

de demande), une partie de l'électricité des éoliennes fait tourner des pompes qui envoient l'eau vers le réservoir supérieur ; quand on manque d'électricité (lorsque le vent tombe), l'eau redescend vers le réservoir inférieur en faisant tourner des turbines hydroélectriques.

Les éoliennes devraient fournir l'essentiel de l'électricité de l'île (*voir l'encadré ci-dessous*), la STEP permettant de gérer l'intermittence du vent. Aujourd'hui, elle est dimensionnée pour fournir toute l'électricité de l'île durant deux jours sans vent, une durée qui sera peut-être allongée à huit jours grâce au creusement d'un second réservoir inférieur. La centrale thermique sera maintenue en veille et redémarrée si le vent tombe pendant plus longtemps. Divers projets sont à l'étude pour parvenir au tout renouvelable (biomasse, centrale solaire, exploitation de l'énergie des vagues...).

Bien que les STEP soient des installations assez classiques, le système d'El

■ LES AUTEURS



Alain GIODA est chercheur à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et expert pour l'Union internationale de conservation de la nature (UICN).



Carlos RECIO est directeur technique de l'entreprise *Natural Aqua Canarias*, aux Canaries.



Luis SANTANA, météorologue, travaille pour le Département de l'Agriculture (*Agrocabildo*) de Tenerife, aux Canaries.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Balaguer *et al.*, *Forest restoration in a fog oasis*, *PLOS One*, vol. 6, n° 8, pp. 1-9, 2011.

O. Daniélo, *El Hierro, l'île électrique*, *Systèmes solaires*, n° 201, pp. 88-97, 2011.

J. Navarro Hevia *et al.*, *Hidrología de conservación de aguas*, Universidad de Valladolid, 2009.

A. Gioda *et al.*, *Fountain trees in the Canaries islands*, *Advances in Horticultural Sciences*, vol. 9, pp. 112-118, 1995.

Hierro est inédit. Il n'existe qu'une autre STEP marine, au Japon, à Okinawa, et la mer y joue le rôle de réservoir inférieur. En revanche, à El Hierro, il existe bien un bassin inférieur, construit 50 mètres au-dessus du niveau de la mer et d'une capacité de 140 000 mètres cubes. Bien qu'il soit alimenté par l'eau de mer, celle-ci sera dessalée au préalable par un procédé dit d'osmose inverse : en exerçant une pression sur un compartiment d'eau salée, on la force à traverser un filtre qui ne laisse passer que les molécules d'eau ; là encore, l'électricité nécessaire proviendra des éoliennes, ou du turbinage hydraulique si le vent est insuffisant. Ainsi, de l'eau douce circulera dans tout le circuit, ce qui permettra d'utiliser une partie de celle du réservoir supérieur pour l'irrigation et d'éviter la corrosion du système par l'eau de mer.

Par ailleurs, le réservoir supérieur est installé dans un cratère de volcan éteint, dont le fond et les parois ont été rendus étanches par un film en PVC. L'installation n'a pas nécessité de construire un barrage, ce qui évite le risque de rupture de digue.

Éviter l'émission de milliers de tonnes de gaz à effet de serre

La mise en place des nouvelles solutions énergétiques permettra d'économiser la quasi-totalité des 6 000 tonnes de diesel consommées annuellement par la centrale thermique. Outre une économie de plus de deux millions d'euros par an, cela représente un bénéfice écologique substantiel, la centrale émettant de grandes quantités de gaz à effet de serre. Par an, les émissions représentent 18 700 tonnes de dioxyde de carbone (CO₂), 100 tonnes de dioxyde de soufre (SO₂), 400 tonnes d'oxydes d'azote (les NOx), etc.

La question des transports a aussi été examinée, afin de remplacer les 6 400 véhicules recensés sur l'île (hors camions) par des véhicules électriques, notamment grâce à des incitations financières. Ce plan est à ses débuts. Quelque 35 stations seront installées pour recharger les batteries – trois sont déjà opérationnelles. Selon les estimations, huit gigawattheures par an suffiront pour alimenter ces nouveaux véhicules et près de 5 000 tonnes d'émissions de dioxyde de carbone seront

Une installation hydro-éolienne originale est en cours de démarrage à El Hierro. Hors transport, la puissance nécessaire à l'alimentation de l'île est estimée entre 2,5 et 7,5 mégawatts, selon l'heure. Cinq éoliennes, d'une puissance de 2,3 mégawatts chacune, ont été installées à 500 mètres d'altitude sur un versant exposé au vent. La puissance totale installée est donc de 11,5 mégawatts. Le facteur de capacité local (égal à la production réelle d'une éolienne sur un an divisée par sa production théorique maximale) étant d'environ 40 pour cent, les éoliennes fourniront un peu plus de 40 gigawattheures par an. La consommation annuelle de l'île s'établissait à 43 gigawattheures en 2011 et devrait se stabiliser, de sorte que les éoliennes pourront fournir l'essentiel de l'électricité.

Une station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP) palliera les sautes de vent, grâce à deux bassins situés à des altitudes différentes : en période de surproduction, l'eau est pompée jusqu'au bassin supérieur, et lorsque le vent tombe, elle redescend jusqu'au bassin inférieur en faisant tourner des turbines hydroélectriques. Les conduites reliant les deux bassins sont enterrées quand elles traversent des zones protégées. C'est la seule station marine au monde qui fonctionnera avec de l'eau douce. Celle-ci proviendra d'une usine de dessalement de l'eau de mer et servira aussi à l'irrigation. La centrale thermique, auparavant seule source d'électricité de l'île, restera disponible en ressource d'appoint. L'ensemble de ces installations ne couvre que dix hectares et se situe dans la partie la plus escarpée, aride et déserte de l'île.

Gorona del Viento El Hierro, S.A. A. Gioda, RD

Certaines régions sont arides et pourtant baignées par le brouillard. Celui-ci reste au niveau du sol, bloqué par des surpressions atmosphériques en altitude ; les gouttelettes en suspension n'y sont pas assez grosses pour retomber en pluie. En outre, à El Hierro, l'eau pénètre vite en profondeur dans les sols volcaniques et le peu qui reste en surface s'évapore rapidement, en raison du vent intense.

Les régions les plus intéressantes pour la collecte de l'eau du brouillard sont les zones arides brumeuses et exposées au vent, qui présentent un fort dénivelé, permettant de faire circuler l'eau recueillie dans des canalisations suivant la pente. On en trouve sur les côtes des continents, en Afrique, au Moyen-Orient (aux environs de la mer Rouge), et en Amérique, ainsi que sur cer-

taines îles (Cap-Vert, Canaries, Madère...). Dans le Nord désertique du Chili, le brouillard véhiculerait 10,3 milliards de mètres cubes d'eau par an, selon une estimation de l'Université catholique de Santiago. Toutefois, les poussières issues de la pollution minière, où des exploitations sont à ciel ouvert, y limitent fortement la qualité des eaux du brouillard. Sur El Hierro, le volume d'eau disponible serait de 34,3 à 49 millions de mètres cubes par an. L'estimation est fondée sur la quantité d'eau récoltée par un attrape-brouillard, extrapolée à l'échelle de l'île grâce à divers paramètres météorologiques mesurés en plusieurs endroits (vitesse du vent, densité et durée annuelle du brouillard).

Les premiers systèmes de collecte ont été développés par des agronomes portugais

sur les îles du Cap-Vert, dans les années 1940. Ils se sont inspirés de collecteurs naturels, tels les agaves, utilisés par les paysans locaux. Le principe est de dresser des filets dans le ciel, grâce à des structures de formes et de tailles variées, pour recueillir les gouttelettes de brouillard en suspension. Dans des conditions favorables, le rendement est de l'ordre de 20 à 30 litres par mètre carré de filet et par jour. Cette ressource est intermittente et peut avoir différents usages, telle une aide à la reforestation. L'eau est parfois stockée dans des réservoirs divers, ou directement canalisée vers les cultures pour l'irrigation. Le système en fonctionnement le plus important est celui d'Atiquipa, au Sud du Pérou, qui irrigue les cultures et les pépinières de 60 familles.



évitées si tous ceux de l'île sont remplacés. Attention toutefois au « coût écologique » de ce remplacement : fabriquer une voiture électrique entraîne l'émission d'environ cinq tonnes de dioxyde de carbone. Le coût écologique du remplacement est ainsi de plus de 30 000 tonnes de dioxyde de carbone, auquel s'ajoute le coût du transport des véhicules jusqu'à l'île ! Il faudra donc plusieurs années pour que le bilan soit positif en termes d'émissions...

Les pratiques écologiques mises en œuvre à El Hierro pourront-elles être généralisées ? Cela semble possible, mais en partie seulement.

Des réserves de la biosphère ont été créées un peu partout. En octobre 2012, on en comptait 610 dans le monde, dont 11 en France. El Hierro fut notamment précédée par la Guadeloupe et Ouessant. Ce statut n'est pas cantonné aux îles et est compatible avec celui de parc national (dans les cas de double statut, la réserve peut être gérée de façon centralisée ou localement). Ainsi, le parc national des Cévennes, créé en 1970, est devenu une réserve de la biosphère en 1985. Comme El Hierro, les Cévennes étaient un espace

abandonné et négligé, qui a su concilier conservation de la biodiversité, développement économique et social et maintien des valeurs culturelles. Est-ce possible partout ? Cela reste à déterminer, car il sera plus difficile de transformer des régions densément peuplées ayant un lourd passé industriel, ou qui se sont développées grâce au tourisme de masse.

SUR LE CONTINENT, il sera plus difficile de faire ce saut dans le développement durable, notamment en raison d'une industrie et d'un tourisme de masse.

Qu'en est-il des solutions énergétiques mises en place à El Hierro ? Des STEP sont en service depuis le début du XX^e siècle. Il s'agit d'un système éprouvé et efficace, même si les phases de pompage et de turbinage entraînent des pertes, de l'ordre de 20 pour cent, voire plus. Elles peuvent être construites aussi bien sur les îles que sur le continent, le critère déterminant étant le relief. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) évalue la capacité mondiale des STEP à 150 gigawatts, dont 100 gigawatts sont déjà installés. De nombreux sites restent

donc à équiper, en particulier sur les îles montagneuses d'origine volcanique : de grands espaces surplombant la mer pourraient y accueillir des STEP marines.

En France, les principaux sites de montagne sont déjà équipés, sauf dans la vallée de la Durance. En revanche, de nombreuses STEP marines pourraient être construites. Un projet piloté par EDF vise à l'installation d'une STEP marine en Guadeloupe : exploitant un dénivelé de 50 mètres, elle produirait 50 mégawatts et stockerait un gigawattheure. Un autre projet, moins avancé, concerne La Réunion.

Toutefois, les STEP marines d'El Hierro et d'Okinawa, ainsi que celles en cours d'étude, ne sont adaptées qu'aux petites demandes, inférieures au gigawatt. Selon l'ingénieur François Lempérière, ancien président du CFGB (Comité français des grands barrages), des STEP marines de grande puissance (un à deux gigawatts) seraient aussi possibles, en se fondant sur des réservoirs gigantesques et des dénivelés faibles.

Le transport électrique est une bonne solution à El Hierro, car l'île est petite et