

ÉNERGIE

Le moulin se transforme en éolienne

▼ **Inexploité depuis 1948, le Grand Moulin des Places était tombé en état de ruine. Il a aujourd'hui retrouvé son lustre d'antan et une toute autre fonctionnalité. Il n'exploite plus la force du vent pour moudre du blé mais pour produire de l'électricité en convertissant la force appliquée par le vent, sur les ailes. Toute une machinerie, cachée sous son toit, lui confère une capacité de production électrique de 70 MWh par an, de quoi alimenter en électricité une vingtaine d'habitations.**

Le Grand Moulin des Places est situé au cœur des pépinières du Val d'Erdre à Saint-Mars-du-Désert (Loire-Atlantique). Ce moulin construit au 18^e siècle a été exploité par un meunier jusqu'en 1948. A l'époque avec le vent comme force motrice, il pouvait moudre deux tonnes de blé chaque jour. Inexploité, il est tombé peu à peu en ruine. Jean-Marc Auray, son propriétaire ne pouvait se résoudre à laisser sa tour continuer à se délabrer à quelques pas de sa maison : « Cela fait dix ans que je souhaitais le rénover. Mais je devais trouver un moyen pour rentabiliser sa rénovation car je ne me voyais pas me transformer en minotier. Mon objectif était de réhabiliter le moulin et de lui donner une fonctionnalité. Lors d'un voyage en Allemagne, les propriétaires de l'hôtel dans lequel je séjournais m'ont indiqué qu'un moulin à eau situé à proximité produisait l'électricité de leur établissement. L'idée m'a séduite ». De retour en France, il apprend par la presse qu'au cœur du parc naturel régional de Brière, Michel Mortier, un passionné, a redonné une âme nouvelle à un vieux moulin à vent, transformé en aérogénérateur entièrement autonome qui produit de l'électricité tout en gardant son charme d'antan. Il prend contact avec le concepteur de ce prototype qu'il a fait breveter et visite le Moulin de la Fée, qui déploie ses ailes sur 17 m d'envergure. « J'ai

ensuite fait faire des devis mais je n'ai pas été convaincu par les solutions proposées », se souvient Jean-Marc Auray.

C'est un peu par hasard que son projet est relancé. Ce passionné de football fait partie des administrateurs de l'USJA Carquefou, club de CFA qui a défrayé la chronique en 2008 en éliminant Marseille en quart de finale de la coupe de France. A l'occasion d'un match de football, il fait la connaissance de Gérard Gauthier, responsable Energie renouvelable chez EDF Optimal Solution, qui le mettra en relation avec des bureaux d'études spécialisées. Il a ainsi bénéficié des conseils et de l'accompagnement d'EDF pour mener à bien son projet. « J'ai senti tout de suite que

j'avais à faire à des pros. Michel Mortier a, quant à lui, mis à profit ses connaissances mécaniques et hydrauliques et a développé son propre programme informatique pour rendre le moulin entièrement autonome. Il a beaucoup de mérite car il a été un défricheur et un précurseur en la matière », poursuit Jean-Marc Auray.

L'idée de concevoir un aérogénérateur tout en conservant l'architecture d'origine du moulin allait peu à peu se concrétiser. Les travaux de rénovation de la tour démarrent au printemps 2008, les ailes sont posées fin janvier 2009. Mais il faudra attendre septembre 2009 pour l'inauguration de cette éolienne d'un nouveau genre. De l'extérieur, le Grand Moulin des Places a retrouvé son authenticité avec ses ailes, son toit et sa tour traditionnels (certaines pièces d'origine ont même été conservées mais tout le chapiteau et les ailes ont été refaits). Il a retrouvé son allure d'antan. Ses ailes, en sapin de lamellé-collé de 19 mètres de diamètre et de trois tonnes, se dressent sur son toit de 15 tonnes posé sur un chemin de roulement. Mais sous son toit se cachent des équipements des plus modernes grâce auxquels il affiche désormais la capacité de production énergétique de 70 MWh par an,

soit de quoi alimenter en électricité une vingtaine d'habitations. La machinerie du moulin des Places procure une puissance électrique maximale de 35 kW. Animées par de faibles vitesses de rotation (quelques dizaines à quelques centaines de tr/mn), les turbines éoliennes sont en effet capables de générer des puissances de quelques dizaines à plusieurs milliers →



Rémi Valais

D'un aspect extérieur traditionnel répondant aux exigences de la Fondation du patrimoine, le moulin abrite sous sa toiture l'ensemble de la machinerie nécessaire à la production électrique.

L'essentiel

- ▶ Le Grand Moulin des Places était en ruine.
- ▶ Son propriétaire souhaitait le rénover sans se transformer en minotier.
- ▶ Avec le soutien de la *Fondation du patrimoine* et d'*EDF Optimal Solution*, il a été transformé en aérogénérateur.
- ▶ *ABB* et *Juret* ont assuré la mise au point de la machinerie et des équipements techniques.



Le Grand Moulin des Places, situé au cœur des pépinières du Val d'Erde à Saint-Mars-du-Désert date du 18^e siècle. Exploité par un meunier jusqu'en 1948, il est tombé peu à peu en ruine.



Avec le concours d'ABB, EDF Optimal Solution, la Fondation du patrimoine et Juret, Jean-Marc Auray, son propriétaire, l'a fait rénover et transformer en aérogénérateur.



→ de kilowatts électriques. La vitesse de rotation se limite à quelques tr/mn ou dizaines de tr/mn. Derrière les pales de ces machines se cache toute une chaîne cinématique...

En théorie, tout moteur électrique entraîné par sa charge, peut assurer la fonction de génératrice. Un système d'entraînement capable de convertir l'énergie mécanique issue d'une force éolienne ou hydraulique nécessite une génératrice asynchrone ou à aimants permanents et un convertisseur de puissance dont la mission consiste soit à charger des batteries, soit à livrer sur le réseau une énergie électrique de qualité à une tension et une fréquence déterminées. Dans le cas d'une restitution sur le réseau, cette fonction redresseur plus onduleur est assurée par un variateur de type quatre quadrants.

Le choix technologique de la génératrice (c'est-à-dire asynchrone ou à aimants permanents) est déterminant à plusieurs titres : il conditionne la chaîne cinématique tout comme la configuration du variateur et de son environnement. Ce choix appartient à l'OEM, à l'intégrateur ou à l'ingénierie en charge du projet.

Solution historiquement la plus répandue, notamment au sein des applications hydrauliques, la génératrice asynchrone ne peut générer de l'énergie qu'au-delà de sa vitesse de synchronisme, soit 1500 tr/mn pour une machine 4 pôles. Cette nécessité impose d'intercaler un multiplicateur de vitesse

entre la turbine et la génératrice, du fait que la turbine tourne à une vitesse beaucoup plus basse que la vitesse de synchronisme de la génératrice. La chaîne cinématique est donc relativement conséquente. En revanche, la construction et la maintenance de la génératrice restent simples et standard, de même que le montage électrique de l'ensemble. Par ailleurs, le rapport poids/volume s'avère très favorable.

Un rendement de production d'énergie accru

Encore peu répandue, la génératrice à aimants permanents suscite pourtant un intérêt croissant. Il existe des génératrices capables de produire de l'électricité à diverses vitesses de rotation : très basse (17 à 30 tr/mn, avec 50 à 80 pôles pour délivrer 600 kW à 5 MW électrique), moyenne vitesse (jusqu'à 600 tr/mn, avec plus de 20 pôles pour délivrer 15 kW à 5 MW) et haute vitesse (1 000 à 2 000 tr/mn pour délivrer de 1 à 5 MW). Les génératrices à aimants permanents peuvent avantageusement générer une tension dès qu'elles sont en rotation. En acceptant de forts couples à très basse vitesse, ces génératrices permettent de réduire la taille du multiplicateur mécanique (disposé entre l'arbre entraînant et la génératrice), voire de le supprimer. « La chaîne cinématique se trouve ainsi raccourcie et allégée. Les pertes mécaniques liées au multiplicateur

sont réduites, voire supprimées, d'où un rendement de production d'énergie accru. L'usure de l'ensemble est moindre du fait de faibles vitesses de rotation. En revanche, la construction de la génératrice s'avère moins standard et représente un investissement plus élevé comparativement à une solution asynchrone standard », explique Jean-Pierre Queret, ingénieur commercial chez ABB qui a suivi le projet de transformation du moulin des Places en aérogénérateur. Par ailleurs, un variateur est primordial. Il s'agit de variateurs 4 quadrants standard, mais bénéficiant de quelques adaptations indispensables (2 ponts IGBT dans le cas du moulin des Places). Dans d'autres applications, il peut s'avérer nécessaire de prévoir hacheur et résistance de freinage. « Au moulin des Places, nous n'avons pas opté pour la solution basée sur un moteur à aimants pour des raisons d'encombrement et de poids de l'ensemble du dispositif car l'espace est restreint sous le toit. Par ailleurs, le but n'était pas d'optimiser le rendement aux poulèmes près. D'ailleurs le profil traditionnel des ailes ne nous le permettait pas. Toutefois, on aurait pu gagner 5 à 10 % sur le rendement du réducteur », rapporte Jean-Philippe Gorce, chargé d'affaires automatisme à la société Juret qui a contribué avec ABB à la mise au point de la machinerie et des équipements techniques dès le lancement du projet, tant en phase d'études que de réalisation.

C'est donc la solution traditionnelle mettant en œuvre une génératrice asynchrone qui a

été retenue. La génératrice triphasée asynchrone type M3AA d'ABB (1 500 tr/min de 37 kW et 200 mm de hauteur d'axe) qui est entraînée par le rotor du moulin, via le multiplicateur, délivre le courant alternatif au variateur (ou convertisseur de couplage) ACS800-11 d'ABB. L'électronique de puissance de type 4 quadrants régénératifs injecte une tension de 400 V/50 Hz sur le réseau EDF. Le variateur assure ainsi le couplage au réseau de distribution.

Ainsi, le moulin abrite sous sa toiture toute cette machinerie. Il produit de l'électricité sur une plage de vitesse de vent comprise entre 2 et 15 m/s. L'arbre de rotation qui supporte les ailes entraîne une courroie qui transmet la puissance mécanique à un multiplicateur permettant de rendre compatible la vitesse de rotation du rotor avec celle de la génératrice. En liaison directe avec le réseau électrique, la génératrice devrait atteindre une vitesse de rotation supérieure à 1 500 tr/mn avant de pouvoir débiter le courant de façon synchronisée. Il a donc été installé tout un dispositif de multiplication : pignons et courroie crantée suivis d'un multiplicateur mécanique permettent d'atteindre en entrée du générateur une vitesse de 1500 tr/min pour générer 37 kW lorsque la vitesse de l'axe des pales atteint sa vitesse nominale de 14 tr/min. Mais grâce à l'intégration d'un variateur 4 quadrants entre la génératrice et le réseau électrique, même à faible vent (2 m/s), la génératrice commence à débiter du courant bien qu'elle ne tourne qu'à quelques centaines de tr/min (à partir de 300 tr/min en entrée de génératrice). Le variateur se charge alors de délivrer en toutes circonstances une tension de 400 V à 50 Hz. « Le moulin peut alors produire plus d'électricité dans une large plage de vents ! D'où un retour sur investissement accéléré », souligne Jean-Pierre Queret.

Il faut toutefois indiquer au variateur une valeur de consigne (vitesse à l'entrée de la génératrice). Un anémomètre fournit la vitesse du vent moyen à partir de laquelle l'automate AC500 d'ABB établit la vitesse de rotation moyenne des pales qui permettra de délivrer la valeur de consigne appropriée afin que le variateur optimise la production électrique du générateur. « Si on fixe une vitesse de consigne trop élevée le système ne fonctionne pas. Si la consigne est trop forte avec une faible vitesse de vent, le système cale comme si on essayait de démarrer en cinquième avec une voiture », explique Jean-Philippe Gorce.

La surface de la voilure est également adaptée en fonction de la vitesse du vent. Les quatre ailes sont en effet pourvues d'une voilure

variable selon le principe Berton (mis au point au XIX^e siècle). Cette voilure se compose d'un système de planchettes superposées dont le glissement rend possible le passage d'une position fermée (toutes les planches sont superposées et la prise au vent est minimale) à une position ouverte (les planches sont presque côte à côte pour une prise au vent maximale). Selon la vitesse du vent, l'automate régule le déploiement de la voilure à l'aide d'un vérin hydraulique. Le programme automate comprend une table de correspondance entre la vitesse du vent et la position de la voilure, d'où une adaptation permanente des ailes à la capacité de production. L'automate commande également un second groupe hydraulique qui pilote un frein à disque. L'arrêt des pales et la mise en sécurité par la fermeture de la voilure est ainsi assurée lorsque le vent dépasse 25 m/s ou lorsqu'un problème technique survient sur l'équipement. En cas de coupure EDF, un onduleur sécurise l'alimentation électrique de l'automate, de l'interface homme-machine (IHM), des groupes hydrauliques et des composants d'automatisme.

Des ailes toujours orientées dans le sens du vent

Afin d'adopter une position parallèle au sens du vent, pour assurer un rendement d'entraînement toujours optimisé, l'ensemble de la toiture et de la machinerie pivote autour d'un axe vertical. C'est pourquoi la puissance est transmise de la génératrice vers le variateur à l'aide d'un joint tournant. L'armoire électrique (comportant le variateur) est quant à elle, disposée dans la partie fixe du moulin.

La solution retenue pour s'assurer que les ailes sont toujours orientées dans le sens du vent repose sur un principe mécanique traditionnel. A l'arrière du toit, un moulinet d'orientation est entraîné par le vent dans un sens ou dans l'autre. La rotation induite entraîne la rotation du toit disposé sur un chemin de roulement. Lorsque le vent est parfaitement dans l'axe, le moulinet reste immobile, car les forces appliquées sur ses pales inférieures et supérieures sont identiques. Seul un capteur de position relié à l'automate rend compte de la position de l'arbre.

L'automate dont le programme a été mis au point par la société Juret orchestre l'ensemble du dispositif de production électrique. Il assure le fonctionnement automatique de l'installation en coordonnant les informations issues des capteurs, les consignes de marche et de sécurité, et les ordres en- →

Rémi Valois



L'arbre de rotation qui supporte les ailes entraîne une courroie qui transmet la puissance mécanique à un multiplicateur permettant de rendre compatible la vitesse de rotation du rotor avec celle de la génératrice de 37 kW.

Un variateur 4 quadrants a été intégré entre la génératrice et le réseau. Ainsi, même à faible vent (2 m/s), la génératrice commence à débiter du courant bien qu'elle ne tourne qu'à quelques centaines de tr/min.



Rémi Valois

→ voyés aux actionneurs. Situé dans la même armoire que le variateur, il communique avec le module d'entrées/sorties déporté disposé en machinerie (toiture mobile), à l'aide d'une liaison radio. Deux modems (un maître et un esclave) assurent cette liaison radio tout en garantissant une communication Modbus entre automate et module d'entrées/sorties. L'automate AC500 compile notamment les informations provenant de la station météorologique en toiture (vitesse et direction du vent, température et hygrométrie extérieure), les données de production et de disponibilité du moulin, la position des vérins de déploiement des volets de la voilure, la position du disjoncteur,

l'arrêt d'urgence, la position du frein, la température de la génératrice, etc. A l'aide de l'IHM disposée sur l'armoire d'automatisme, l'exploitant visualise l'état de l'installation, les paramètres électriques de production (tension, puissance, récapitulatif de production mensuel/annuel), les paramètres météorologiques, l'état des groupes hydrauliques (dédiés au frein et à la commande de voilure), ainsi que les temps de fonctionnement de chaque machine. Les alarmes et défauts sont également mentionnés et mémorisés. Au total, une dizaine de pages écran ont été conçues à l'aide du logiciel spécifique CP400 Soft qui dépend de l'outil logiciel de programmation de l'auto-

mate ABB. Enfin, une colonne lumineuse disposée à l'extérieur du moulin et visible depuis l'habitation de l'exploitant, permet en un coup d'œil, de vérifier si le moulin est en activité, disponible en attente de bonnes conditions pour fonctionner ou en défaut. L'exploitant, en l'occurrence Jean-Marc Auray, est ravi d'avoir pu mener à bien ce projet qui lui tenait à cœur depuis plusieurs années grâce au soutien de la Fondation du patrimoine et EDF. D'importants investissements ont été nécessaires : 250 k€ pour les travaux de rénovation du moulin (tour, toiture, charpente, ailes) et 150 k€ pour les équipements de production d'énergie. Il n'attend pas pour autant de retour sur investissement. « Mon objectif est de couvrir les frais de fonctionnement », précise-t-il. Cette transformation du moulin en aérogénérateur constituait pour Juret une première expérience dans le domaine éolien : « Nous nous sommes fortement impliqués avec ABB dans cette opération, notamment dans la perspective d'accéder à d'autres chantiers de ce type et étendre notre savoir-faire dans le domaine du développement durable en complément de nos applications déjà réalisées dans le photovoltaïque. Cette réalisation est pour nous une vitrine », souligne Jean-Philippe Gorce, responsable du bureau d'études automatismes à Angers. Ce n'est pas non plus la valeur du projet qui a motivé les équipes d'ABB mais son originalité : « Les équipements et les processus techniques employés sont tout à fait éprouvés, c'est surtout l'idée de financer la réhabilitation du patrimoine par la production d'énergie propre qui nous a séduits », conclut Jean-Pierre Queret

Youssef Belgnaoui

Rémi Valois



A l'aide de l'IHM disposée sur l'armoire d'automatisme, Jean-Marc Auray peut visualiser l'état de l'installation, les paramètres électriques de production, les paramètres météorologiques, etc.

