure 39 : Turbine Pelton .....	52
Figure 40 : Structure point à point.....	56
Figure 41 : Structure entrées/sorties déportées.....	57
Figure 42 : Structure bus de terrain.....	57
Figure 43 : Schéma soumis aux fournisseurs .....	58
Figure 44 : Disposition de l'appareillage Siemens.....	59
Figure 45 : Disposition de l'appareillage Saia .....	60
Figure 46 : Capteur de niveau capacitif et disposition.....	61
Figure 47 : Capteur de niveau à ultrasons.....	62
Figure 48 : Photo du pressostat .....	63
Figure 49 : Capteur de débit électromagnétique .....	64
Figure 50 : Capteur de vitesse et son convertisseur de signal.....	65
Figure 51 : Vérin électrique, capteur de position linéaire et fin de course .....	66
Figure 52 : Vanne pilotée .....	67
Figure 53 : Schéma de principe des mesures électriques.....	68
Figure 54: Relais surveillance tension .....	69
Figure 55 : Convertisseur de mesures DME 442 .....	69
Figure 56 : Synchrotact ABB SYN5202.....	70
Figure 57 : Schéma de principe synchrotact .....	70
Figure 58 : Régulateur de tension pour machine synchrone ABB Unitrol 1000-15 .....	71
Figure 59 : Relais de surveillance tension-fréquence XUF2 .....	72
Figure 60 : Relais anti-retour XP2-R.....	73
Figure 61 : Relais surveillance vitesse BZ1-G .....	74
Figure 62 : Relais surveille courant XI1-I.....	75
Figure 63 : Comparaison du coût du matériel .....	77
Figure 64 : Schéma du GEMMA .....	79
Figure 65 : Schéma GEMMA complété .....	81
Figure 66: Grafcet de gestion des modes.....	82
Figure 67 : Séquence de démarrage.....	83
Figure 68 : Démarrage du groupe.....	83
Figure 69 : Grafcet démarrage synchrone.....	85
Figure 70 : Conditions de démarrage générateur synchrone.....	86
Figure 71 : Conditions de synchronisation générateur synchrone .....	86
Figure 72 : Grafcet démarrage asynchrone.....	87
Figure 73 : Conditions de démarrage générateur asynchrone.....	88
Figure 74 : Conditions de synchronisation générateur asynchrone .....	88
Figure 75 : Arrêt normal d'une turbine.....	89
Figure 76 : Grafcet arrêt normal synchrone et arrêt normal asynchrone .....	90
Figure 77 : Grafcet arrêt rapide synchrone et arrêt rapide asynchrone .....	91
Figure 78 : Arrêt d'urgence .....	92
Figure 79 : Grafcet arrêt d'urgence synchrone .....	93
Figure 80 : Grafcet arrêt d'urgence asynchrone .....	93
Figure 81 : Conditions des ordres d'arrêt.....	94
Figure 82 : Conditions de commande pointeau.....	95
Figure 83 : Conditions d'alarme basse .....	95
Figure 84 : Conditions d'alarme moyenne.....	96
Figure 85 : Conditions d'arrêt d'urgence .....	96

## 13. Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison axe vertical-horizontal.....	18
Tableau 2 : Valeurs de vitesse en fonction des paires de poles.....	20
Tableau 3 : Descriptif des fonctions.....	38
Tableau 4 : Tableau définissant les niveaux de fréquence.....	39
Tableau 5 : Tableau définissant les niveaux de gravité.....	39
Tableau 6 : Matrice de la criticité.....	40
Tableau 7 : Tableau définissant le niveau de criticité.....	40
Tableau 8 : Analyse de risque.....	40
Tableau 9 : Détection.....	47
Tableau 10 : Table récapitulatif du coût du matériel qui entre dans l'estimation.....	77
Tableau 11 : Comparaison du coût du matériel.....	77

## 14. Annexes

Annexe 1	: Tableau de l'appareillage classé
Annexe 2	: Liste des emplacements I/O sur l'automate
Annexe 3	: Demande d'offre
Annexe 4	: Proposition de la maison Siemens
Annexe 5	: Proposition de la maison Saia-Burgess
Annexe 6	: Les capteurs de niveau
Annexe 7	: Le capteur de pression
Annexe 8	: Le débitmètre
Annexe 9	: Le capteur de vitesse
Annexe 10	: Le vérin électrique
Annexe 11	: Le capteur de position linéaire
Annexe 12	: Le capteur fin de course
Annexe 13	: les Vannes
Annexe 14	: Relais surveillance de tension
Annexe 15	: Le convertisseur de mesures
Annexe 16	: Le synchrotact
Annexe 17	: Le régulateur d'excitation
Annexe 18	: Relais surveillance tension-fréquence alternateur
Annexe 19	: Relais de puissance anti-retour
Annexe 20	: Relais de surveillance vitesse
Annexe 21	: Relais de surveillance courant