

# À Brest, soleil et vent

RICHARD NAEL, JEAN-PHILIPPE POIRIER [1]

Voici une expérience pédagogique originale de sensibilisation et de formation aux énergies renouvelables qui s'intègre dans la politique régionale de soutien au développement durable. Sa plate-forme expérimentale comprend trois éléments : une éolienne, des panneaux solaires photovoltaïques et un chauffe-eau solaire thermique. Mise en service en 2004, elle est maintenant utilisée en travaux pratiques dans la filière de génie électrique et en sciences de l'ingénieur.

**Mots-clés**

énergies renouvelables, lycée technologique, production, travaux pratiques

À u début de l'année scolaire 2002-2003, le conseil régional de Bretagne, associé à EDF et à l'Ademe, a lancé un appel à projets pour implanter dans cinq lycées de Bretagne une centrale d'énergies

renouvelables à usage didactique.

Le cahier des charges du projet stipulait que les installations devaient comporter trois types de production d'énergie :

- Solaire photovoltaïque

- Solaire thermique (eau chaude sanitaire)
- Production d'énergie électrique par éolienne

Le système devait également permettre une exploitation à distance par publication des données sur le Web.

Le lycée Vauban de Brest s'est porté candidat et a été sélectionné. L'installation de la centrale a été prise en charge par six étudiants durant l'année scolaire 2003-2004 dans le cadre du projet de BTS Électrotechnique, puis finalisée l'année suivante. Les exploitations pédagogiques ont commencé durant l'année 2004-2005, principalement en STS Électrotechnique (essais de système), en bac S SI, en bac STI Génie électrotechnique, en CPGE PT (dans le cadre des TIPE).

D'autres exploitations pédagogiques sont actuellement envisagées pour les collègues.

Ce système est en perpétuelle évolution afin de permettre une utilisation le plus large possible.

**Le système**

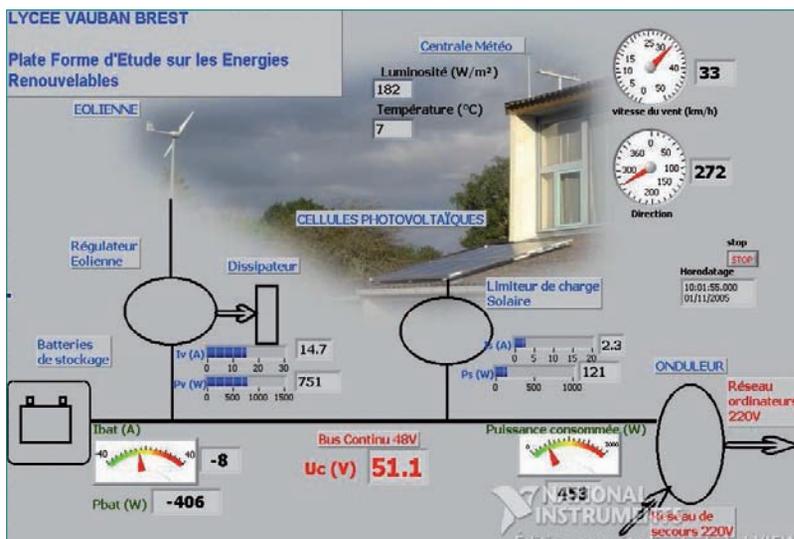
Le type d'installation choisi est celui d'une production en site isolé, c'est-à-dire sans injection dans le réseau. La centrale est homothétique de celle de l'île Saint-Nicolas de l'archipel de Glénan dans le Finistère sud, qui alimente un réseau de 21 clients (c'est-à-dire la totalité de l'île) essentiellement pour des besoins de pompage, d'éclairage, de fabrication de froid et de petit outillage, et comprend les éléments suivants :

Panneaux solaires :  
puissance crête 9 kW

Éolienne : 10 kW pour  
une vitesse de vent  
de 12 m/s (soit 24 nœuds)

Groupe électrogène : 32 kW

Batteries d'accumulateurs :  
tension 240 V, capacité  
1 500 Ah

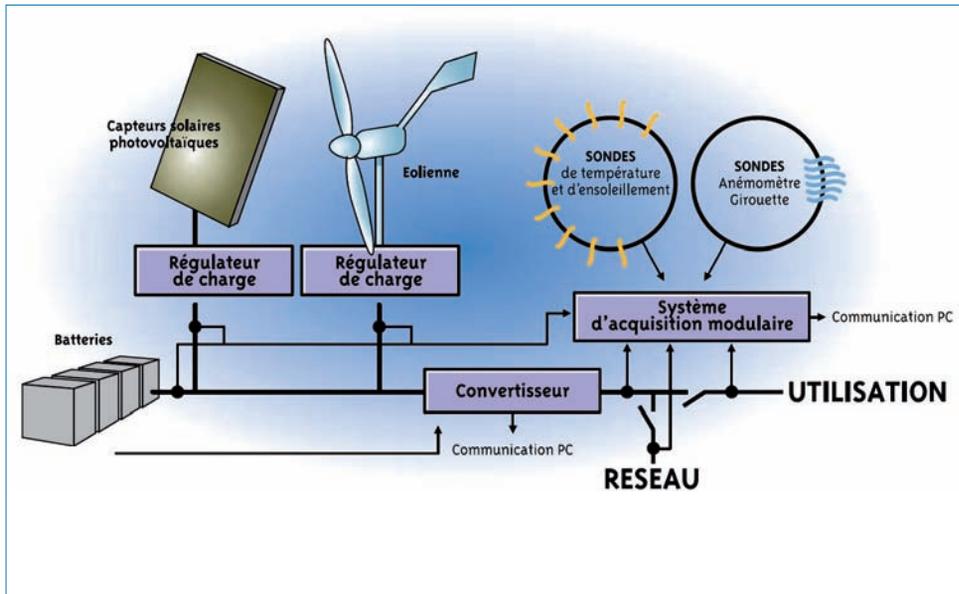


1 Le synoptique de l'installation



2 L'implantation de l'installation

[1] Respectivement professeur agrégé de génie électrique et chef de travaux au lycée Vauban de Brest (29).



3 Le schéma de câblage

4 L'éolienne bipale installée

<b>Puissances en Watts</b> (nominale / maximale)	1500 / 1800	<b>Courbe de puissance de l'aérogénérateur</b> 
<b>Vitesses de vent en m/s</b> (démarrage / nominale / de survie)	3 / 12 / 30	
<b>Vitesse de rotation en trs/min.</b> (nominale / maximale)	700 / 850	
<b>Hélice</b> Nombre de pâles	2	
Diamètre (mètres)	3,6	
Matériau des pâles	composite	
<b>Génératrice</b> Type	Synchrone, aimants perm., Neodymium	<b>Production de l'aérogénérateur à 6m/s moyen annuel K = 2.5</b> 
Tension de sortie	N.C. conversion en CC dans la nacelle	
Fréquence de sortie	N.C. conversion en CC dans la nacelle	
<b>Régulation</b>	Basculement à l'horizontale	
<b>Protection tempête</b>	Basculement à l'horizontale	
<b>Frein</b>	Aucun	
<b>Productible* à 6 m/s de vent</b> En kWh par an	5 430	
<b>Types de support disponibles*</b>	Tubulaire haubané, treillis autoporteur.	

5 Les caractéristiques de l'éolienne bipale

La centrale du lycée Vauban est plus modeste ; le synoptique de l'installation est le même hormis le fait que l'énergie d'appoint est fournie

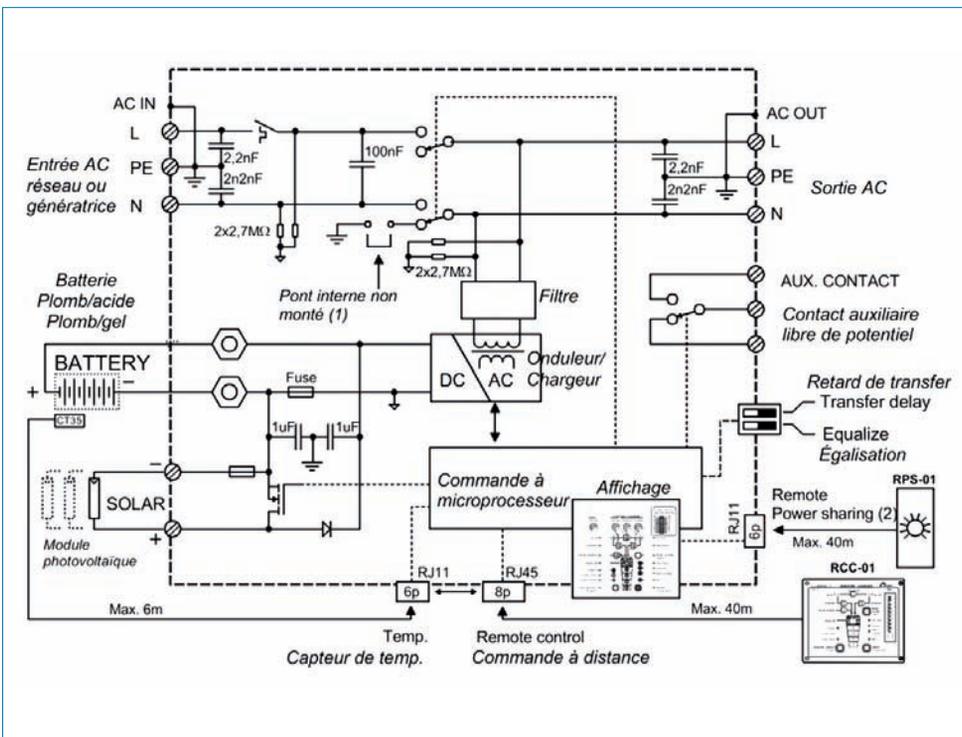
par le réseau EDF **1**. En effet, l'onduleur transformant la tension continue en tension alternative permet en cas de décharge trop importante des

batteries de basculer l'alimentation sur le réseau EDF. Afin de respecter au maximum l'identification avec l'installation des îles de Glénan, cet

Modèle	KC120-1
Puissance maximale	120 W
Tension maximale	16,9V
Intensité maximale	7,1 A
Tension circuit ouvert	21,5 V
Intensité de court-circuit	7,45 A
Longueur	1 425 mm
Largeur	652 mm
Épaisseur	56 mm
Poids	11,9 kg



6 Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques 7 L'onduleur



8 Le schéma structurel de l'onduleur

onduleur ne permet pas d'injection dans le réseau.

Le client est une salle informatique de quatre ordinateurs (extensible à 8).

L'installation comprend les éléments suivants :

Panneaux solaires :  
puissance crête 1 kW 2

Éolienne : 1,5 kW  
pour une vitesse de vent  
de 12 m/s, soit 24 nœuds 2

Batteries d'accumulateurs : ten-  
sion 48 V, capacité 400 Ah

### Les constituants

Le schéma de câblage initial général de l'installation est donné en 3. Le câblage, à l'exception des batteries, est réalisé dans une armoire à l'intérieur du bâtiment.

#### • L'éolienne

Il s'agit d'une éolienne bipale à vitesse variable de marque Inclina 1500, construite en Espagne 4. Ses caractéristiques sont données dans le tableau 5.

Le générateur est un alternateur triphasé à aimants permanents.

À forte vitesse de vent, la tête pivote verticalement (pâles alors horizontales) pour assurer la protection contre les surcharges mécaniques. Elle démarre pour une vitesse de vent de 3 m/s ; à 12 m/s, elle tourne



9 La centrale météo



10 L'éolienne de 60 W



à 750 tr/min et fournit une puissance de 1 500 W.

Un régulateur permet de redresser la tension produite afin de charger les batteries et d'assurer la sécurité électrique en évacuant l'énergie produite dans un rhéostat de dissipation lorsque la batterie est totalement chargée.

● Les panneaux photovoltaïques

Constitués de cellules photovoltaïques de type polycristallin, les panneaux, de modèle Kyocera KC120, couvrent une surface de 7 m<sup>2</sup> (8 panneaux). Leurs caractéristiques sont données dans le tableau 6.

La tension de sortie à vide est d'environ 90 V, et la puissance crête de 960 W. Entre les cellules et les batteries est disposé un régulateur MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) qui permet de faire fonctionner les cellules à leur puissance maximale quels que soient l'état de charge des batteries et la puissance lumineuse reçue.

● Le stockage de l'énergie

Il est assuré par des batteries sèches au plomb de 48 V de tension et d'une capacité de 400 Ah. Ces éléments sont dans un local extérieur au bâtiment.

● L'onduleur-chargeur

L'onduleur sinusoïdal autonome de modèle Studer Compact C4000-48 7, avec chargeur de batteries, est conçu pour être utilisé comme installation

en îlot pour la fourniture de courant alternatif (pas d'injection dans le réseau) ou comme alimentation sans coupure (UPS).

Dans l'installation, cet élément transforme la tension continue issue des régulateurs en une tension alternative de 230 V, 50 Hz utilisable par le parc informatique, et charge les batteries sans injecter d'énergie sur le réseau. On reste donc ici dans la modélisation d'un fonctionnement en site isolé. Son principe de fonctionnement et sa connectique sont décrits dans le schéma 8.

Toutefois, afin d'assurer une continuité de service, cet appareil permet de connecter directement la charge

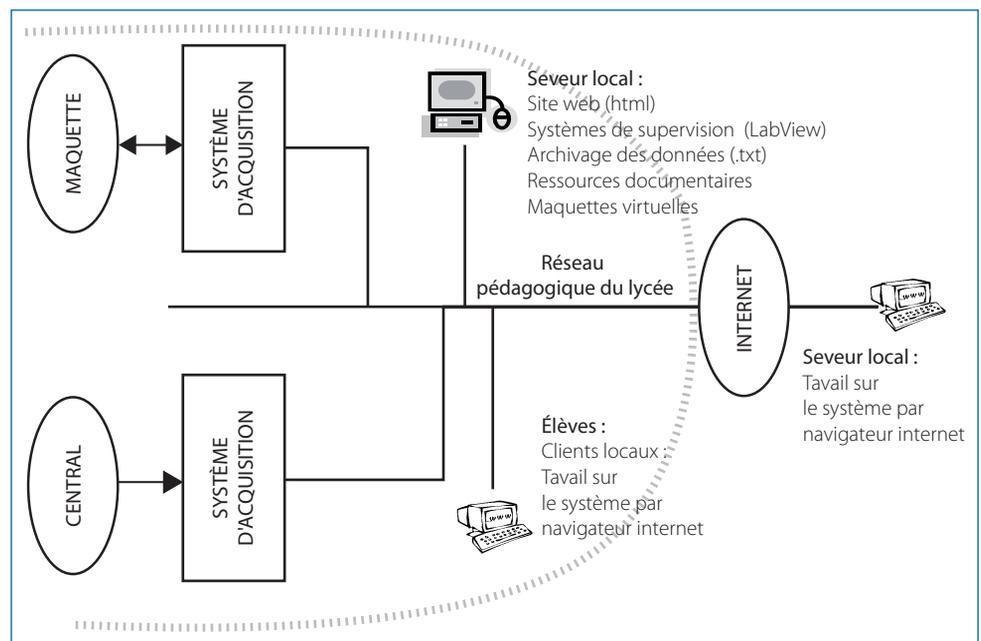
sur le réseau EDF. Il remplit donc la fonction de groupe électrogène.

● La centrale météo

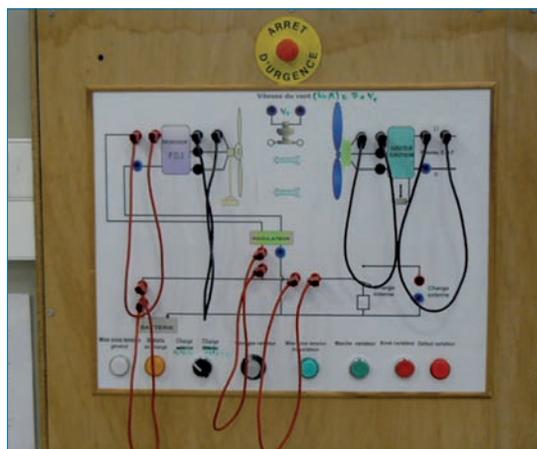
Une centrale météorologique a été installée pour mesurer la direction, la vitesse du vent et la luminosité 9.

● Le module d'acquisition

Il est constitué d'un ensemble développé par National Instruments de type FieldPoint. C'est un système d'entrées distribuées. Il permet de récupérer les valeurs de différentes grandeurs issues de capteurs, de les numériser et de les transmettre à un ordinateur distant équipé du logiciel LabView via le réseau Ethernet.



12 L'architecture du réseau de mesure et de pilotage



11 La face avant de la maquette didactisée

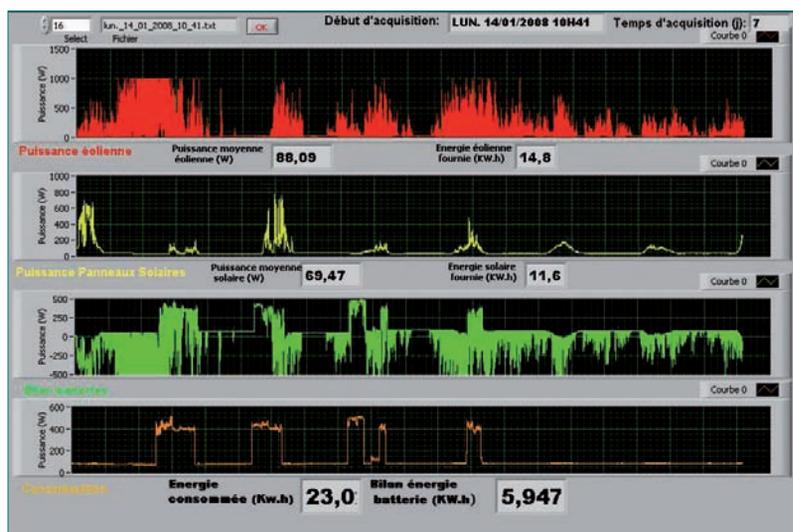
LE MOT DE L'INSPECTEUR

Un exemple de plate-forme réussie

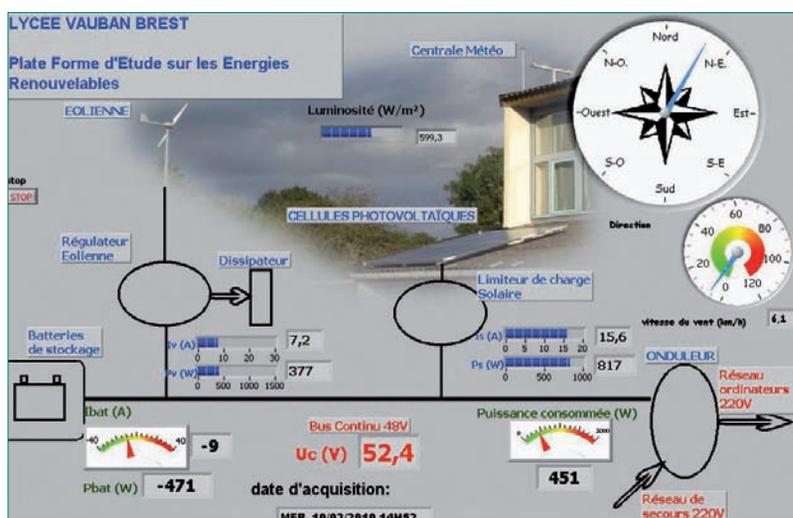
Cette installation est tout à fait exemplaire sur différents aspects :

- L'authenticité du support (alimentation d'un site isolé par des sources multiples) ;
● L'homothétie, qui doit être rigoureuse entre le support réel et le système didactisé ;
● La possibilité d'acquérir des mesures sur la durée et d'en faire bénéficier un nombre important d'élèves grâce à un réseau ;
● La possibilité de piloter des TP à distance, éventuellement par des élèves d'autres établissements (notion de plate-forme académique permettant d'optimiser les investissements).

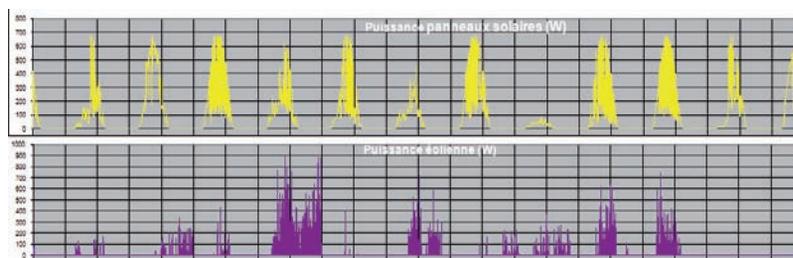
Jean-Pierre COLLIGNON
IGEN



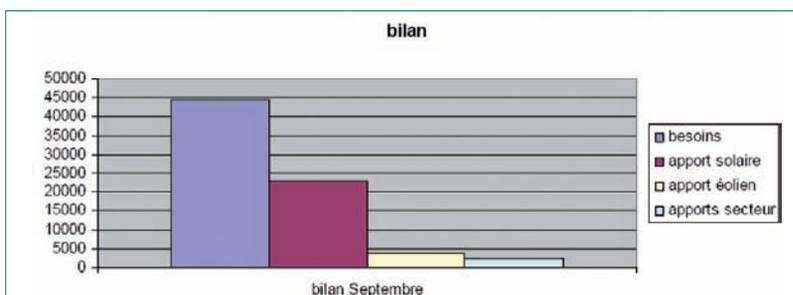
13 Un exemple de pages graphiques de données recueillies



14 La face avant « temps réel »



15 L'exploitation des données sous Excel



16 Le traitement des données sous Excell

Ce module est bidirectionnel, et permet le pilotage via des sorties TOR ou analogiques du système qu'il équipe.

Les grandeurs ainsi mesurées sont: la tension du bus continu et l'intensité issues de l'éolienne (sortie du redresseur) et des panneaux photovoltaïques (en aval du régulateur MPPT), l'intensité du courant absorbé par l'onduleur autonome.

Ces différentes mesures permettent de calculer simplement, grâce à LabView, les puissances fournies par les batteries d'accumulateurs, le module éolien, les panneaux photovoltaïques et celle absorbée par l'onduleur.

Le logiciel d'acquisition est écrit avec le langage graphique de National Instruments LabView; il vient scruter les entrées du module FieldPoint, acquérir les différentes intensités et tensions, calculer les différentes puissances; l'intervalle entre deux scrutations est de 500 ms. Les données sont ensuite « graphées » en fonction du temps et enregistrées dans des fichiers au format texte. Une campagne d'acquisition dure une semaine. Afin de limiter le nombre de points enregistrés, une période de 30 secondes est affectée à l'enregistrement. À la fin de cette campagne, les fichiers sont fermés et une autre campagne de mesure commence.

### Les maquettes didactisées

Afin de permettre l'étude du fonctionnement d'une éolienne et de panneaux photovoltaïques, il est nécessaire de pouvoir contrôler l'énergie source utilisée par ces convertisseurs. Le lycée Vauban a donc développé dans le cadre des projets de BTS Électrotechnique un ensemble de maquettes didactisées.

#### ● Les maquettes d'étude d'éoliennes

Afin d'étudier le fonctionnement d'une éolienne de petite puissance, deux maquettes ont été réalisées. Dans les deux cas, un « tube de vent » de vitesse variable est créé par un ventilateur. Les éoliennes (l'une de 60 W et l'autre de 300 W) sont pla-



cées dans ce flux, et une face avant didactisée **12** permet d'effectuer des mesures en différents points de la chaîne d'énergie.

Une des deux maquettes (celle de 60 W) est équipée d'un système d'acquisition et de pilotage FieldPoint identique à celui de la centrale. Elle peut donc être commandée à distance via le réseau Ethernet. Outre le pilotage distant, l'avantage de ce système est de permettre la mesure simultanée de toutes les données utiles et le tracé automatique des graphes de production.

Sur l'autre maquette (celle de 300 W), un dispositif permet de relever la puissance mécanique reçue par les pales de l'éolienne, de décrire assez complètement le cheminement de l'énergie, et d'évaluer le rendement de conversion en tout point de celle-ci.

### ● La maquette d'étude de panneau solaire

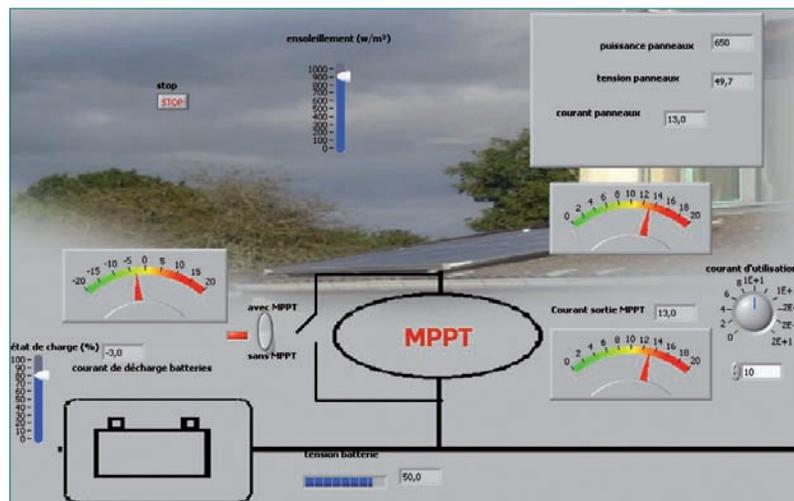
Elle comporte un panneau de 50 W éclairé par des lampes halogènes de 1000 W pilotées par gradateur. L'énergie produite par le panneau permet d'alimenter une charge variable par l'intermédiaire d'une batterie de stockage.

### L'architecture du réseau de mesure et de pilotage

L'architecture est présentée à la figure **12**. Les données électriques et météorologiques sont recueillies par le système d'acquisition situé dans l'armoire de gestion. Le système actuel permet uniquement de récupérer des données à faible temps d'évolution (échantillonnage à 500 ms). Des données électriques « temps réel » 50 Hz pourraient être recueillies grâce à une seconde carte d'acquisition plus rapide.

Un PC distant reçoit le programme de supervision globale sous LabView qui affiche en permanence les données de fonctionnement. Il embarque également divers programmes permettant :

- de stocker automatiquement les données dans des fichiers horodatés en format tableur (un fichier par semaine, récurrence 30 secondes) ;



**17** La maquette numérique

### Une expérience pédagogique unique en France !

La Région Bretagne, EDF et l'Ademe (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) ont mis en place dans cinq lycées, sélectionnés en accord avec l'académie de Rennes, des plates-formes pédagogiques dédiées aux énergies renouvelables :

- Vauban à Brest (29)
- Félix-Le-Dantec à Lannion (22)
- Maupertuis à Saint-Malo (35)
- Le Likès à Quimper (29)
- Saint-Joseph à Lorient (56)

Un club regroupant les cinq lycées, animé par le Ciele (Centre d'Information sur l'Énergie et l'Environnement) à travers l'espace Info-Énergie, et un forum internet d'échanges favorisent la mutualisation des expériences au niveau régional.



- de grapher les données recueillies ;
- de simuler le fonctionnement de sous-ensembles (actuellement les panneaux photovoltaïques) ;
- de piloter la maquette didactisée « éolienne de 60 W ».

Tous ces écrans sont exportés en temps réel sous forme de pages HTML **13**.

Le PC embarque également un site Web qui recueille les pages publiées par la supervision et met à disposition de la documentation sur le système et des activités pédagogiques

en ligne (actuellement en développement).

Ce site, et les données qu'il contient, est directement accessible en interne avec n'importe quel navigateur. L'accès externe se fait grâce à un routeur qui redirige l'IP fixe externe vers le PC serveur.

L'équipe réfléchit à présent aux procédures à adopter pour assurer la sécurisation du système, et pour gérer d'éventuels accès externes multiples dans le cadre de la mise en place de TP distants avec d'autres établissements (un travail est



actuellement en cours en direction de collèges de la Région).

**Les possibilités d'exploitation pédagogique**

● **Les exploitations temps réel**  
La face avant de la supervision 14 permet aux étudiants :

- de valider les performances de l'éolienne et des panneaux photovoltaïques en croisant les données météorologiques avec la production constatée ;
- de valider le bilan de puissance du système (somme des productions = somme des consommations) ;
- de comprendre les différentes transformations de l'énergie.

● **Les graphes sur une semaine**  
Les données d'exploitation sont stockées automatiquement dans des fichiers au format tableur (.txt) constitués sur sept jours.

Elles peuvent être exploitées (calculs des puissances moyenne, maximale, minimale, calculs d'énergie...) soit directement sous LabView grâce à des programmes spécifiques accessibles via le réseau Ethernet 13, soit, brutes, sous Excel.

Elles peuvent alors se présenter sous la forme graphique de la figure 15 (exemple d'acquisition sur 12 jours). Ces courbes permettent aux étudiants de bien appréhender les notions de puissance et d'énergie. Il est en effet possible de faire un bilan énergétique sur la semaine voire sur une période plus grande en concaténant les données de plusieurs périodes, comme sur la figure 16.

● **L'étude des modèles numériques**

Afin de pallier des conditions météorologiques n'autorisant pas une exploitation satisfaisante des données temps réel, un modèle numérique des panneaux photovoltaïques a été établi à partir des données recueillies sur le site 17. Il permet de faire varier virtuellement les conditions météorologiques et les conditions de charge afin d'étudier le fonctionnement.

L'accès à cette maquette numérique est possible à distance depuis plusieurs postes, à partir d'un simple explorateur HTML.

● **Le pilotage de la maquette didactisée**

Comme indiqué plus haut, une maquette d'étude d'éolienne est pilotable à distance via le réseau Ethernet. Les étudiants peuvent donc soit réaliser leur propre programme de pilotage et de mesure afin d'étudier le fonctionnement de l'éolienne, soit utiliser grâce à un navigateur le programme type implanté dans le PC serveur. Bien entendu, ce système ne permet pas de pilotage simultané par plusieurs étudiants.

**Les développements du système**

De nombreux développements ont été proposés depuis la mise en place du système :

● **La production d'eau chaude**

Durant l'année 2006-2007, le système a été doté d'une centrale de production d'eau chaude solaire équipée de capteurs de température et de débit permettant d'analyser son fonctionnement énergétique. Ce système n'est pas encore exploité pédagogiquement.

● **Le pilotage distant de la charge**

L'examen des premières données d'exploitation ont fait apparaître un problème non pris en compte dans la définition initiale du cahier des charges : la consommation d'énergie dépend du taux d'utilisation de la salle, et l'on observe de longues périodes pendant lesquelles les batteries sont insuffisamment déchargées. Les régulateurs éoliens et solaires bloquent alors les apports d'énergie indépendamment des conditions météo.

Il a donc été mis en place un système permettant :

- d'assurer une consommation minimale de l'ordre de 400 W ;
- de modifier à distance la consommation d'énergie en commutant des charges supplémentaires.

● **La sécurisation du bus continu et la signalisation des défauts par GSM**

Paradoxalement, le système initialement implanté n'était pas parfaitement sécurisé... à cause des protections mises en place. En effet, un disjoncteur avait été logiquement installé dans le local des batteries afin de protéger celles-ci. En cas de déclenchement, le bus continu se retrouvait libre de potentiel et l'éolienne déchargée, ce qui pouvait l'amener en survitesse ; la surtension provoquée risquait alors d'endommager son régulateur (phénomène observé à la suite d'une erreur).

Le système a donc été protégé en court-circuitant automatiquement l'éolienne en cas de rupture du bus continu. La commande du contacteur de court-circuit est pilotée par un automate programmable et un bus ASI. De plus, l'agent de maintenance du lycée est prévenu par SMS en cas de défaillance du système.

**Conclusion**

L'équipe enseignante a constaté un vif intérêt des élèves et des étudiants pour les travaux effectués sur ce système d'énergie renouvelable, même quand les recherches ne portent pas sur l'énergie elle-même (exemple : étude du réseau de communication). Le sentiment de travailler sur un système innovant et de participer à une politique énergétique d'avenir y est sans doute pour quelque chose... ■