

ÉLECTROTECHNIQUE

Un projet pluriannuel au service du patrimoine

ÉRIC FÉLICE ^[1]

Le lycée des métiers Amyot-d'Inville de Senlis s'est engagé dans un partenariat avec l'Institut de France pour réhabiliter une centrale hydroélectrique du début du XX^e siècle. Un projet dont la dimension culturelle n'est pas le moindre attrait, et un chantier de longue haleine qui verra deux classes se relayer. La première a déjà mené à bien l'étude d'avant-projet. Reste à la seconde à mettre en service les solutions proposées...

La genèse du projet

C'est M. Aymar de Virieu, l'administrateur du domaine de l'abbaye royale de Chaalis ¹ à Ermenonville dans l'Oise, qui a proposé au lycée des métiers Amyot-d'Inville de Senlis de participer à la réhabilitation de la centrale hydroélectrique du domaine, souhaitée par son propriétaire, l'Institut de France.

L'installation, qui date de 1904, a été arrêtée en 1963 lorsque EDF a électrifié l'ensemble du domaine de Chaalis. Elle produisait une énergie électrique de 9 kW, au service du château (éclairage, ascenseur électrique), l'actuel musée Jacquemart-André, situé au cœur du domaine, grâce à l'entraînement d'une dynamo électrique. Le poste de contrôle et de régulation de la salle des machines était pour l'époque une installation innovante aux technologies d'avant-garde ². Le stockage de l'énergie électrique était également prévu, ce qui, associé à la réserve d'eau pour l'entraînement de la turbine que constituent les 18 hectares d'étangs du domaine, garantissait une certaine sûreté de la production d'énergie électrique pour le domaine.

[1] Chef de travaux au lycée Amyot-d'Inville de Senlis (60).

La réfection de la centrale et du bâtiment qui l'abrite, le moulin de la Pêcherie, s'inscrit dans le cadre de la sauvegarde à la fois du patrimoine architectural du sud de l'Oise et du patrimoine industriel de la région picarde. De plus, l'installation est une illustration parfaite d'une production d'électricité issue d'une énergie renouvelable, et avec le soutien de l'Ademe Picardie (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), déjà partenaire du lycée dans le cadre de sa démarche de développement durable, des ateliers de découverte devraient permettre dans l'avenir de sensibiliser les élèves de collèges et de lycées à cette thématique.

Le projet, indépendamment de sa dimension technique, propose donc aux élèves comme aux enseignants la découverte d'un patrimoine exceptionnel. Le service culturel du domaine de Chaalis met au service du lycée des intervenants, animateurs ou historiens, pour les visites du site – l'abbaye, la chapelle, l'orangerie, le musée Jacquemart-André. Associer une dimension culturelle au projet renforce son intérêt et s'inscrit parfaitement dans notre mission de transmission.

D'autre part, les différentes instances, qu'elles soient rectorales, régionales, associatives ou encore

départementales, y sont très sensibles : l'obtention d'un financement pour mener à bien un projet avec des élèves ou des étudiants est bien souvent conditionnée à un partenariat avec une entité culturelle (le CNRS dans le cadre d'un atelier scientifique et technique concourant pour la Coupe de France de robotique, par exemple). En l'occurrence, le lycée, en liaison avec la DGESCO, a répondu à un appel à projets du Fonds d'expérimentation pour la jeunesse (FEJ, doté par l'État et des partenaires privés, essentiellement Total et l'UIMM) dans le cadre

mots-clés

électrotechnique, énergie, lycée professionnel, projet, puissance



1 Les grilles du domaine de l'abbaye royale de Chaalis



2 Le tableau de régulation et de distribution de l'énergie électrique d'origine

de l'initiative « Développement de l'esprit d'entreprendre ». Notre projet fait partie des 28 retenus à l'échelle nationale pour l'année 2012 – il était le seul à l'être pour la Picardie. Son budget prévisionnel est présenté dans le tableau 3, extrait du dossier déposé à la DGesco.

Les parties prenantes

Le projet a été proposé à une classe de 16 élèves de seconde bac pro Électrotechnique.

Le prescripteur en est l'Institut de France, propriétaire du domaine de l'abbaye royale de Chaalis. Le service pédagogique et culturel du domaine collabore au projet, et plus particulièrement son responsable, M. Jean-Marc Vasseur. Le domaine a créé les conditions nécessaires à sa mise en œuvre : avec l'aide des sapeurs-pompiers, il a rendu le canal venant de la Launette à sa fonction d'alimentation du moulin de la Pêcherie, qu'il a mis à disposition des équipes pédagogiques.

Le maître d'œuvre est le lycée des métiers Amyot-d'Inville, représenté par son chef d'établissement et, par délégation, son chef de travaux. Les professeurs associés sont les trois professeurs d'électrotechnique du lycée, le professeur de lettres-histoire, le professeur de mathématiques-sciences et le professeur d'arts appliqués de la classe de 1^{re} bac pro Électrotechnique.

Des membres de l'APJM, l'Association pavillon Jacques-de-Manse (aussi appelé « moulin des princes », dépendant du domaine de Chantilly), participent à la rénovation mécanique de la turbine et du multiplicateur de la centrale hydroélectrique ; ce sont des partenaires avec qui nous devons composer et nous coordonner.

	Dépenses	Recettes	
		Lycée et mécénat EDF	FEJ
En 2011 (septembre à décembre)	1 visite du site Transport : 210 € HSE : 12 x 40 = 480 €	0	690 €
En 2012	1 caméra infrarouge : 1 190 € 6 déplacements : 1 320 € Fournitures diverses : 450 € HSE : 144 x 40 = 5 760 €	320 € 1 000 €	7 400 €
En 2013 (janvier à juin)	4 déplacements : 920 € Fournitures diverses : 550 € HSE : 72 x 40 = 2 880 € Restitution du projet et valorisation (fournitures exposition, film, frais de réception...) : 1 800 €	250 € 1 000 €	4 900 €
Total	15 560 €	2 570 €	12 990 €

3 Le budget prévisionnel du projet

L'étude d'avant-projet

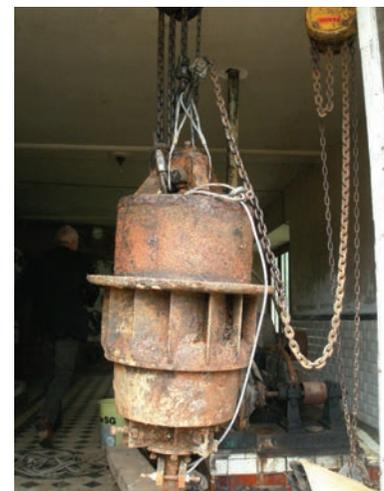
L'installation existante

Dans un premier temps, avant toute intervention, il était indispensable pour les enseignants et les élèves d'appréhender l'ensemble du site et de repérer les infrastructures techniques de la centrale hydroélectrique, notamment la salle des machines. Nous en avons donc suivi une visite commentée.

Les différents relevés effectués sur site et l'identification des composants du tableau de régulation de la centrale ont permis d'élaborer un premier schéma électrique. L'installation d'origine est composée des éléments suivants :

- Une turbine 4
- Un multiplicateur (renvoi d'angle) 5
- Un tableau de régulation électrique 2
- Une génératrice à courant continu Thomson-Houston de 9 kW 6

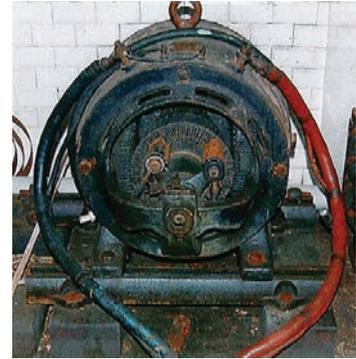
L'axe de la turbine est associé au renvoi d'angle, qui permet d'entraîner en rotation un arbre horizontal, qui lui-même transmet le mouvement de rotation à la génératrice à courant continu par une courroie.



4 La turbine avant rénovation par l'APJM



5 Le multiplicateur avant et après rénovation par l'APJM



6 La génératrice à courant continu de 9 kW (archives de Chaalis)

IPPC-6152
IPPC-6172
IPPC-6192

**15" XGA/17" SXGA/19" SXGA TFT LCD
LED Backlight Core™ i7/i5/i3 Industrial
Panel PC**

NEW



Features

- 15" XGA/17" SXGA/19" SXGA TFT LCD with touchscreen
- Supports Intel® Core™ i7/i5/i3 processor with Q87 chipset (up to 3.1GHz)
- System supports four DIMM sockets support up to 32 GB DDR3 1333/1600 MHz SDRAM
- Offers two expansion slots (PCIe riser card optional) for PCI (PCIe) add-on cards
- SATA 2.0 or SATA 3.0 HDDs and RAID 0,1 compatibility
- Front USB access and system reset function
- Front panel is IP65 compliant
- Supports Intel AMT 9.0 and Intel vPro competent
- Supports Microsoft® Windows® 8 and Windows 7
- Supports SUSIAccess and Embedded Software APIs
- Optional Functionality -CFast ,PCI/ PCIe expansion,DVD-ROM

7 L'écran de restitution didactique

Le tableau de régulation comporte tous les équipements électriques (d'époque) permettant le pilotage de la génératrice : interrupteur, contacteur, rhéostat, affichage des mesures (ampèremètres et voltmètres).

La centrale fournissait une intensité de 67 A sous une tension de 110 Vcc, soit une puissance de 7 370 W.

Afin de maintenir une stabilité sur le réseau et une possibilité de puissance supplémentaire, un ensemble de batteries permettait de fournir une intensité de 45 A (il ne sera pas réhabilité).

Il était nécessaire de préciser un certain nombre de données pour présenter une solution technique d'avant-projet pour cette réhabilitation. Nous nous sommes basés sur les valeurs suivantes :

Hauteur de la chute d'eau dans le puits de la turbine : 5 m

Débit : 80 L/s (donnée précisée par le maître d'ouvrage du domaine)
Vitesse de la turbine verticale : 350 tr/min
Rapport du multiplicateur mécanique : 2,5
La vitesse obtenue de l'arbre horizontal est donc de 875 tr/min.

La génératrice à courant continu présente les caractéristiques suivantes :
Vitesse : de 900 à 1 410 tr/min
Tension : 115 V
Intensité : 140 A

Description générale des installations futures

Afin d'aboutir à une préconisation d'installation qui réponde aux attentes de l'Institut de France, différentes solutions techniques ont été étudiées, prenant en compte les principaux sous-ensembles du projet :

– l'équipement de production d'électricité, associé à la régulation de la charge ;

- le stockage éventuel de l'électricité (chargeur-onduleur pour une énergie tampon) ;
- le contrôle-commande de l'installation, associé à des outils didactiques (animations, vidéo...).

L'état dégradé de la génératrice à courant continu d'origine a suscité l'idée de proposer comme solution technique une génératrice de substitution, tout en conservant, dans la chaîne cinématique, l'ancienne génératrice entraînée mécaniquement, sans qu'elle assure pour autant une quelconque production d'énergie électrique, sa présence assurant la dimension didactique de l'installation.

Pour respecter l'aspect historique du site, les équipements électriques seront installés dans la salle située derrière le tableau de régulation existant, et le système de production d'électricité sera invisible depuis la porte-fenêtre du bâtiment – ce dernier, pour des raisons de sécurité, restant fermé au public. Cependant, la mise en place d'un afficheur visible 7 depuis cette porte-fenêtre permettra au public d'appréhender le fonctionnement de l'installation, qui sera filmé par des caméras. Cet écran affichera notamment, outre les vidéos issues de ces caméras, les mesures électriques suivantes : intensité, tension, puissance, fréquence. De plus, une fontaine matérialisera la production d'énergie électrique.

L'installation envisagée permettra de fournir une tension de 230 V en 50 Hz. La production d'énergie

sera utilisée uniquement pour l'alimentation de l'éclairage (de l'ancien tableau électrique et de la salle des machines) et des prises de courant du seul moulin de la Pêcherie, ainsi que de la fontaine.

● **Estimation de la puissance consommée**

Éclairage du tableau existant : 4 lampes de 40 W, soit 160 W
 Éclairage du local : 2 lampes de 40 W, soit 80 W
 Prises de courant : 1 000 W (équipement portatif, PC, voire perceuse)
 Équipement propre à la nouvelle installation : 500 W
 Pompe pour la fontaine : 200 W
 Soit une puissance totale attendue d'environ 2 000 W.

Le dimensionnement du système de production d'électricité

Compte tenu des éléments que nous avons vus précédemment, le rendement de la turbine et du multiplicateur étant estimé à 0,7, la puissance calculée est :

$$P = g \cdot Q \cdot H \cdot R$$

$$= 9,81 \times 80 \times 5 \times 0,7$$

$$\approx 2\,750 \text{ W}$$

P : puissance en W
 Q : débit en L/s
 H : hauteur de la chute d'eau en m
 R : rendement de la turbine

Si cette puissance est bien inférieure à celle développée à l'origine, elle est néanmoins suffisante pour l'application envisagée.

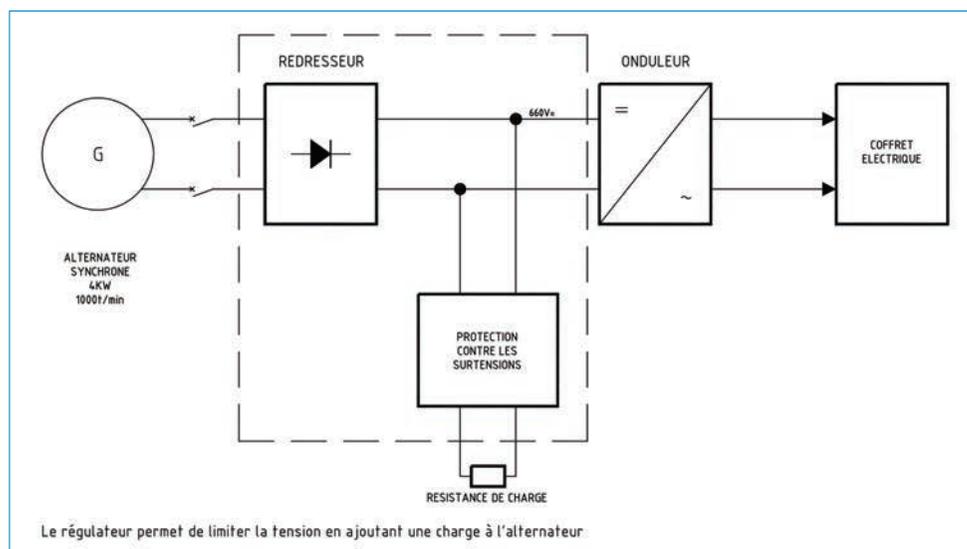
Le choix des systèmes de production d'électricité et de régulation

La production d'électricité

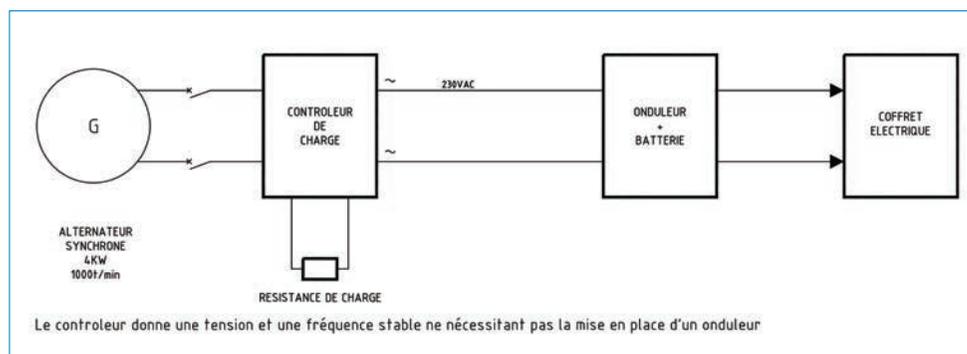
Les systèmes de production d'électricité, et plus particulièrement ceux destinés aux pico-centrales hydro-électriques (PCH), sont basés sur l'utilisation soit de génératrices à courant continu soit d'alternateurs (courant alternatif) asynchrones ou synchrones (excitation classique ou à aimants permanents). Le tableau 8

	Avantages	Inconvénients	Observations
Génératrice à courant continu	Équipement répandu sur le marché	Entretien fréquent : remplacement des balais Obligation de convertir le courant continu en alternatif pour l'utilisation	Solution envisageable
Alternateur asynchrone	Équipement répandu sur le marché Production d'un courant alternatif exploitable	A besoin d'être raccordé au réseau électrique pour assurer son excitation Doit fonctionner sur une plage de vitesse proche du synchronisme	Ne convient pas pour un site isolé
Alternateur synchrone	Équipement répandu sur le marché Production d'un courant alternatif exploitable	La régulation nécessite une alimentation extérieure pour l'excitation	Ne convient pas pour un site isolé
Alternateur synchrone à aimants permanents	Ne nécessite pas d'excitation extérieure (aimants permanents) La vitesse peut varier de +/- 50 % autour de sa vitesse nominale	Offres très peu développées pour les petites puissances Permet, dans certains cas, d'éviter la mise en place d'un multiplicateur La régulation de la tension et de la fréquence doit être réalisée par un système électronique (la fréquence varie suivant la vitesse de rotation)	Parfaitement adapté aux réseaux isolés

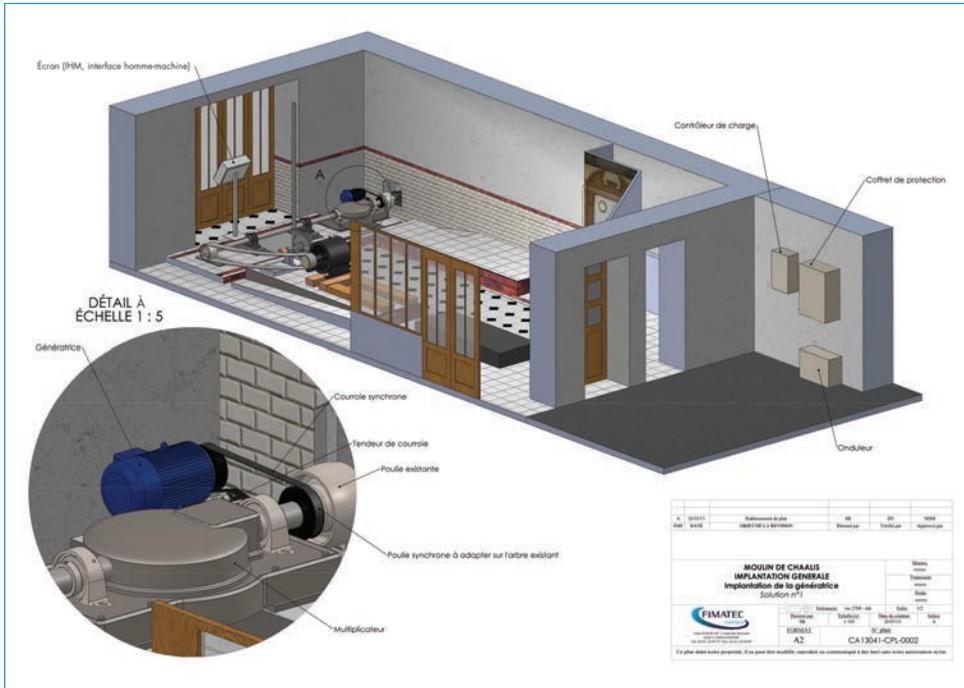
8 Tableau comparatif génératrice/alternateurs



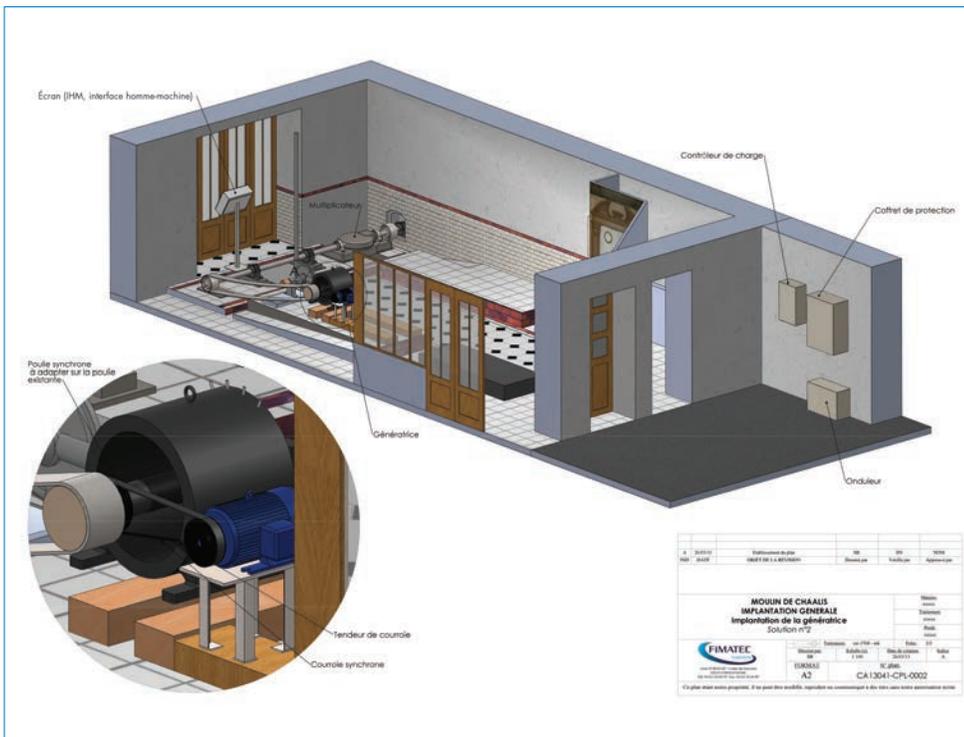
9 Le schéma de principe du redresseur-onduleur



10 Le schéma de principe du contrôleur de charge électronique



11 La 1^{re} solution d'implantation de l'alternateur



12 La 2^{de} solution d'implantation de l'alternateur

Le choix s'est porté sur un alternateur synchrone à aimants permanents, ayant, pour tenir compte de la puissance produite à l'époque et dans l'éventualité d'un besoin supplémentaire, les caractéristiques suivantes :
Puissance : 4 000 W

Tension : 230 V monophasé
Vitesse : 1 000 tr/min (machine 6 pôles)

Le contrôle de la charge et le stockage de l'énergie

Afin de contrôler l'adaptation de la production d'électricité à la charge,

il convient soit de réguler la production soit d'en évacuer le trop-plein sur des charges additionnelles.

Les alternateurs à aimants permanents ne permettent pas d'agir sur l'excitation, et par conséquent imposent l'évacuation de l'énergie, notamment vers des résistances de charge, pour adapter la charge globale à la production.

Le stockage de l'énergie via un chargeur-onduleur est une option qui procure au moins deux avantages : disposer d'une énergie tampon, notamment lors d'opérations de maintenance, et obtenir une tension et une fréquence stables.

Pour répondre à ces besoins, deux solutions sont proposées :

● 1^{re} solution : redresseur + onduleur

Le redresseur permet de transformer la tension de sortie de l'alternateur ayant une fréquence variable en tension continue 9.

Il est nécessaire de réaliser un équilibrage entre la puissance fournie et la puissance appelée par le réseau électrique. Cet équilibrage est assuré par une régulation de la charge. L'électricité non consommée est déchargée dans une batterie de résistances grâce au régulateur électronique.

L'onduleur transforme la tension continue en une tension alternative compatible avec les appareils consommateurs sous 50 Hz.

● 2^{de} solution : contrôleur de charge électronique + onduleur et batterie

Le contrôleur de charge contrôle en permanence la tension et la fréquence. La résistance de charge, comme dans la solution précédente, régule la puissance 10. L'onduleur avec batterie permet d'assurer une autonomie de 30 minutes.

L'onduleur (alimentation statique sans interruption) permet d'avoir une onde de sortie sinusoïdale. Il assure une protection aux utilisations quels que soient les défauts : variation, creux et absence de tension ; variation de la fréquence. Il devra présenter les caractéristiques suivantes :

Puissance : 5 000 VA
Tension : 230 V Ph + N
Autonomie à 25 °C : 35 min
Fréquence : 50 Hz

Au besoin, il sera possible d'ajouter des modules à la batterie – étanche, au plomb, sans entretien – afin d'adapter la durée d'autonomie.

La première solution, redresseur et onduleur, a l'inconvénient de fournir une tension en courant continu très élevée, de l'ordre de 360 V. L'onduleur associé CC/CA ne comporte pas de batterie.

Le contrôleur de charge proposé dans la seconde solution présente l'avantage de fournir en sortie une tension de 230 V et une fréquence de 50 Hz stables. La résistance de charge permet d'éviter une surtension, et l'onduleur assure une autonomie de 30 minutes à l'installation. C'est cette solution qui sera présentée à l'Institut de France.

Le choix des matériels

Une étude a été menée afin de déterminer les matériels à mettre en œuvre. La consultation s'est naturellement portée vers les grands constructeurs : Schneider Electric, ABB, Siemens, Leroy-Somer. Mais les PCH sont très éloignées de leur cœur de cible, et leurs offres sont essentiellement tournées vers les besoins des centrales hydrauliques de puissance élevée (de plusieurs mégawatts), et par conséquent vers des installations raccordées au réseau.

Les recherches ont donc été élargies aux fournisseurs de solutions pour l'éolien, celles-ci étant adaptables aux PCH : SMA, Alxion et Allytech. Seul ce dernier propose un système avec alternateur à aimants permanents et contrôleur de charge.

L'implantation du système de production d'électricité

● 1^{re} solution : l'alternateur

à proximité de la porte-fenêtre

L'alternateur est placé dans l'angle du mur afin qu'il ne soit pas visible depuis la porte-fenêtre du bâtiment [11](#).

Une nouvelle poulie est mise en place sur l'arbre existant, de type

à moyeu amovible pour éviter le clavetage de l'arbre. La poulie et la courroie sont de type synchrone afin d'éviter une tension trop importante sur l'arbre. Les poulies sont dimensionnées pour que la vitesse de l'alternateur soit de 1 000 tr/min. Le rendement avec ce type de courroies est de l'ordre de 98 %.

Le châssis mis en place permet une dépose du multiplicateur.

Afin de conserver l'aspect historique de la centrale, une simulation de l'entraînement de la génératrice d'origine est réalisée par une poulie sur roulement.

● 2^{de} solution : l'alternateur derrière la génératrice existante

Le nouvel alternateur est dissimulé derrière la génératrice d'origine [12](#). Comme dans la précédente solution, une simulation de l'entraînement de celle-ci est réalisée par une poulie sur roulement. Cette nouvelle poulie intègre en plus une poulie solidaire pour l'entraînement de l'alternateur – un montage qui évite une longueur de courroie trop importante.

La seconde solution a l'inconvénient de diminuer le rendement de l'accouplement turbine-alternateur, et de cumuler les pertes du fait de l'entraînement de la poulie de la génératrice d'origine par une courroie de cuir puis de l'alternateur.

La première présente en revanche l'avantage de dissimuler dans l'angle du mur l'alternateur et les passages de câbles, ces derniers se prolongeant dans le grenier de la salle des machines. C'est cette solution qui est préconisée. Elle repose sur la mise en œuvre des matériels suivants :

– Un alternateur à aimants permanents ayant les caractéristiques suivantes :

Puissance : 4 kW
Tension monophasée : 230 V
Fréquence : 50 Hz
Vitesse : 1 000 tr/min

– Un régulateur de la charge de type ELC-5i d'une puissance maximale de 5 kW ;

– Un onduleur Socomec de type Netys RT d'une puissance de 5 000 VA avec autonomie de 35 min ;

– Une armoire électrique de protection.

L'armoire, l'onduleur et le régulateur de charge seront mis en place dans le local situé derrière l'ancien tableau de commande.

Un travail de longue haleine

Nous l'avons vu, le projet a été initialement confié à une classe de 2^{de} pro Électrotechnique dans le cadre de l'initiative « Développer l'esprit d'entreprendre ». Engagé en octobre 2011, il devait s'étendre sur deux années scolaires. Mais cette durée s'est révélée insuffisante au regard de la dimension du projet : il fallait fabriquer de nouveaux arbres mécaniques de transmission de mouvement, la réfection du multiplicateur s'est heurtée à des difficultés techniques, le travail sur site est difficile en raison de la vétusté des lieux... Les élèves, avec l'échéance du bac, ne pouvant plus consacrer au projet le temps nécessaire, il a été décidé de passer le relais à une nouvelle classe de 2^{de} Électrotechnique du lycée – qui tirera ainsi elle aussi profit de cette expérience.

Le remontage de la chaîne mécanique (turbine, arbre principal et multiplicateur) permettant l'entraînement de la génératrice électrique a pris du retard, et devrait être terminé cet été. Quant à l'Institut de France, il a opté in fine pour la remise en état de la génératrice d'origine de 9 kW. Elle a été révisée par un bobinier, et les essais électriques et d'isolement qu'il a réalisés ont donné satisfaction.

Une fois la génératrice mise en place, il faudra définir avec les élèves les dispositifs de réglage et de commande nécessaires à son bon fonctionnement, puis monter un poste d'essai en charge (éclairage de la salle des machines, alimentation de la pompe de la fontaine). Le travail sera alors similaire à celui classiquement pratiqué en atelier d'électrotechnique dans le cadre des essais de systèmes.

Ce projet de longue haleine n'a pas fini de mobiliser l'équipe éducative du lycée ! ■