

Ce travail a pour lieu d'application l'hôtel Weissshorn situé à 2337m d'altitude. Le bâtiment est en îlotage, il assure ses besoins énergétiques principalement au moyen d'une micro-turbine et d'une génératrice à mazout.

Il s'inscrit à la suite d'autres travaux déjà réalisés sur cet établissement [1], [2], [3]. Ces travaux présentent d'ailleurs un descriptif complet de l'hôtel, qui ne sera pas répété dans ce rapport.

Deux objectifs ressortent de la donnée de ce travail de diplôme. Premièrement, la réduction de la consommation de mazout de l'hôtel qui s'élève à 20'000 litres de mazout par année. Cette consommation est principalement répartie sur la saison d'hiver. Une analyse complète de fonctionnement de l'hôtel doit permettre de trouver des solutions énergétiques viables à ce problème. Le second objectif est d'installer une supervision répondant aux attentes du propriétaire. Cette visualisation doit permettre un suivi effectif de l'hôtel à distance mais doit aussi représenter un objet didactique pour la clientèle de l'hôtel.

Ce rapport présente d'abord un état des lieux de l'hôtel pour poser les bases du travail. Ensuite les mesures possibles d'amélioration de la partie électrique de l'hôtel seront étudiées, suivie d'une étude thermique. Ces deux études présentent chaque fois des solutions avec les litres de mazout qu'elles permettent d'économiser et leur faisabilité. Ensuite, la partie automation détaille les travaux réalisés pour permettre la visualisation à distance en temps réel de l'hôtel et l'archivage dans une base de données. Finalement, la partie visualisation et suivi explique l'architecture du système de visualisation ainsi que le scénario de suivi proposé.

Désignation :

Mazout : désigne le mazout de chauffage utilisé dans une chaudière, appelé aussi fuel.

Diesel : désigne le carburant pour un moteur diesel, appelé parfois gasoil.

Conversion :

1 litre de mazout correspond à 8kW thermique utile.

1 litre de diesel correspond à 2.2 kWh électrique utile.

Rentabilité :

1 litre de mazout vaut 1 frs pour le calcul de prix spécifique.

2 Etat des lieux

Consommation typique par saison

2.1

Il est important de rappeler l'ordre de grandeur de la consommation de l'hotel par saison et par qui la production est assuree.

saison d'hiver : janvier → avril
intersaison : mai → juin
saison d'ete : juillet → octobre
intersaison : novembre → decembre

2.1.1 Saison ete 2014

La consommation moyenne journaliere en ete fluctue autour des 15kW comme le montre la Figure 1. La nuit, les resistances placees dans les tampons d'eau evacuent 20kW. Toute la production est assuree par la turbine. La generateurice n'est jamais enclenchee et le chauffage a mazout est eteint.

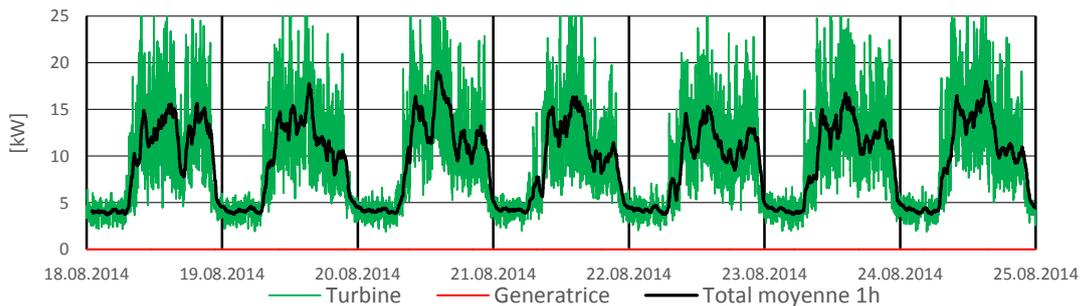


Figure 1: Consommation hebdomadaire de l'hotel en ete 2014

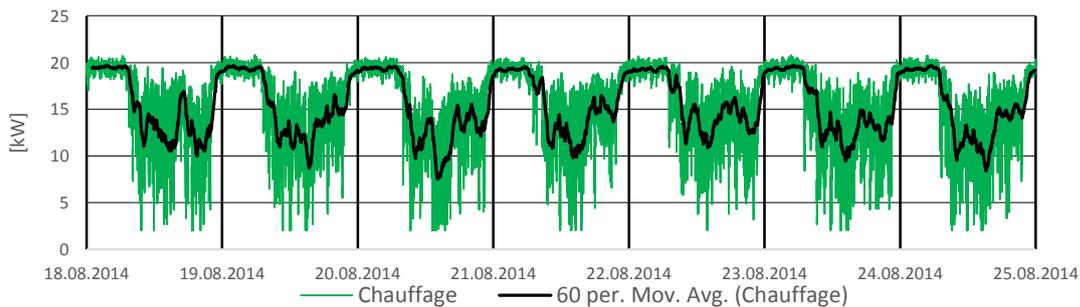


Figure 2: Dissipation hebdomadaire dans les resistances de chauffage en ete 2014

2.1.2 Saison hiver 2013-2014

Au cours de l'hiver 2013-2014, le débit d'eau était trop faible et la consommation de la turbine a été entièrement assurée par la génératrice. Le peu d'énergie produit par la turbine a été dissipé dans les résistances du chauffage.

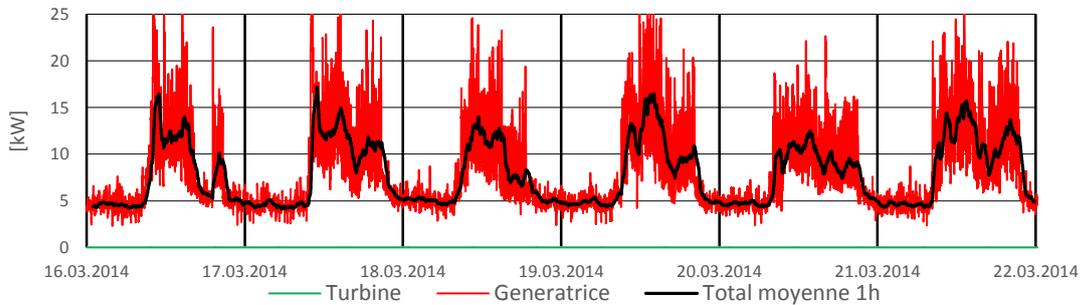


Figure 3: Consommation hebdomadaire de l'hôtel en hiver 2013/2014

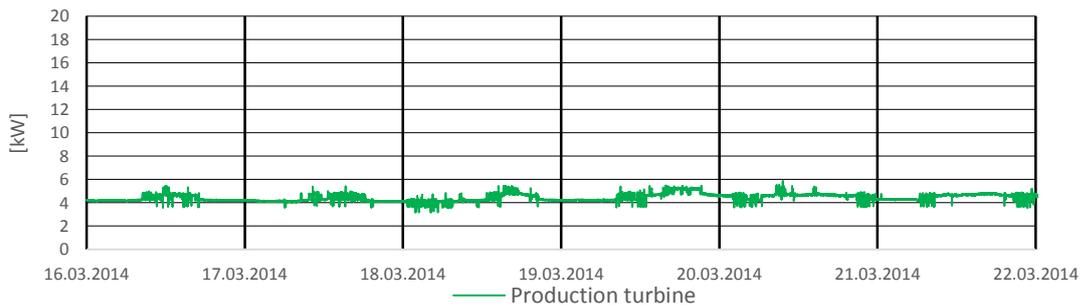


Figure 4: Dissipation journalière typique dans le chauffage en hiver 2013/2014

2.1.3 Saison hiver 2014-2015

Suite à la saison d'été 2014, des travaux sur la prise d'eau et sur la pompe d'eau potable ont été réalisés. Ces travaux ont été suivis et leurs bénéfices ont été quantifiés durant le projet de semestre. Ils ont permis par exemple d'éteindre la génératrice la nuit durant une bonne partie de l'hiver. Les détails des économies dues à ces derniers sont détaillés dans les chapitres suivants.

2.2 Bilan de la production électrique 2014/2015

Ces chiffres sont basés sur l'analyse des courbes des mesures de puissance¹ de la turbine et de la génératrice ainsi que sur les relevés de niveau de diesel.

2.2.1 Turbine

Janvier :	14	kW
Février :	10	kW
Mars :	6	kW
Avril :	7	kW
Moyenne :	9	kW

L'énergie totale produite pour cette période est donc de :

$$E_{\text{électrique}} = P \cdot t \quad (1)$$

$$E_{\text{électrique}} = 120 \text{ j} \cdot 24 \text{ h} \cdot 9 \text{ kW} = 26'000 \text{ kWh}$$

2.2.2 Génératrice

L'intégration des mesures de puissances sur la saison d'hiver 2014-2015 donne une énergie de 11'000 kWh.

$$E_{\text{électrique}} = \int_{\text{janvier}}^{\text{avril}} P(t) dt = 11'000 \text{ kWh} \quad (2)$$

Donc on peut considérer le rendement total de la machine à 22% à cette altitude.

$$\eta_{\text{génératrice}} = \frac{E_{\text{électrique}}}{V \cdot PCi_{\text{diesel}}} = \frac{E_{\text{électrique}}}{5000 \text{ l} \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}} = \frac{11'000}{50'000} = 22 \% \quad (3)$$

2.2.3 Total et puissance moyenne

$$E_{\text{total_électrique}} = E_{\text{turbine}} + E_{\text{génératrice}} = 37'000 \text{ kWh} \quad (4)$$

$$P_{\text{moyenne_électrique}} = \frac{E_{\text{total_électrique}}}{120 \text{ j} \cdot 24 \text{ h}} = 12.8 \text{ kW}$$

La puissance moyenne tout au long de la saison d'hiver est de 12.8 kW.

¹ Courbes réalisées sur Excel chez RD Carbon.

3 Efficience électrique

Ce chapitre développe les solutions étudiées pour améliorer l'efficience de la partie électrique de l'hôtel Weisshorn afin de réduire sa consommation d'huile. Pour faciliter la compréhension, une symbolique a été utilisée dans ce chapitre pour situer rapidement le sort des solutions proposées :

✓ : solution installée

■ : solution retenue mais pas installée

✗ : solution non-retenue

En rouge, les litres comptabilisés pour le récapitulatif final.

3.1 Travaux sur la prise d'eau



Figure 5: Travaux sur la prise d'eau, 2014

3.1.1 Variante actuelle ✓

La puissance disponible à la turbine en début de saison hiver 2014 était inférieure à 5kW^2 . Les travaux réalisés sur la prise d'eau à l'aide d'une pelle araignée ont permis d'augmenter la puissance hydraulique en début de saison d'hiver 2015 à 15kW^2 . Sur la saison d'hiver, la turbine a produit en moyenne 5kW^2 de plus que l'année précédente. Cette énergie supplémentaire a permis d'éteindre la génératrice la nuit pendant les 12 premières semaines de l'hiver et donc d'économiser les litres de diesel suivants :

² Valeurs provenant des mesures faites par RD Carbon et enregistrées dans leur base de données.

$$E = P_{nuit} \cdot t = 5 \text{ kW} \cdot 8h \cdot 12\text{sem} \cdot 7j = 3360 \text{ kWh} = 1527 \text{ l}_{diesel} \quad (5)$$

La journée, l'hôtel consomme trop pour être alimenté uniquement par la turbine. La génératrice est enclenchée et l'énergie de la turbine se dissipe dans le circuit de chauffage. Les 12 premières semaines, la turbine a donc dissipé durant 16h par jour les 5 kW supplémentaires. Les 5 dernières semaines, la génératrice a fonctionné jour et nuit. La turbine a alors dissipé continuellement sa puissance dans le chauffage. Les litres économisés sont donc les suivants :

$$E = P_{supp} \cdot t = 5 \text{ kW} \cdot 16h \cdot 12\text{sem} \cdot 7j = 6720 \text{ kWh} = 840 \text{ l}_{mazout} \quad (6)$$

$$E = P_{supp} \cdot t = 5 \text{ kW} \cdot 24h \cdot 5\text{sem} \cdot 7j = 4200 \text{ kWh} = 525 \text{ l}_{mazout}$$

Le gain total, tous litres confondus, est finalement de 2892 litres.

3.1.2 Variante 2016 ■

La réduction des consommateurs nocturnes de l'hôtel (voir 3.4) de 8kW à 5 kW permettrait de pouvoir assurer l'alimentation de l'hôtel par la turbine et donc d'éteindre la génératrice pour les 5 dernières semaines d'hiver. Le gain est calculé ci-dessous :

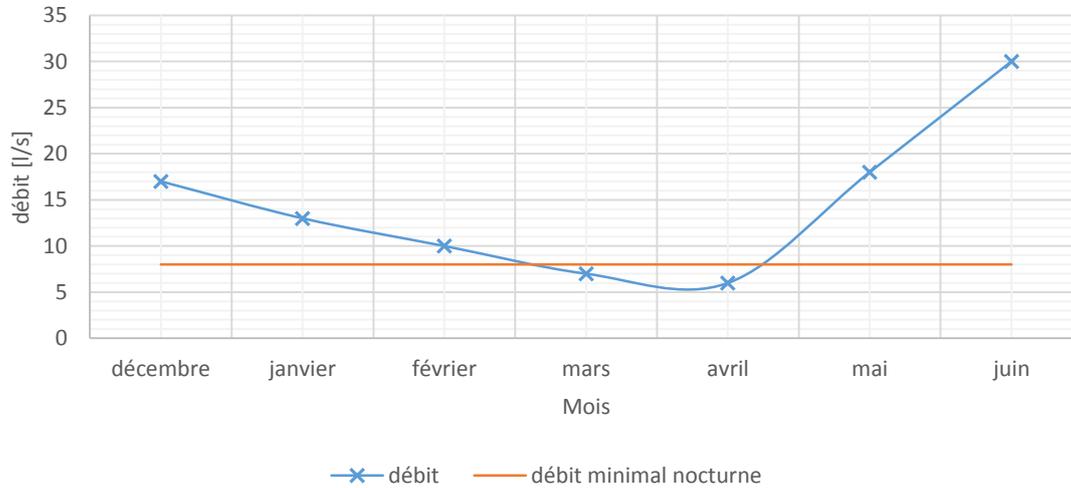


Figure 6: Débit d'eau au cours de l'hiver 2015

$$E = P_{nuit} \cdot t = 5 \text{ kW} \cdot 8h \cdot 5 \text{ sem} \cdot 7j = 1400 \text{ kWh} = 636 \text{ l}_{diesel} \quad (7)$$

3.2 Remplacement de la pompe d'eau potable

3.2.1 Description ✓

Pour éviter les problèmes de gel dans la conduite, la pompe d'eau potable située au barrage fonctionne continuellement. L'ancienne pompe était surdimensionnée et fournissait une puissance de 3 kW. Le remplacement de la pompe a permis de baisser cette consommation à 1 kW. Des mesures ont été effectuées pour confirmer la puissance de la nouvelle pompe. Les détails techniques de la nouvelle pompe sont en Annexe 1 . Le gain résultant est le suivant.

$$E = \Delta P \cdot t = 2 \text{ kW} \cdot 24\text{h} \cdot 120\text{j} = 5760 \text{ kWh} = 720 \text{ l}_{\text{mazout}} \quad (8)$$

A noter que l'arrêt de la génératrice nocturne n'est cette fois pas compté car il a déjà été pris en compte dans le chapitre 3.1.

Remarque : Le risque de gel est trop élevé en hiver pour tenter d'installer un mode de fonctionnement discontinu afin d'économiser de l'énergie. En été, cette mesure serait inutile du fait de la production hydro-électrique suffisante.



Figure 7: Nouvelle et ancienne pompe d'eau potable

3.3 Remplacement des génératrices

3.3.1 Principe ✓

Les deux anciennes génératrices 40kVA et 18kVA en fin de vie avec plus 15'000 heures ont été remplacées par une seule génératrice 44kVA de nouvelle génération avec turbo. L'hiver 2013-2014, les deux génératrices ont consommé 8000 litres. Cet hiver, la nouvelle génératrice a consommé 5000 litres. Le rendement des deux anciennes génératrices atteignait 17.5%³. Alors que les chiffres de l'hiver 2014-2015 montrent un rendement de 22% pour la nouvelle génératrice. Les frais occasionnés par ces changements ne sont pas dans le budget de ce travail de diplôme, car les génératrices devaient dans tous les cas être remplacées.

$$consommation_{avant} = \frac{1}{PCi_{diesel} \cdot \eta_1} = \frac{1}{10 \frac{kWh}{l} \cdot 17.5\%} = 0.57 \frac{l}{kWh} \quad (9)$$

$$consommation_{après} = \frac{1}{PCi_{diesel} \cdot \eta_2} = \frac{1}{10 \frac{kWh}{l} \cdot 22\%} = 0.45 \frac{l}{kWh}$$

En considérant une production lors de l'hiver 2014-2015 de 11MWh, le gain de diesel est le suivant :

$$gain = 11 MWh \cdot (0.57 - 0.45) \frac{l}{kWh} = 1320 l_{diesel} \quad (10)$$

Les litres gagnés en arrêtant la génératrice la nuit du chapitre 3.1.1 additionnés aux litres gagnés ci-dessus par le nouveau rendement explique la différence de 3000 litres entre l'hiver 2013-2014 et l'hiver 2014-2015.



Figure 8: Nouvelle génératrice OLYMPIAN GEP44⁴

³ Voir [1]

⁴ Le dossier technique de la pompe est disponible chez RD Carbon

3.4 Réorganisation du réseau électrique de l'hôtel

Ce chapitre étudie la distribution électrique de l'hôtel. Une campagne de mesure a été effectuée afin de déterminer les principaux consommateurs et le profil de puissance journalier du Weisshorn. Ces travaux permettent de comprendre l'influence de chaque consommateur, d'en tirer les conséquences et d'entreprendre des actions d'amélioration.

3.4.1 Distribution électrique de l'hôtel

Les appareils électriques de l'hôtel sont répartis en trois groupes. Chaque groupe peut indépendamment être alimenté soit par la turbine, soit par la génératrice. Il est également possible d'éteindre complètement un groupe. Ainsi, aucune synchronisation n'est nécessaire entre la turbine et la génératrice.

- **Groupe 0** : correspond dans ce rapport à la pompe d'eau potable. Il n'est pas possible de le déclencher. Il prend son énergie directement sur la turbine.
- **Groupe 1** : contient les appareils vitaux, comme par exemple les lumières. Il comprend également les dispositifs qui ne peuvent pas s'éteindre la nuit comme les frigos et toute l'automation. Ce groupe est alimenté en permanence
- **Groupe 2** : contient les gros consommateurs de la cuisine qui peuvent être coupés lorsqu'ils ne sont plus utiles, par exemple le lave-vaisselle.
- **Groupe 3** : contient toutes les machines de la buanderie comme les lave-linge et les fers à repasser.

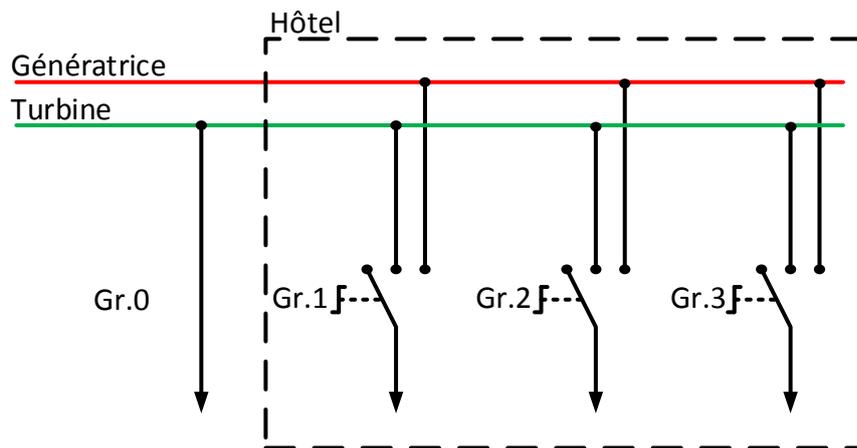


Figure 9: Schéma de principe des commutateurs manuels de groupe

3.4.2 Appareils de mesures

Pour effectuer les mesures détaillées des consommateurs électriques, cinq enregistreurs ont été utilisés. Ces enregistreurs CHAUVIN ARNOUX de type PEL103 permettent de mesurer une multitude de configuration réseau. Pour gagner du temps, la configuration « 1 charge étoile triphasé asymétrique » a été utilisée également pour mesurer 3 charges monophasées différentes simultanément. Les mesures sont effectuées chaque seconde. La période d'agrégation a été fixée au minimum de 1 min afin de détecter les variations rapides de puissance. Les mesures sont acquises par le logiciel « PEL Transfer » fournit avec l'appareil. Ce logiciel permet d'avoir un aperçu rapide des courbes de mesures. Les données sont ensuite exportées au format « .xls » afin d'être analysées plus en détail.



Figure 10: Enregistreur Arnoux Chauvin de type PEL 103

3.4.3 Liste des disjoncteurs

La liste des disjoncteurs a dû être contrôlée car elle contenait des erreurs. Par la même occasion, un plan détaillé des disjoncteurs de la cuisine a aussi été fait. Le nom des disjoncteurs dépend de leur groupe, par exemple le groupe 1 contient les disjoncteurs F1xx, groupe 2 -> F2xx. Deux postes seulement n'ont pas été mesurés.

N°	Désignation	N°	Désignation
F100	prises garage	F120	prises DJ
F101	prises bar	F121	-
F102	local génératrice	F122	sèche-linge
F103	prises rez-de-chaussée	F123	lumière sous-sol + corridor
F104	-	F124	lumière garage
F105	dépendance	F125	alimentation automation
F106	chambres froides	F200	lave-verre
F107	calandre gaz	F201	micro-onde
F108	-	F202	-
F109	prises cuisines	F203	prises cuisine
F110	prises self	F204	lave-vaisselle
F111	machine à café	F205	-
F113	lumière cuisine	F206	ventilation
F114	meuble réfrigéré	F207	-
F115	lumière salle à manger + WC	F208	bain-marie
F116	prise salle à manger	F209	prises cuisine
F117	prises bar	F300	lave-linge 1
F118	frigo bar	F301	lave-linge 2
F119	chaufferie	F302	buanderie

Table 1: Résumé à jour des disjoncteurs

Le code couleur ci-dessus correspond aux couleurs des graphiques par groupe suivants.

3.4.4 Resultat des mesures

- **Proportion totale sur 1 semaine**

Les premiers resultats ont permis de connaitre l'importance de chaque groupe. Les elements vitaux du groupe 1 representent actuellement 50% de la portion totale.

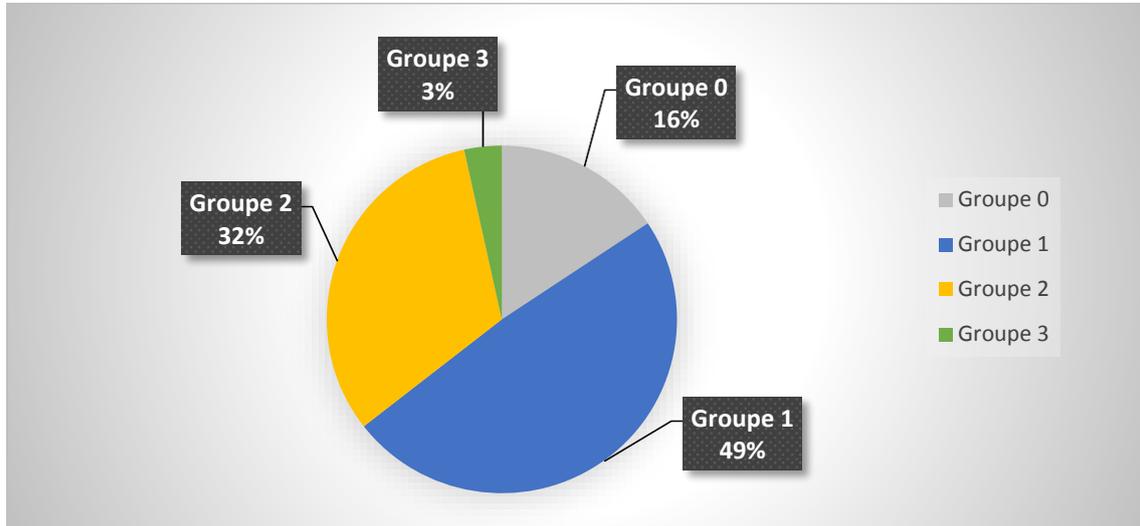


Figure 11: Consommation totale de l'hotel, portion totale pour une semaine : 1.5 MWh

- **Puissance totale heure par heure**

Le graphique suivant montre bien le rôle de « bande vitale » du groupe 0 + 1 dont la puissance ne varie que très peu au cours de la journée. Le groupe 2 où sont concentrés les consommateurs de la cuisine double la consommation de l'hotel de 8h à 17h. La petite influence du groupe 3 tombe aux heures les plus chargées de l'hotel.

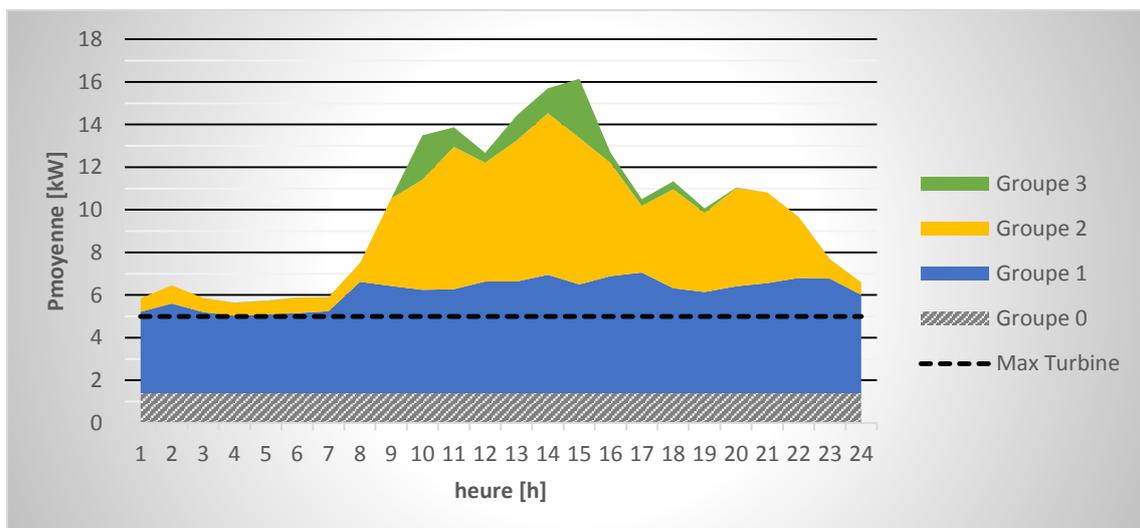


Figure 12: Puissance heure par heure des groupes

- **Top 10 consommateurs intergroupe**

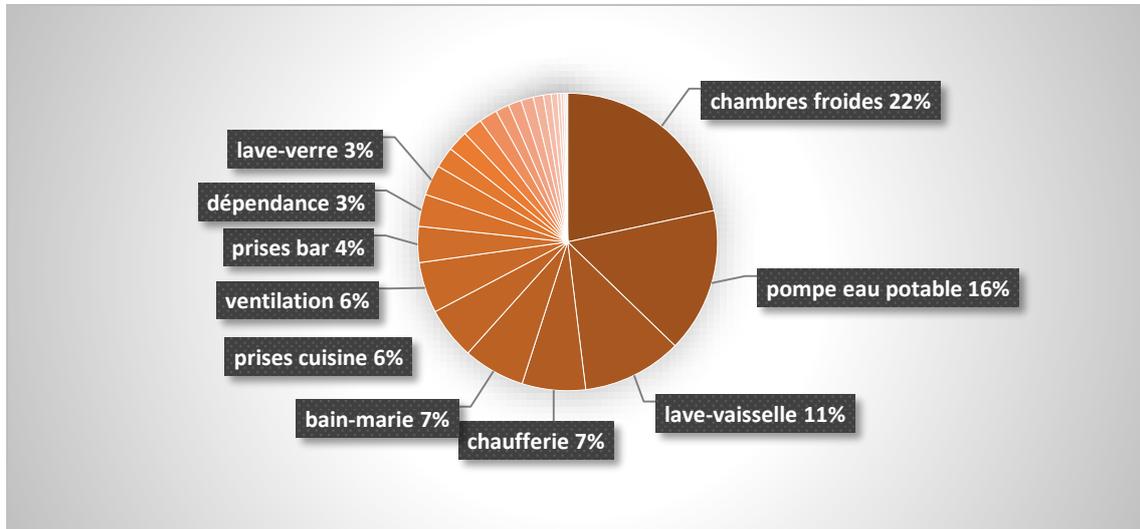


Figure 13: Top 10 consommateurs intergroupe, portion totale pour une semaine : 1.5 MWh

La Figure 13 nous montre que le 85% de la portion totale est occupé par les 10 plus gros consommateurs d'énergie. Il est donc cohérent de s'intéresser au mode de fonctionnement de ces derniers.

- **Catégories de consommateurs**

La dernière approche consiste à trier les consommateurs par catégorie comme le montre la Figure 14. Ce graphique met en évidence la quantité d'énergie nécessaire à la fabrication du froid ou encore la contribution des lumières.

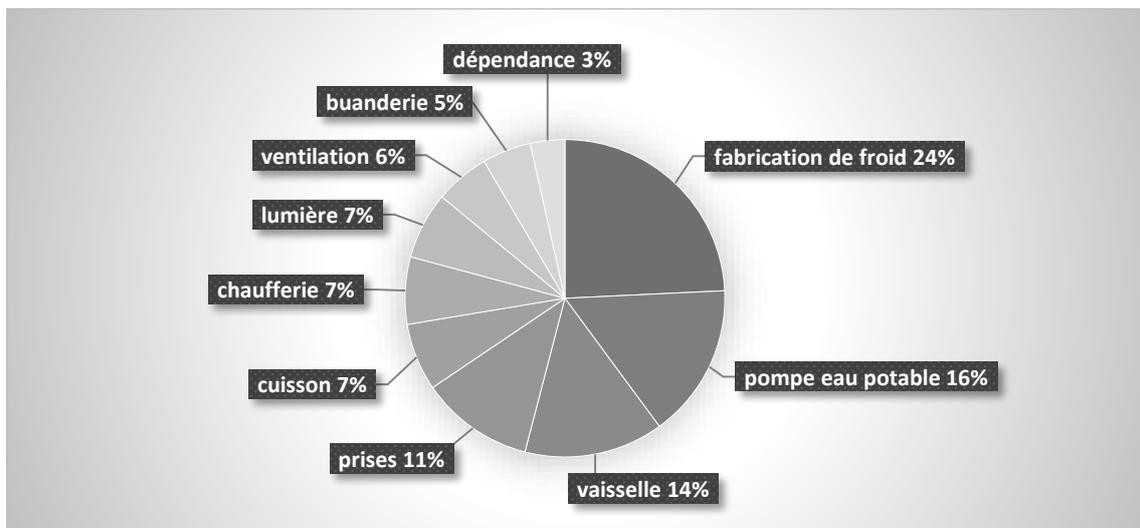


Figure 14: Tri par catégorie de consommateurs, portion totale pour une semaine : 1.5 MWh

3.4.5 Actions résultantes

L'analyse des résultats ci-dessus a permis de déduire les propositions d'améliorations suivantes.

- **Réorganisation du groupe 1 ■**

Une restructuration du groupe 1 supprimant les éléments non-vitaux et ajoutant les éventuels éléments vitaux d'autres groupes permettrait de déclencher complètement les groupes 2+3 durant la nuit. Toute l'énergie perdue des charges dormantes de ces deux groupes serait utilisée pour chauffer les tampons d'eau chaude. L'ensemble des charges inutile de nuit est estimé à 1kW. Le gain en litres de mazout est calculé de la manière suivante :

$$E = P \cdot t = 1kW \cdot 8h \cdot 120j = 960 kWh = 120 l_{mazout} \quad (11)$$

- **Arrêt automatique des groupes 2+3 durant la nuit**

Pour faciliter la mise en place de la mesure précédente, l'automation peut être utilisée pour rendre le déclenchement nocturne des groupes 2+3 autonome.

- **Modification des heures de fonctionnement ■**

La Figure 12 permet d'imaginer une modification des habitudes des utilisateurs de l'hôtel afin de retrouver un creux de consommation dans l'après-midi entre 17h et 19h qui permettrait de basculer l'hôtel sur la turbine. L'activité de ces 2h pourrait être répartie plus tôt dans la journée. La puissance moyenne de ce laps de temps est estimée à 3kW. L'arrêt de la génératrice permettrait de gagner sur une saison d'hiver :

$$E = P \cdot t = 3 kW \cdot 2h \cdot 120j = 720 kWh = 327 l_{diesel} \quad (12)$$

En alimentant l'hôtel, la turbine ne pourrait plus chauffer les tampons d'eau. Il faut soustraire au litre effectivement gagné

$$E = P \cdot t = -3 kW \cdot 2h \cdot 120j = -720 kWh = -90 l_{mazout} \quad (13)$$

Le gain effectif en litres pour cette mesure serait donc de 237 litres.

• **Basculement automatique génératrice ou turbine** ■

Pour faciliter la mise en place de la mesure précédente, un basculement automatique des groupes serait nécessaire. Il faut pour cela remplacer les commutateurs manuels actuels de la Figure 9 par des contacteurs verrouillés mécaniquement. Le schéma ci-dessous propose une nouvelle distribution de l'hôtel qui permettrait une liberté complète. Une bonne partie du matériel nécessaire est disponible dans le stock de pièces inutilisées de l'entreprise R&D Carbon. L'automatisation de ce procédé est rendue possible par les multiples mesures de puissances et l'automate existant. Le coût d'une telle modification ne serait donc pas excessif.

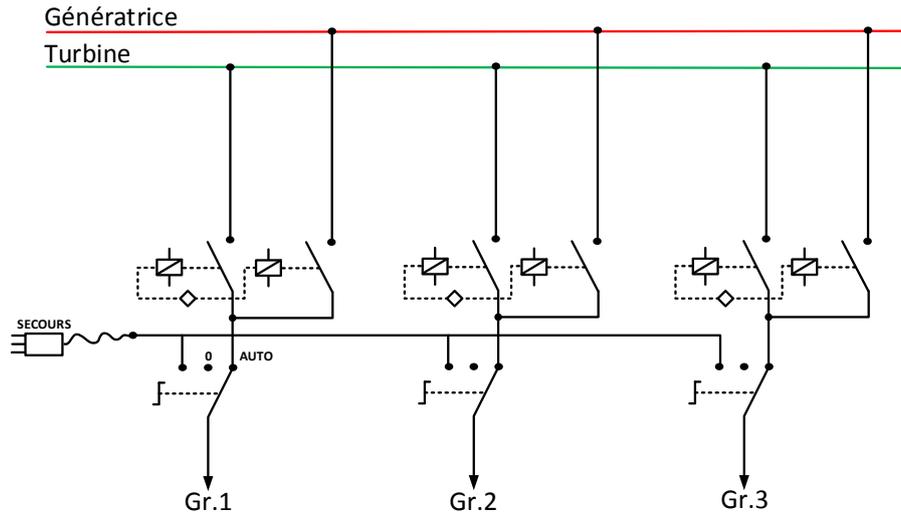


Figure 15: Proposition de nouvelle distribution de l'hôtel

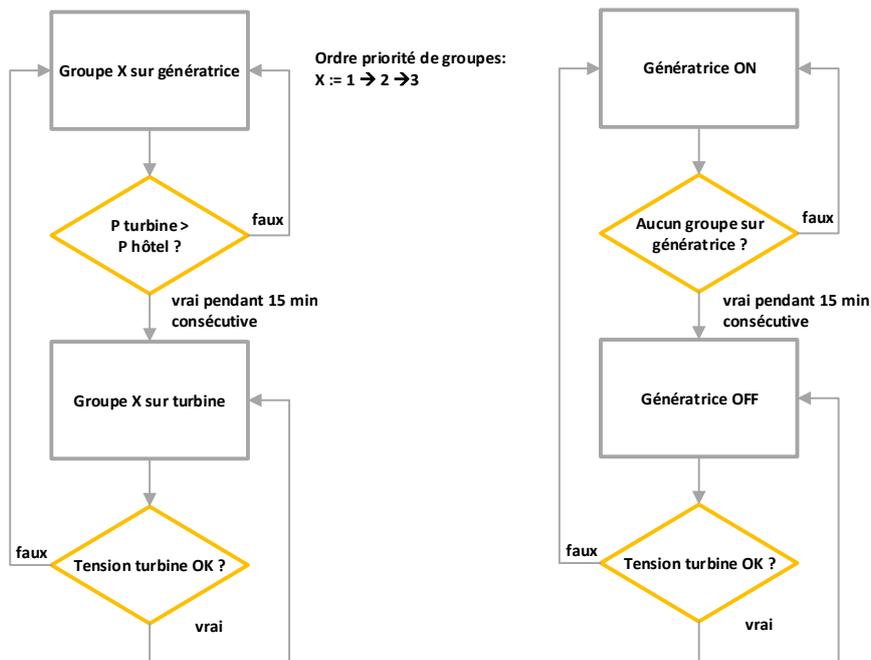


Figure 16: Proposition de diagramme de flux de la nouvelle distribution

• **Remplacement ou optimisation du top 10 des consommateurs ■**

Chambre froide : La Figure 14 nous fait prendre conscience de l'important apport d'énergie nécessaire à la fabrication du froid. Une réflexion serait nécessaire pour centraliser et optimiser les divers appareillages permettant de maintenir les denrées périssables au frais. Une question se pose sur la nécessité de maintenir autant de boissons au frais, par exemple dans les frigos du self. La cave ne permet-elle pas d'assurer cette fonction ?

Un système d'utilisation de l'air frais extérieur existe sur les chambres froides mais n'a jamais été mis en place. L'estimation du gain a été réalisée de la manière suivante :
CF : chambres froides

$$T_1 = T_{moyenne\ CF} = \frac{T_{congélateur} + T_{frigo}}{2} = \frac{-19^{\circ}C + 4^{\circ}C}{2} = -7.5^{\circ}C$$

$$T_2 = T_{moyenne\ extérieur} = -3.5^{\circ}C \quad (14)$$

$$T_3 = T_{ambient\ hôtel} = 20^{\circ}C$$

La température moyenne extérieure de l'hiver 2014/2015 a été de $-3.5^{\circ}C$ (voir Figure 30). L'écart de température que doivent encaisser les machines de froid suivant la variante A ou B :

$$\Delta T_A = \Delta_{actuel} = T_3 - T_1 = 20^{\circ}C - (-7.5^{\circ}C) = 27.5^{\circ}C$$

$$\Delta T_B = \Delta_{futur} = T_2 - T_1 = -3.5^{\circ}C - (-7.5^{\circ}C) = 4^{\circ}C \quad (15)$$

Pour l'hiver 2014/2015, selon la Figure 13, les chambres froides ont consommées

$$E_{CF\ A} = 22\% \cdot 1500 \frac{kWh}{7\ j} \cdot 120\ j = 5657\ kWh \quad (16)$$

Une règle de trois avec les deltas de température permet de connaître la consommation de la variante B.

$$E_{CF\ B} = \frac{E_{CF\ A}}{\Delta T_A} \cdot \Delta T_B = \frac{5657\ kWh}{27.5^{\circ}C} \cdot 4^{\circ}C = 822\ kWh \quad (17)$$

$$gain_{total} = E_{CF\ A} - E_{CF\ B} = 5675\ kWh - 825\ kWh = 4834\ kWh$$

Si l'on considère que sur la saison, les chambres froides ont été alimentées à moitié par la turbine et à moitié par la génératrice, le gain en litre serait le suivant :

$$\begin{aligned} gain_{diesel} &= \frac{gain_{total}}{2} = 2417 kWh = 1098 l_{diesel} \\ gain_{mazout} &= \frac{gain_{total}}{2} = 2417 kWh = 302 l_{mazout} \end{aligned} \quad (18)$$

Le gain effectif est de 1400 litres d'huile.

Bain-marie : La Figure 13 fait apparaître le bain-marie électrique en quatrième position. L'utilisation du bain-marie aux heures de pointe entraîne nécessairement son alimentation par la génératrice. Le remplacement de ce bain-marie électrique par un bain-marie à gaz permettrait l'économie de :

$$E = 7\% \cdot 1500 \frac{kWh}{7j} \cdot 120 j = 1800 kWh = 818 l_{diesel} \quad (19)$$

Bien sûr, le remplacement d'une énergie fossile par une autre énergie fossile n'est pas conventionnel. Cependant le cycle diesel \rightarrow électricité \rightarrow chaleur dépasse légèrement un rendement de 20% alors que le cycle gaz \rightarrow chaleur atteint lui quasi 100%.

Finalement, en considérant un investissement de 2000.- pour le bain-marie et le montage, le temps de retour sur investissement est de 2.5 ans.

- **Utilisation économe de l'énergie ■**

Pour terminer ce chapitre sur la consommation électrique, il est important de rappeler qu'en ilotage à 2337 mètres d'altitude, l'énergie n'est pas gratuite. Bien sûr, dans l'hôtellerie, les clients ont payé pour un certain confort, pourtant quelques gestes simples permettraient une économie certaine de litres de mazout. Comme le bain-marie, l'éclairage représente par exemple 7% de la portion totale énergétique. Le pourcentage d'économie de tous les efforts réunis est estimé à 5% de la portion totale. Les gains sont partagés à moitié sur la génératrice et l'autre sur la turbine. Donc sur une saison de 120 jours :

$$\begin{aligned} E &= 5\% \cdot 1500 \frac{kWh}{7j} \cdot 60 j = 642 kWh = 292 l_{diesel} \\ E &= 5\% \cdot 1500 \frac{kWh}{7j} \cdot 60 j = 642 kWh = 80 l_{mazout} \end{aligned} \quad (20)$$

3.5 Courbes caractéristiques de la turbine

La documentation de la turbine actuellement installée ne fournit pas de caractéristiques de fonctionnement. Afin de connaître par exemple le débit nécessaire au fonctionnement de la turbine Pelton, il était important d'effectuer une campagne de mesure. Cette action permettra par exemple d'optimiser l'ouverture des injecteurs en fonction du niveau d'eau et de la pression.

3.5.1 Description de la mesure

Pour cette mesure, la liaison 1000V avec l'hôtel ainsi que la liaison 400V avec le barrage ont été interrompues. L'intégralité de la puissance produite par la turbine est donc détruite localement dans les résistances de sécurité placées dans la rivière. Un enregistreur PEL103 est utilisé pour mesurer cette puissance. Un capteur de pression situé juste en aval de la turbine nous informe sur les pertes de charges. Les mesures ont été faites le 27 mai 2015 alors que l'eau était en abondance et que le barrage débordait. Ceci a garanti un niveau maximal et constant durant toute la mesure.

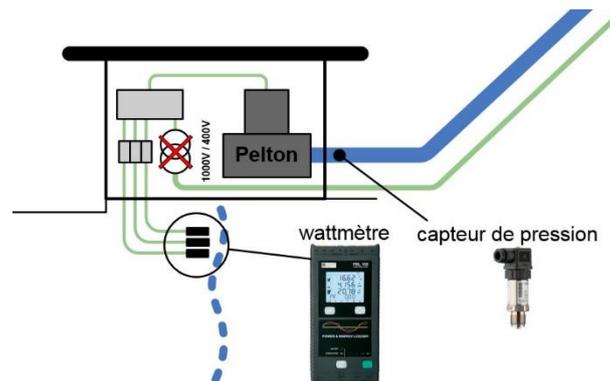


Figure 17: Mesure de la turbine, positionnement des appareils

3.5.2 Hypothèse

Afin de simplifier les calculs, l'hypothèse suivante a été faite. Les chutes de pression à l'entrée de la turbine sont dues uniquement aux pertes de charges dans la conduite forcée et non à la transformation de la pression statique en pression dynamique. Cette hypothèse est confortée par les relations suivantes.

$$A_1 \text{ (conduite forcée)} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.15^2}{4} = 0.018 \text{ m}^2 \quad (21)$$

$$A_2 \text{ (maximum injecteurs)} = \sum_{i=1}^6 \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = 0.001 \text{ m}^2$$

L'équation (21) montre le rapport des sections de la conduite forcée et celle de tous les injecteurs ouverts.

$$c = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 120} = 48.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (22)$$

La formule de Torricelli (22) donne la vitesse théorique en sortie des injecteurs

$$A_1 \cdot c_1 = A_2 \cdot c_2 = 2.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (23)$$

L'équation (23) donne la vitesse maximum dans la conduite forcée.

$$\underbrace{p + \rho_{eau} \cdot g \cdot h}_{\text{pression statique}} + \underbrace{\rho \cdot \frac{c_1^2}{2}}_{\text{pression dynamique}} = \text{const} \quad (24)$$

$$\rho_{eau} \cdot g \cdot h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \cdot 120 \text{ m} = 11.77 \text{ bar}$$

$$\rho \cdot \frac{c_1^2}{2} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{2.8^2}{2} = 0.04 \text{ bar}$$

Dans l'équation de Bernoulli (24), on veut donc montrer que le terme de pression dynamique dans le pire des cas est faible par rapport à la pression statique. On peut désormais dire que la variation de pression mesurée par le capteur n'est donc due qu'aux pertes singulières et linéaires de la conduite forcée.

Le rendement global de la turbine a été fixé à 80%.

3.5.3 Résultats des mesures

L'ouverture successive des injecteurs couplée à la mesure de la puissance électrique a permis de dessiner les graphiques suivants.

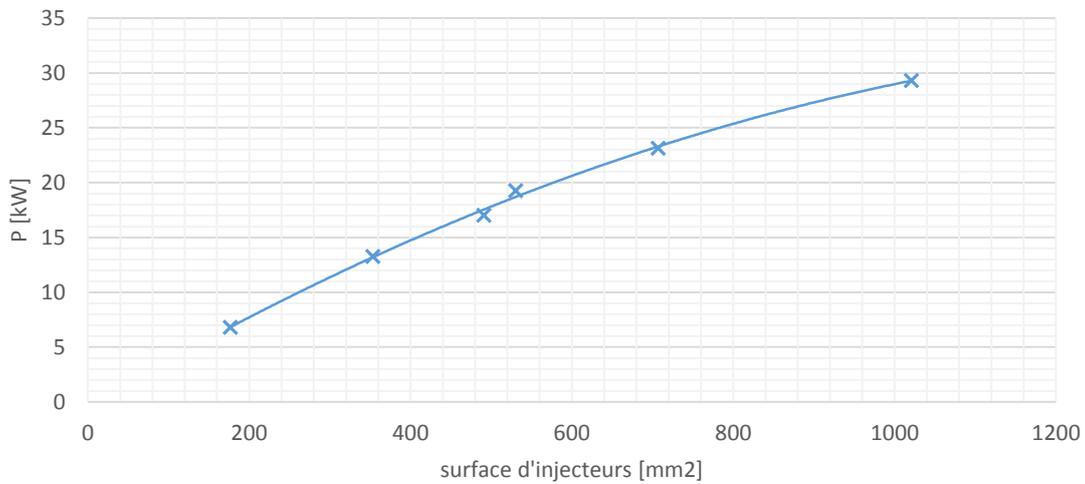


Figure 18: Puissance électrique en fonction de la surface d'injecteurs

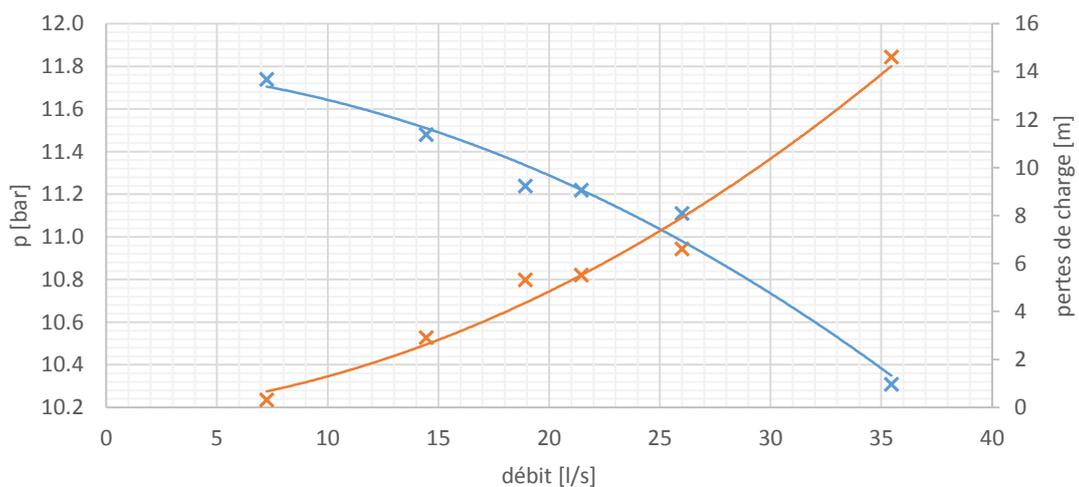


Figure 19: Pression et pertes de charge en fonction du débit

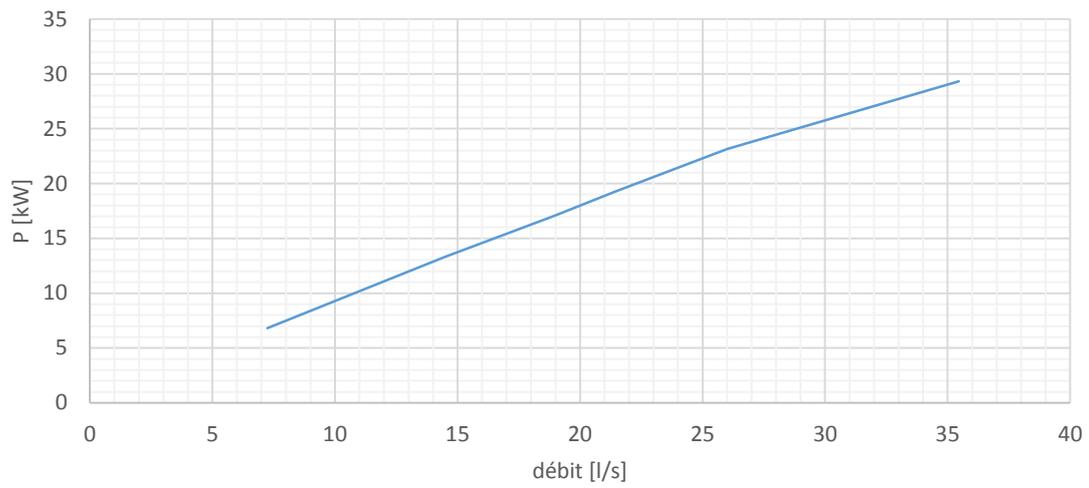


Figure 20: Puissance électrique en fonction du débit d'eau

La Figure 20 nous montre que 1 litre/seconde correspond environ à 1kW.

3.5.4 Actions résultantes

Par ces caractéristiques il en résulte maintenant les actions suivantes :

- **Surveillance du fonctionnement de la turbine** ■

Une logique de surveillance peut désormais être programmée sur l'automate de l'hôtel. En effet si les mesures de la turbine sortent des valeurs standards, une alarme peut être déclenchée.

- **Modification des injecteurs** ■

Les 6 injecteurs actuellement en place sont disposés de la manière suivante :

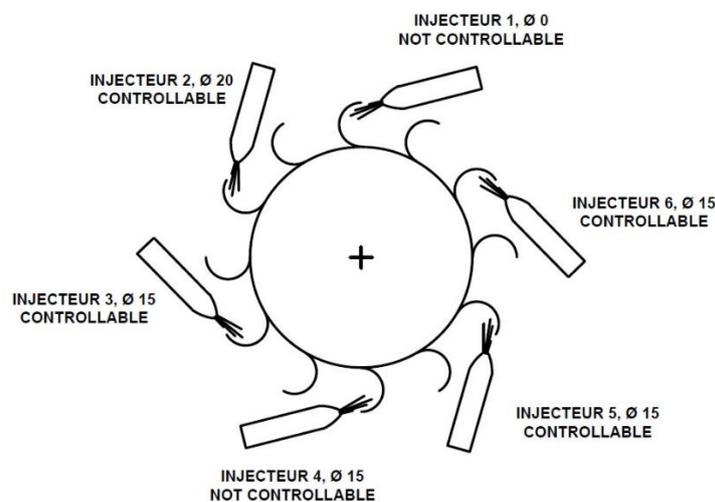


Figure 21: Positionnement des injecteurs de la turbine

L'idée est de remplacer l'injecteur 1 toujours fermé par un injecteur contrôlable de diamètre 10mm afin d'avoir une plus grande finesse à basse puissance. En effet, on remarque sur la Figure 18 qu'il y a un trop grand écart entre l'ouverture du premier injecteur et du second. La puissance fait un saut de 7 kW à 13 kW. Il serait judicieux d'avoir un point intermédiaire à 10kW pour profiter plus longtemps du débit descendant ou plus rapidement du débit montant. Pour le calcul de gain, prenons le cas de deux semaines à débit intermédiaire de 10kW à la place des 7kW minimum actuel.

$$E = \Delta P \cdot t = (10kW - 7kW) \cdot 2 \text{ sem} = 1008 \text{ kWh} = 126 \text{ } l_{mazout} \quad (25)$$

- « *Maximum power point tracker* » ■

Un développement approfondi permettrait la création d'une recherche du point maximum de puissance. L'algorithme se baserait sur les mesures de pression, de niveau de barrage et de puissances pour proposer à l'utilisateur une combinaison optimale d'injecteurs en tout temps. Par contre, l'installation d'actuateurs sur les injecteurs pour les rendre pilotables à distance n'est pas forcément une bonne idée. En effet, l'action humaine d'ouverture et fermeture des injecteurs permet également un rapide contrôle visuel de l'installation et cela est très important pour anticiper les dysfonctionnements.

3.6 Compensation du réactif de la ligne 1000V

3.6.1 Description de la mesure

Afin de pouvoir estimer l'impact des pertes de la liaison 1000V, deux enregistreurs PEL103 ont été placés respectivement au départ de la ligne côté primaire du transformateur et à l'arrivée de la ligne côté secondaire du transformateur. Les mesures ont été réalisées sur deux semaines. Le graphique ci-dessous résume quelques points de fonctionnement de la turbine et les pertes correspondantes sur la ligne.

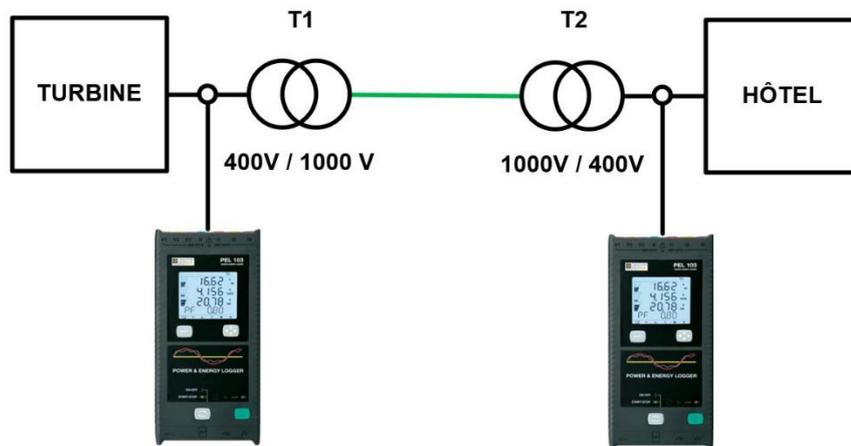


Figure 22: Mesure de la ligne 1000V, positionnement des appareils

3.6.2 Résultat s des mesure s ✕

Les pertes sur la ligne 1000V ne sont pas négligeables. On peut les résumer grossièrement à 10% de la puissance produite par la turbine. Les pertes fer des transformateurs apparaissent aux alentours de 300W. Une mesure précise des pertes fer n'a pas pu être faite en raison de l'occupation de l'hôte l lors de ces mesure s.

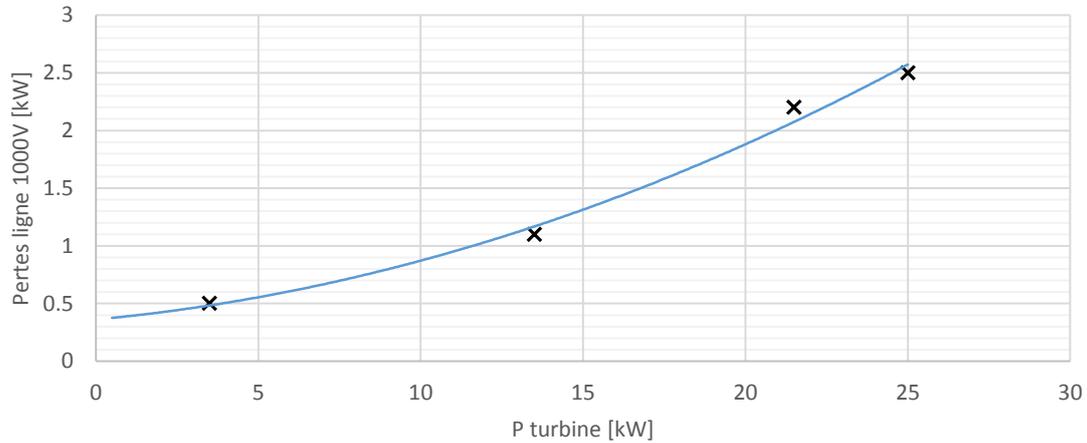


Figure 23: Pertes sur la ligne 1000V pour plusieurs points de fonctionnement

Le graphique ci-dessous montre un apport de réactif inductif plutôt constant par rapport à la puissance réactive de la turbine. La magnétisation des transformateurs doit être à l'origine de ce réactif inductif. Cependant cette composante reste faible à côté de la puissance active transportée. Aucune compensation n'est donc envisagée.

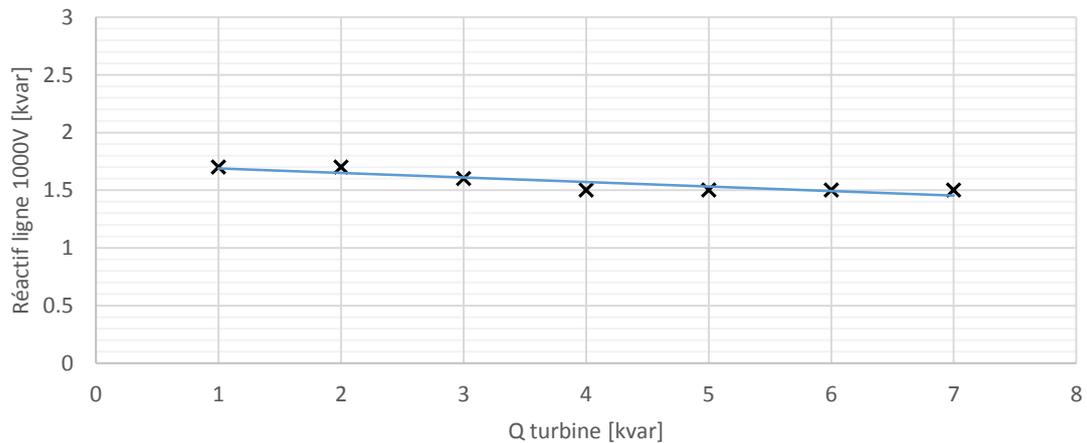


Figure 24: Réactif inductif généré par la ligne 1000V