

Recycler des déchets par séparation triboélectrique

Depuis une vingtaine d'années, le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques devient une question importante. Le recyclage du plastique pose un problème particulier car, après extraction des métaux, il est difficile de séparer les différents types de plastiques, opération pourtant nécessaire pour leur réutilisation.

La séparation électrostatique est une solution envisagée. Ses développements récents donnent des résultats encourageants. Dans un séparateur triboélectrostatique classique, les mélanges de plastiques sous forme de granules, de taille inférieure à cinq millimètres, sont chargés par effet triboélectrique. Ils sont placés soit dans des dispositifs produisant des contacts répétés entre les granules

et les parois du dispositif – des goulottes oscillantes, des cylindres rotatifs –, soit dans des lits fluidisés, systèmes de soufflerie permettant un brassage des granules.

Une fois les granules chargés, un champ électrique est appliqué. Il est créé entre deux plaques métalliques écartées verticalement de 10 à 20 centimètres et reliées à un générateur de tension de plusieurs dizaines de kilovolts. Les forces exercées par le champ électrique dirigent les granules chargés vers des compartiments distincts du collecteur de produits.

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique récemment breveté par l'Université de Poitiers et la Société APR2 réalise le tri sélectif des mélanges de matériaux isolants granulaires dans un lit fluidisé en présence

d'un champ électrique orienté perpendiculairement à la direction de l'air de fluidisation.

L'originalité de ce dispositif est la simultanéité des deux opérations : d'une part, la charge triboélectrique des granules par collisions dans le lit fluidisé, d'autre part, la séparation électrostatique de ces granules dans le champ électrique intense créé par deux bandes transporteuses métalliques connectées à deux générateurs de haute tension continue, de polarités respectivement positive et négative.

Une fois qu'un granule est suffisamment chargé, il est attiré vers l'électrode de polarité opposée, bande transporteuse qui l'évacuera vers le collecteur de produits. Les granules non chargés ne peuvent pas quitter

la zone de charge, ce qui garantit la pureté des produits collectés.

Par ailleurs, chaque granule ne reste dans la zone de charge que le temps minimum nécessaire à l'acquisition d'une charge suffisante pour qu'il soit attiré par l'une des électrodes, ce qui assure aussi l'optimisation du débit des matériaux traités. En fonction des conditions environnantes et de l'état des matériaux granulaires, le temps de charge varie. Le débit peut être adapté en fonction du temps nécessaire à la charge. Le pilote industriel de cette installation est capable de traiter une quantité de 600 kilogrammes de déchets par heure.

Lucien Dascalescu

Institut PPRIME, UPR 3346, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA

polymère correspond à la situation où une petite zone d'un polymère est en contact avec une zone plus étendue de l'autre). Le signe de la charge dépend des matériaux en jeu.

J'ai proposé un mécanisme d'échange de charges entre matériaux identiques en m'appuyant sur l'idée que plus la force appliquée est intense, plus la matière transférée peut être profonde. Avec un frottement asymétrique, les forces appliquées à chaque surface sont inégales, si bien que du matériau issu de différentes profondeurs serait transféré. Comme la composition des polymères varie souvent avec la profondeur, cette asymétrie entraînerait le transfert de matériau de différentes compositions, ce qui donnerait des charges nettes de différents signes dans les surfaces séparées.

Il est aussi possible que, selon les caractéristiques de la force mécanique appliquée, il y ait de petites différences dans les réactions chimiques. Il pourrait alors en résulter, sur les deux surfaces, des compositions en polymères ionisés suffisamment différentes.

Ce scénario se comprend aisément pour un frottement asymétrique. Dans le cas d'une action symétrique, de petites asymétries involontaires suffiraient à obtenir une composition asymétrique. Ce mécanisme s'appliquerait aussi à un contact entre matériaux différents et contribuerait à une

meilleure compréhension du mécanisme général de transfert de matériau. Des différences de dureté pourraient aussi conduire à un transfert asymétrique de matériau.

La charge triboélectrique de matériaux de composition identique se produit par exemple avec les particules en suspension, comme dans les tempêtes de sable, les fumées des éruptions volcaniques et la manipulation industrielle de poussières fines. Là encore, ces phénomènes pourraient résulter de contacts asymétriques dus à des différences de taille des particules, les grosses particules se chargeant positivement et les petites négativement. Le scénario exact reste à déterminer.

Une meilleure compréhension

Les expériences de ces dernières années ont permis de progresser dans la compréhension du phénomène triboélectrique. Par ailleurs, il y a un besoin croissant de créer des matériaux qui ne se chargent pas par contact, notamment à cause de la miniaturisation de l'électronique, qui rend les circuits de plus en plus sensibles aux dégâts d'une décharge, même faible. Les nombreuses questions que soulève encore la triboélectricité suggèrent qu'une approche pluridisciplinaire, mettant en œuvre à la fois physique et chimie, pourrait bientôt porter ses fruits. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. W. Williams, *Triboelectric charging of insulating polymers – some new perspectives*, *AIP Advances*, vol. 2, 010701, 2012.

T. A. L. Burgo *et al.*, *Triboelectricity : macroscopic charge patterns formed by self-arraying ions on polymer surfaces*, *Langmuir*, vol. 28(19), pp. 7407-7416, 2012.

H. T. Baytekin *et al.*, *The mosaic of surface charge in contact electrification*, *Science*, vol. 333, pp. 308-312, 2011.

L. Calin et L. Dascalescu, *Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre*, Brevet FR2943561, 2010.

L. S. McCarty et G. M. Whitesides, *Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces*, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, pp. 2188-2207, 2008.

Sur El Hierro, une île des Canaries, des dispositifs innovants sont mis en place pour la gestion de la biodiversité, de l'eau et de l'énergie.

El Hierro,



Alain Gioda, Carlos Recio et Luis Santana

Les îles abritent quelque 600 millions de personnes dans le monde. Les doter d'un fonctionnement écologique est donc un enjeu majeur. En outre, elles constituent des systèmes plus fermés que les continents et peuvent servir de laboratoire pour tester diverses initiatives en matière de développement durable. Leur isolement est aussi un inconvénient, notamment parce que leur réseau électrique est parfois impossible à raccorder à celui du continent.

C'est le cas de l'île d'El Hierro, un petit bout de terre aride d'environ 270 kilomètres carrés (soit deux fois et demie la superficie de Paris), dans l'archipel des Canaries. Les habitants de l'île ont longtemps été d'une extrême pauvreté. De nombreux émigrants s'y embarquaient clandestinement pour l'Amérique ou s'installaient sur les îles voisines de Tenerife et Grande Canarie, surtout pendant les sécheresses. Aussi l'île n'abritait-elle que 7 200 habitants au début des années 1990. Toutefois, moins de 20 ans plus tard, la population est montée jusqu'à 11 000 habitants (avant de diminuer un peu avec la crise économique

espagnole). Cela correspond à la plus forte progression démographique des Canaries durant cette période. Pourtant, ni tourisme de masse ni boom économique n'en sont la cause. Comment expliquer qu'El Hierro ait soudain attiré de nombreux immigrants ?

Sous l'impulsion de Tomás Padrón, ingénieur électricien et figure politique locale, l'île s'est dotée d'un ensemble unique, à la fois pour la préservation de la biodiversité et pour la production d'énergie : dès cette année, l'électricité y sera essentiellement produite de façon renouvelable et sans émission de dioxyde de carbone, cela sans qu'un raccordement à un réseau continental permette de gérer l'intermittence des énergies renouvelables ; ce sera la seule île au monde dans ce cas. En outre, des dispositifs de captage de l'eau du brouillard y ont été installés. El Hierro est-elle un modèle reproductible à grande échelle sur les îles et sur les continents ?

Depuis 1796, date du premier recensement dans les Canaries, la population d'El Hierro a seulement doublé. Elle augmente au maximum de 20 pour cent en période

touristique, soit moins de 2 500 touristes par mois. Ces chiffres sont à comparer à la multiplication par 13 de la population des Canaries depuis 1796 et aux 10,3 millions de touristes accueillis en 2011 par l'archipel. À la Grande Canarie, les aménagements ont été si importants qu'il ne subsiste que un pour cent de la forêt originelle. En outre, le milieu est globalement aride dans l'archipel, de sorte que sa biodiversité est fragile. À El Hierro, l'absence d'explosion démographique a permis une bonne conservation du milieu et des activités traditionnelles.

Une réserve de la biosphère

En conséquence, l'île a été classée réserve de la biosphère par l'Unesco en 2000. Ce statut désigne une zone conciliant la préservation de la biodiversité et les activités humaines. Il est moins contraignant que celui de parc national, notamment pour les activités humaines : ainsi, toute l'île est incluse dans la réserve, mais elle se partage entre des zones dites centrales, où les

île écologique modèle ?



activités sont très contrôlées, et des zones tampons et de transition, pour favoriser un développement économique durable.

Sur d'autres îles des Canaries, plus boisées (La Gomera) ou plus montagneuses (Tenerife), des parcs nationaux ont été créés. El Hierro, en revanche, n'est pas dotée d'une richesse faunistique et floristique exceptionnelle, menacée par la pression démographique et qui aurait justifié de tels parcs. Seul un lézard géant (*Gallotia simonyi*) y était rarissime – il l'est moins aujourd'hui, grâce à son élevage local. L'originalité d'El Hierro était alors une bonne intégration de l'homme dans la nature, notamment à travers des activités telles que l'agriculture, l'élevage et la pêche, pratiquées de façon traditionnelle. L'impact du tourisme et de l'industrie sur les paysages était nul à la fin des années 1990, fait unique aux Canaries.

Un autre élément a été déterminant pour que le programme MAB (*Man and Biosphere programme*) de l'Unesco accepte le dossier, déposé à la fin des années 1990 : une gestion durable de la zone montagneuse

L'ESSENTIEL

- Dispositifs captant l'eau du brouillard, véhicules électriques, système hydro-éolien destiné à la fois à la production d'électricité et à l'irrigation... L'île d'El Hierro expérimente des mesures écologiques diverses.
- Dès cette année, elle produira son électricité presque entièrement grâce à des sources renouvelables.
- Ce modèle est surtout applicable aux îles. Il sera plus difficile à mettre en œuvre dans les régions industrielles ou densément peuplées.

et, en particulier, la plantation d'arbres «fontaines» recueillant l'eau du brouillard.

Selon l'histoire locale, corroborée par les récits des explorateurs, un tel arbre poussait jadis dans les hautes terres d'El Hierro, à environ 1 000 mètres d'altitude, mais il a été arraché par un ouragan en 1610. Nommé garoé par les indigènes, il était situé au fond d'un vallon, de sorte que le brouillard, poussé par le vent, y déposait ses gouttelettes sur les feuilles. L'eau ruisselait jusqu'à terre, où elle était recueillie dans des puits. L'arbre était vénéré par les premiers habitants de l'île, les Bimbaches, qui le considéraient comme leur ancêtre totemique. Après la conquête de l'île par les Espagnols au XV^e siècle, il a été dessiné sur les armoiries d'El Hierro.

Des arbres fontaines puisant dans le brouillard

Cet arbre sacré était un *Ocotea foetens*, un laurier endémique des Canaries. Si celui vénéré par les Bimbaches a été arraché, d'autres spécimens poussent encore sur l'île.

En 1948, lors d'une grande sécheresse, Zósimo Hernández Martín (1920-2004), le chef des gardes forestiers, replanta un de ces lauriers à l'ancien emplacement du garoé, en récupérant une bouture d'un autre arbre. Il y est toujours présent et a retrouvé un rôle symbolique, ayant notamment donné son nom à la radio locale. L'eau du brouillard y est à nouveau recueillie dans les anciens puits creusés avant la colonisation espagnole.

On s'est également aperçu que de nombreux autres arbres de l'île, d'espèces variées, pouvaient faire office d'arbres fontaines, en raison d'une position géographique privilégiée (située notamment face au vent, qui pousse le brouillard sur les feuilles). Depuis les années 1960, des systèmes de bassins et de canalisations ont été aménagés sous plusieurs dizaines de ces arbres pour récupérer l'eau. Dans les années 2000, des dispositifs nommés attrape-brouillards, constitués de filets tendus sur des structures arborescentes en acier inoxydable,

ont aussi été installés : ils visent à recueillir l'eau du brouillard dans les endroits sans arbres, telles les crêtes exposées au vent (voir l'encadré page 56).

Au total, ces installations ne collectent que quelques mètres cubes d'eau par jour. L'impact est donc pour l'instant symbolique, mais il pourrait augmenter.

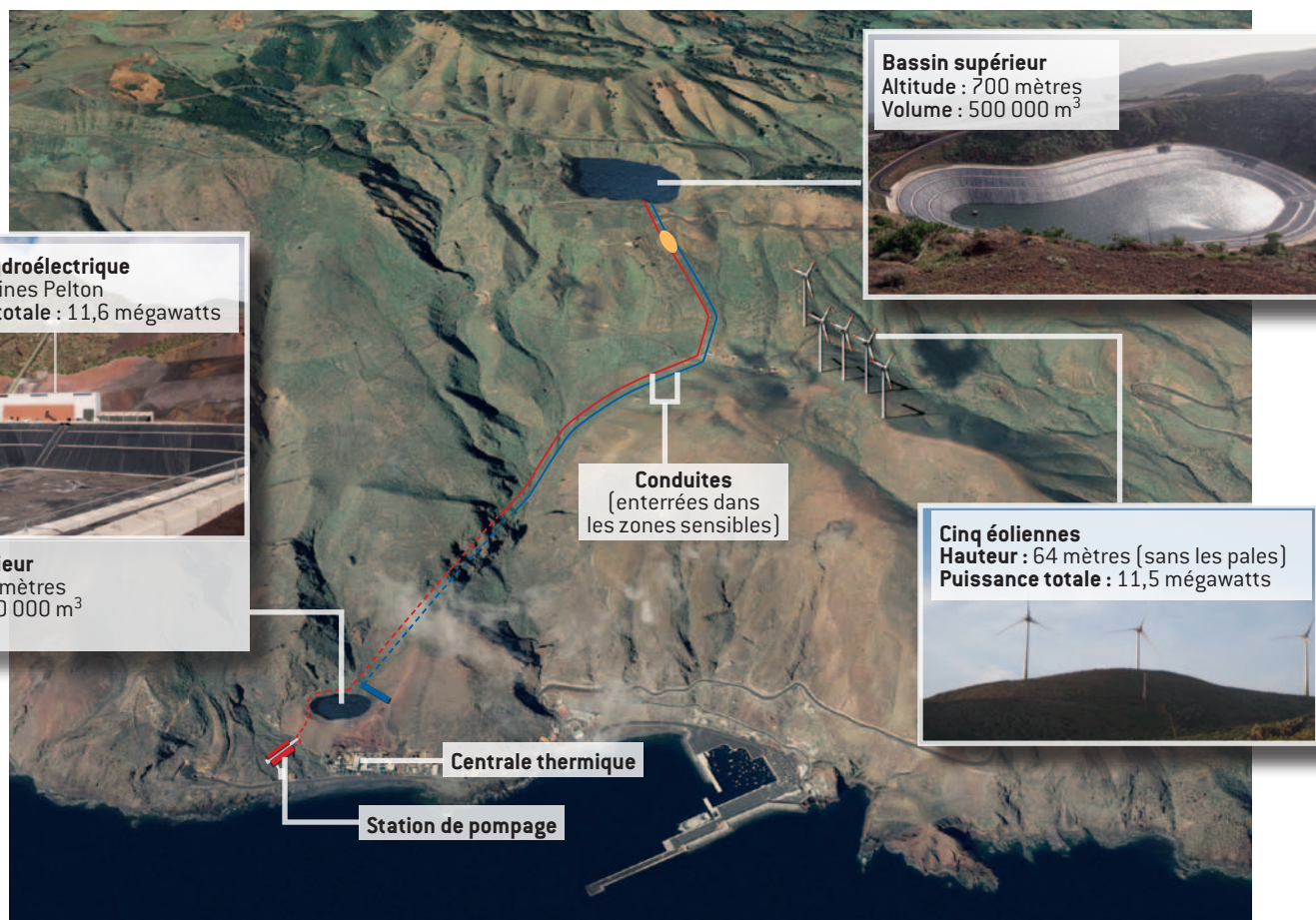
De 2006 à 2008, un financement européen nommé *Interreg*, rattaché aux FEDER (Fonds européen de développement régional), a permis d'évaluer le potentiel en eau du brouillard. L'étude utilisait un réseau de stations météorologiques, dont les données étaient transmises par radio, pour extrapoler les quantités recueillies par un attrape-brouillard à l'échelle de l'île. On estime que si toutes les zones brumeuses de l'île (représentant environ 10 pour cent de sa surface, soit 2 450 hectares) étaient couvertes d'attrape-brouillards, le volume d'eau recueilli serait de 34,3 à 49 millions de mètres cubes par an (moins une petite partie qui s'évapore). L'apport du brouil-

lard pourrait donc être important, même si l'on ne le collectera pas sur dix pour cent de la superficie.

Vers le tout renouvelable

Grâce aux financements associés au statut de réserve et aux fonds FEDER, plusieurs nouveaux projets écologiques ont été développés, tels l'agrotourisme et le recyclage des déchets. En outre, l'île s'est tournée vers des solutions énergétiques durables. Si toute l'électricité est encore d'origine thermique – elle est issue d'une centrale brûlant du diesel, importé par bateau –, cela changera en 2013. Une installation comprenant une Station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP) marine connectée à cinq éoliennes est en effet en cours de mise en service. La STEP comprend deux réservoirs situés à des altitudes différentes et reliés par des conduites ; en période de surproduction (lorsque le vent est fort ou qu'il y a peu

ÉLECTRICITÉ ET IRRIGATION : UNE INSTALLATION UNIQUE AU MONDE



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.



évités 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.

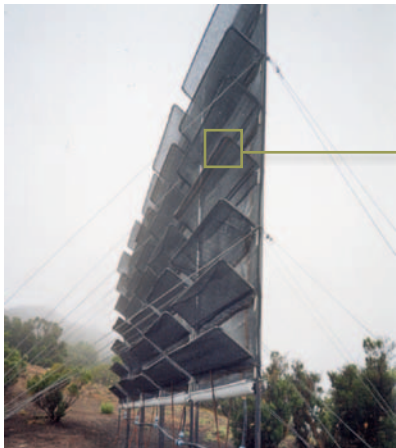
Le transport électrique est une bonne solution à El Hierro, car l'île est petite et



Des plantes variées sont utilisées pour capter l'eau du brouillard depuis des siècles : des lauriers à El Hierro (à gauche, le laurier replanté à l'emplacement de celui qu'utilisaient les premiers habitants de l'île), des agaves sur les îles du Cap-Vert (au centre)... Autrefois recueillie dans des puits, l'eau est désormais souvent collectée par des systèmes de canalisation (à droite) et de réservoirs.



F. Moudard, IFEA-RD



Natural Aqua Canarias



Les attrape-brouillards sont des filets qui capturent l'eau du brouillard, en suspension dans l'air. La forme de la structure de soutien peut être simple, comme à Atiquipa, au Pérou (à gauche), ou plus élaborée. Celle d'El Hierro (à droite) est étudiée pour empêcher le vent de décoller les gouttes qui se sont formées. L'eau ruisselle ensuite sur les filets, puis est collectée par divers systèmes.

montagneuse, de sorte que sa topographie impose des déplacements courts et à faible vitesse. Les voitures électriques, qui sont encore peu autonomes mais dotées d'une bonne accélération au démarrage, y sont bien adaptées. Leur généralisation sera plus difficile sur le continent, où les déplacements peuvent être longs et rapides, notamment sur les autoroutes.

De façon générale, l'utilisation concomitante de plusieurs énergies renouvelables devrait permettre de pallier en partie leur intermittence. Il faudra aussi développer des moyens de stockage. Une solution envisagée pour stocker l'électricité est la technique du *Vehicule-to-Grid* (littéralement du véhicule au réseau), ou V2G : l'électricité est stockée dans les batteries des voitures à l'arrêt lorsque la production est excédentaire et disponible pour le réseau en cas de demande. En juin 2012, ENDESA, la compagnie qui fournit El Hierro en électricité, a déjà inauguré une station-service électrique réversible de ce type à Malaga, en Andalousie, et va en ouvrir une seconde à La Graciosa, une autre île des Canaries, en 2014 ou 2015. Cela devrait aussi venir à El Hierro. En revanche, en France, les constructeurs de

voitures freinent l'adoption de ce type de dispositif, craignant notamment une usure accélérée des batteries.

El Hierro est passée en 50 ans du stade rural au stade postindustriel avec des inconvénients mineurs, d'où une bonne acceptation du nouveau modèle par la population. 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 exigeant une forte offre énergétique.

Un modèle surtout applicable aux îles

Si certaines solutions pourront être développées à plus grande échelle, le modèle mis en œuvre à El Hierro est donc pour l'instant surtout applicable aux îles. Un projet légèrement antérieur est celui de l'île danoise de Samsø (114 kilomètres carrés et 4 400 habitants), où toute l'électricité est d'origine éolienne et solaire et où l'essentiel du chauffage est assuré par la biomasse (bois). Les habitants commencent à s'y doter de véhicules électriques. Notons que si cette île produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme, elle est connectée avec

le réseau électrique du continent, afin de gérer l'intermittence de la production. El Hierro sera donc la seule à la gérer de façon autonome, par l'intermédiaire de sa STEP. Quelques autres îles sont en train d'adopter un fonctionnement plus écologique.

L'exemple d'El Hierro montre qu'il est possible d'enclencher une transition énergétique et écologique sans nuire au développement, même en temps de crise économique aiguë. Le chômage n'y est pas plus élevé qu'ailleurs aux Canaries – soit de l'ordre de 30 pour cent, un chiffre qui a triplé depuis le début de la crise économique espagnole en 2008 –, malgré une éruption volcanique et des séismes qui ont interrompu le tourisme et la pêche depuis fin 2011. Au contraire, les nombreux travaux créent des emplois et l'imbrication inédite de techniques vertes engendrera un savoir-faire précieux.

À l'occasion du sommet de la Terre en 2012 à Rio, le WWF (Fonds mondial pour la nature) a mis en garde contre de nombreux problèmes : « bombe » démographique et énergétique, réchauffement climatique, gâchis de l'eau, perte accélérée de la biodiversité... Sur tous ces points, El Hierro propose des solutions. ■

The background of the entire cover is a high-magnification microscopic image of a meteorite. It shows a dense field of small, angular mineral grains in various colors including orange, yellow, blue, green, and pink, set against a dark matrix. Two large, dark circular overlays are positioned on the left and right sides of the cover, containing the title and author information respectively.

Astrophysique

Les secrets des météorites primitives

Alan Rubin

L'analyse microscopique
des chondrites, les plus vieilles roches
du Système solaire, laisse entrevoir
ce qu'était la nébuleuse solaire
peu avant la formation des planètes.



L'ESSENTIEL

- Les météorites chondritiques sont constituées du même matériau qui a formé les planètes et les astéroïdes.
- Il existe plusieurs classes de chondrites, différenciant par leur structure et leur composition.
- Leur analyse renseigne sur leur région d'origine dans la nébuleuse solaire et sur la répartition des poussières dans le Système solaire en formation.
- Ce nuage de poussières ressemblait à celui qui entoure les étoiles de type T Tauri.

1. GEMMES CACHÉES :
sur cette micrographie en lumière polarisée d'une mince tranche de chondrite, les « joyaux » sont des chondres, de minuscules billes de cristaux de silicate.

J. Derochette

Les astronomes étudient des objets si éloignés – étoiles, galaxies, quasars – qu'ils ne les observent que sous forme d'images sur des écrans d'ordinateur ou d'ondes lumineuses projetées par des spectrographes. Mes collègues et moi, qui travaillons sur les planètes et les astéroïdes, avons beaucoup de chance. Nous avons parfois l'occasion de toucher des fragments de ces corps célestes et de les manipuler pour leur faire révéler leurs secrets les plus intimes. Lors de mes études d'astronomie, j'ai passé de nombreuses nuits glaciales à observer au télescope des amas d'étoiles et des nébuleuses, et je peux aujourd'hui témoigner qu'il est plus gratifiant émotionnellement de tenir dans ses mains un éclat d'astéroïde : c'est un lien tangible avec quelque chose qui, autrement, resterait lointain et abstrait.

Les fragments d'astéroïdes qui me fascinent le plus sont les chondrites, lesquelles représentent plus de 80 pour cent des météorites qui tombent sur Terre. Les autres sont issus d'objets plus massifs, sièges de réactions physico-chimiques ayant modifié la composition des roches au fil des temps géologiques. Au contraire, les chondrites, qui doivent leur nom aux chondres qu'elles contiennent presque toutes (de minuscules perles de matériau fondu, souvent plus petites qu'un grain de riz) se sont formées durant les premiers stades du Système solaire. Quand on examine au microscope des lames minces de chondrites, elles se révèlent d'une grande beauté, qui n'est pas sans rappeler des tableaux de Vassily Kandinsky ou d'autres peintres abstraits.

Les plus anciennes roches

Les chondrites sont les plus anciennes roches que les scientifiques aient touchées. La datation par isotopes radioactifs montre qu'elles ont plus de 4,5 milliards d'années, c'est-à-dire qu'elles datent d'avant la période de formation des planètes, quand le Système solaire n'était encore qu'une nébuleuse, un disque de gaz et de poussières turbulent et en rotation. Leur âge et leur composition indiquent qu'elles sont constituées des matériaux primordiaux à partir desquels les planètes, les lunes, les astéroïdes et les comètes se sont assemblés. La plupart des chercheurs pensent que les chondres se sont formés au cours d'événements violents, quand des agrégats de poussières riches en silicates ont fondu et formé des gouttelettes. Ces dernières se sont rapidement solidifiées et agglomérées avec des poussières, des métaux et autres matériaux, formant des chondrites qui ont poursuivi leur croissance et sont devenues des astéroïdes. Les collisions violentes entre astéroïdes ont entraîné une fragmentation, certains débris finissant par tomber sur Terre sous forme de météorites. Ces dernières sont des témoins de la naissance du Système solaire, et constituent nos liens les plus directs avec les conditions dans lesquelles la planète s'est formée.