

L'ARBRE FONTAINE

DANS CERTAINES RÉGIONS MONTAGNEUSES RÉGULIÈREMENT VENTÉES, SOUMISES À UN CLIMAT OCÉANIQUE COMME AU CHILI, EN AFRIQUE DU SUD OU AU CAP-VERT, UNE MER DE BROUILLARD RÈGNE EN QUASI-PERMANENCE. CES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES TRÈS SINGULIÈRES PERMETTENT À LA VÉGÉTATION DE PROSPÉRER MALGRÉ DE FAIBLES PLUIES. ARBRES ET ARBUSTES CAPTENT L'EAU DES BROUILLARDS ET DES BRUINES, DONNANT NAISSANCE À DE VÉRITABLES FORÊTS DITES NÉBULEUSES. CES FONTAINES VÉGÉTALES SONT EXPLOITÉES PAR L'HOMME DEPUIS LA NUIT DES TEMPS POUR RÉCUPÉRER DE L'EAU POTABLE ET DÉVELOPPER UNE VIE AGRICOLE. VÉRITABLE DON DES DIEUX, L'ARBRE FONTAINE A PARFOIS ÉTÉ ÉLEVÉ AU RANG D'ARBRE SACRÉ COMME DANS L'ÎLE DE HIERRO AUX CANARIES, POINT DE DÉPART DE LA RECHERCHE DES AUTEURS DE CET ARTICLE. EN ÉCLAIRCISSANT POUR NOUS CE PHÉNOMÈNE NATUREL MÉCONNU, CEUX-CI NOUS INVITENT À UN FABULEUX VOYAGE DANS LE TEMPS ET L'ESPACE SUR LA TRACE D'UN SAVOIR ANCIEN DONT DES APPLICATIONS MODERNES SONT ENVISAGEABLES.

ALAIN GIODA, ANDRÉS ACOSTA BALADÓN, PIERRE FONTANEL,
ZÓSIMO HERNÁNDEZ MARTIN ET ARNOLDO SANTOS

« Il y a toujours, au sommet de cet arbre, un petit nuage et le garoé laisse tomber des gouttelettes d'eau que les hommes acheminent vers une modeste fontaine grâce à laquelle humains et animaux vivent pendant les périodes d'extrême sécheresse... ». Voici une vingtaine d'années, ce passage de *La Historia de las Indias*, du dominicain Barthélemy de las Casas (1474-1566), a mis l'un d'entre nous (A. Acosta Baladón de l'Organisation météorologique mondiale) sur la piste d'un arbre étrange, le garoé. C'est en faisant escale dans l'île de Hierro aux Canaries, en route pour les Amériques, que Las Casas s'intéressa à la culture des indigènes, les Guanches, presque disparus au XVI^e siècle. Apparentés aux Berbères, leur civilisation était originale : ils pratiquaient l'élevage du mouton et de la chèvre, cultivaient les céréales, mais ne connaissaient pas les textiles et étaient vêtus de peaux de chèvres. Ils vouaient

un culte particulier à un arbre, le garoé, qui leur fournissait de l'eau douce en abondance. Cet arbre semblait mythique, mais il a bien existé jusqu'à son déracinement par un ouragan en 1610⁽¹⁾. Témoignage de son existence une plaque commémorative et les six puits à ciel ouvert qui recueillaient son eau. L'arbre se trouvait en altitude vers 1 000 m près de Tiñor sur le versant au vent. Curieusement, sa disparition coïncida avec l'extinction de la civilisation guanche sur Hierro, peut-être privée de ses racines. Selon une légende insulaire, c'est une jeune fille amoureuse d'un Espagnol qui dévoila le secret de son existence et qui le paya de sa vie. Toutefois, le garoé survécut sur les armoiries de l'île de Hierro. Egalement connu sous le nom de l'« arbre saint » de l'île de Hierro, il a été notre première rencontre avec l'arbre fontaine, capable de capter l'eau des brouillards et des bruines, et qui permettait ainsi le

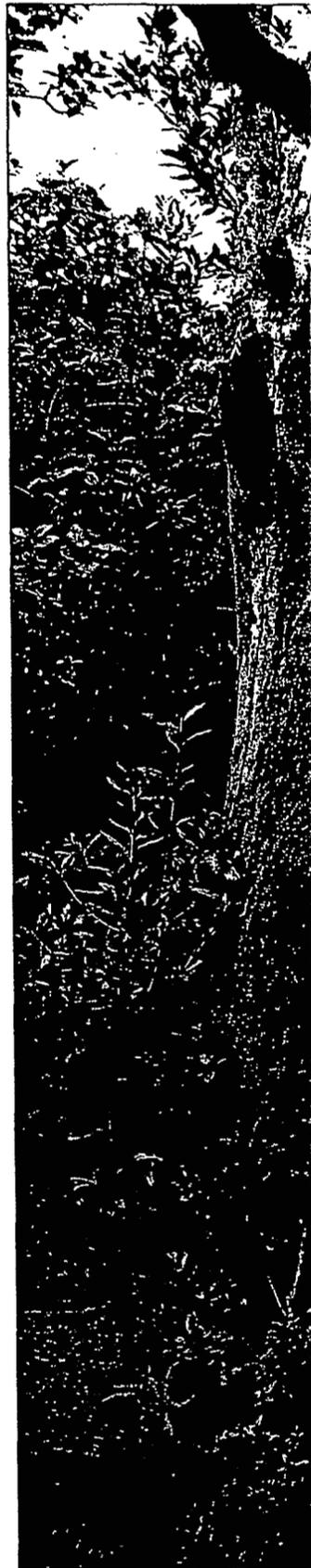




Figure 1. Dans certaines régions du monde, il est surprenant de voir prospérer des arbres et des arbustes à forts besoins en eau, alors que la faiblesse de la pluviométrie rend a priori leur existence impossible. C'est en particulier le cas aux Canaries. En A, on peut voir la forêt des Montes de las Mercedes qui recouvre les croupes occidentales du massif montagneux du nord de l'île de Tenerife où le brouillard a sévi en moyenne 199 jours par an sur une période d'observation de douze ans. En B, il s'agit de la forêt de la vallée de La Orotava à Tenerife qui s'étend entre 1 000 et 1 600 m d'altitude. La photographie est prise dans la formation végétale « Payal-Brezal » caractérisée par des myricacées arborescentes et des bruyères arborescentes. La forêt est dominée par la silhouette des pins canariens qui peuvent atteindre 30 m de hauteur. (Cliché A : Cabildo Insular de Tenerife, Patronato de Turismo ; B : Alain Giédo).

ALAIN OJEDA, hydrologue, est chargé de recherche au centre ORSTOM de Montpellier et membre du réseau ser (Systèmes écologiques tropicaux).
 ANDRÉS ACOSTA BALADÓN, de nationalité uruguayenne, est agronométeur météorologue honoraire de l'Organisation météorologique mondiale.
 PIERRE FONTANEL, est botaniste au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) à Montpellier.
 JOSUÉ FERNÁNDEZ MARTÍN, de nationalité espagnole, est forestier à l'ICONA (Instituto nacional para la conservación de la naturaleza) à Hierro (Canaries).
 ARNOLDO SANTOS, de nationalité espagnole, est botaniste et responsable du Jardin d'acclimatation de La Orotava (Canaries).

développement d'une véritable vie agricole dans des milieux à faible pluviométrie (fig. 1). Très vite l'arbre fontaine s'est révélé correspondre à un phénomène répandu dans le monde entier dans des lieux très particuliers et, nous le verrons dans cet article, exploité par l'homme depuis des milliers d'années.

En dépit de quelques incertitudes, nous pensons que le *garoé* devait être une lauracée et, plus précisément, un laurier endémique de Madère et des Canaries, un spécimen d'*Ocotea foetens*. *O. foetens* a été identifié de manière très vraisemblable grâce à l'expertise d'Arnoldo Santos, du Jardin d'acclimatation de La Orotava fondé dès 1788 à Tenerife. D'après la description de Barthélemy de las Casas, le *garoé* mesurait plus de trois troncs d'hommes, soit un diamètre de l'ordre de 1,50 mètre. Il s'agissait d'un spécimen tout à fait exceptionnel car, aujourd'hui, aucun *Ocotea foetens* de ce diamètre n'existe sur Hierro. S'agissant d'une essence forestière, l'exploitation des arbres empêche la croissance de très gros exemplaires.

D'autres recherches bibliographiques en Angleterre et en Espagne nous ont permis de trouver un dessin du *garoé* édité en 1764 et il s'agit bien d'un laurier (fig. 2). L'historien et entrepreneur anglais George Glas, qui proposait à cette époque le développement de la pêche régionale et d'une fabrique pour transformer avant de les exporter les produits des Canaries, appelle l'arbre fontaine *garsé* ou *til*^(2,3). Or à Hierro aujourd'hui, *O. foetens* s'ap-

pelle toujours *til* ou *tilo*^(1,4). Nous en avons trouvé une autre illustration dans un ouvrage de E. Charton, daté de 1855⁽⁵⁾, qui reprend lui-même une illustration de 1748. Le dessin du *garoé* correspond à un laurier rattaché à l'espèce *Laurus foetens* par un scientifique du XIX^e siècle, le Dr Roulin. Ces éléments concordent parfaitement. L'espèce, *foetens*, est toujours celle du *til* mais le genre est différent, car le genre *Ocotea* ne fut créé qu'à la fin du XIX^e siècle. Le livre de E. Charton est particulièrement précieux, car on y trouve de surcroît la réédition de la première mention de l'existence du *garoé*, parue en 1630 dans la narration de la conquête des Canaries par Jean de Béthencourt. Ecrite entre 1402 et 1405 par les deux biographes de Béthencourt, P. Bontier et J. Le Verrier, voici la note la plus ancienne sur le *garoé* : « Dans les parties les plus hautes de l'île, il y a des arbres qui toujours dégouttent eau belle et claire, qui chet en fosse au près des arbres »⁽⁵⁾.

DES FORÊTS QUI PROSPÈRENT DANS LE BROUILLARD

L'existence actuelle d'arbres fontaines explique certaines situations paradoxales rencontrées un peu partout dans le monde (fig. 1). Dans des régions côtières du Chili, du Pérou, d'Afrique du Sud, d'Ethiopie, etc., et

dans certaines îles (Cap-Vert, Canaries, Galapagos, etc.), il est surprenant de voir prospérer des arbres et des arbustes à forts besoins en eau, alors que la faiblesse de la pluviométrie rend *a priori* leur existence impossible. Le meilleur exemple de mise en valeur contemporaine des arbres fontaines est encore l'île de Hierro, véritable petit laboratoire naturel pour l'étude du brouillard (fig. 3). L'étagement des terroirs du versant septentrional au vent y dépend en grande partie de l'utilisation ou non des brouillards. La plaine côtière est occupée par des cultures potagères, des champs de maïs et un début d'aménagement touristique ; le bas du versant est dédié à la vigne jusqu'à la zone du brouillard qui commence à 600 m d'altitude ; les agglomérations, Sabinosa (250 m), Frontera (375 m), Guarazoca (550 m), Mocanal (570 m), Valverde (575 m), sont perchées pour des raisons défensives. Toutefois, elles sont aussi proches de la zone des brouillards où se développe l'activité pastorale. A partir de 600 m, la forêt liée au brouillard, la forêt de lauriers associée au « Fayal-Brezal » (formation végétale constituée de myricacées et de bruyères arborescentes) se maintient sur les flancs escarpés des hauts versants et constitue une véritable île végétale au sein du désert canarien (fig. 4). Aujourd'hui, différents types de forêts nébuleuses, à ne pas confondre avec une forêt de nuages classique (*cloud forest* des Anglo-Saxons), ont été identifiés. Selon Ch. Huttel, botaniste au Centre ORSTOM de Quito, la forêt de nuages croît en Equateur à des altitudes très élevées (3 000 à 3 500 m), dans des zones où la pluviométrie est déjà abondante et où les brouillards n'apportent seulement qu'un supplément d'humidité. Les forêts nébuleuses, objet de notre étude, se rencontrent à plus basse altitude, dans des localités côtières ou insulaires. Elles ont reçu des botanistes anglais le joli nom de forêts d'elfes, petits génies de l'air. Au sein de ces forêts, on distingue deux sous-types : l'un à climat océanique et l'autre à climat plus sec. Au premier sous-type



Figure 2. L'arbre fontaine, le *garoé* de l'île de Hierro (Canaries), d'après une gravure ancienne extraite de l'ouvrage de Darias y Padrón⁽¹⁾. Le *garoé* devait être un laurier endémique de Madère et des Canaries. D'autres illustrations moins spectaculaires de l'arbre fontaine se trouvent dans *History of the Canary Islands* de G. Glas, parue à Londres en 1764 (in Font Tullet), dans *Voyageurs anciens et modernes* de E. Charton, un ouvrage édité à Paris en 1855, etc. E. Charton reprend lui-même un dessin de 1748 paru dans *The universal magazine of knowledge and pleasure*, etc. Toutes ces illustrations sont postérieures à la disparition du *garoé*.

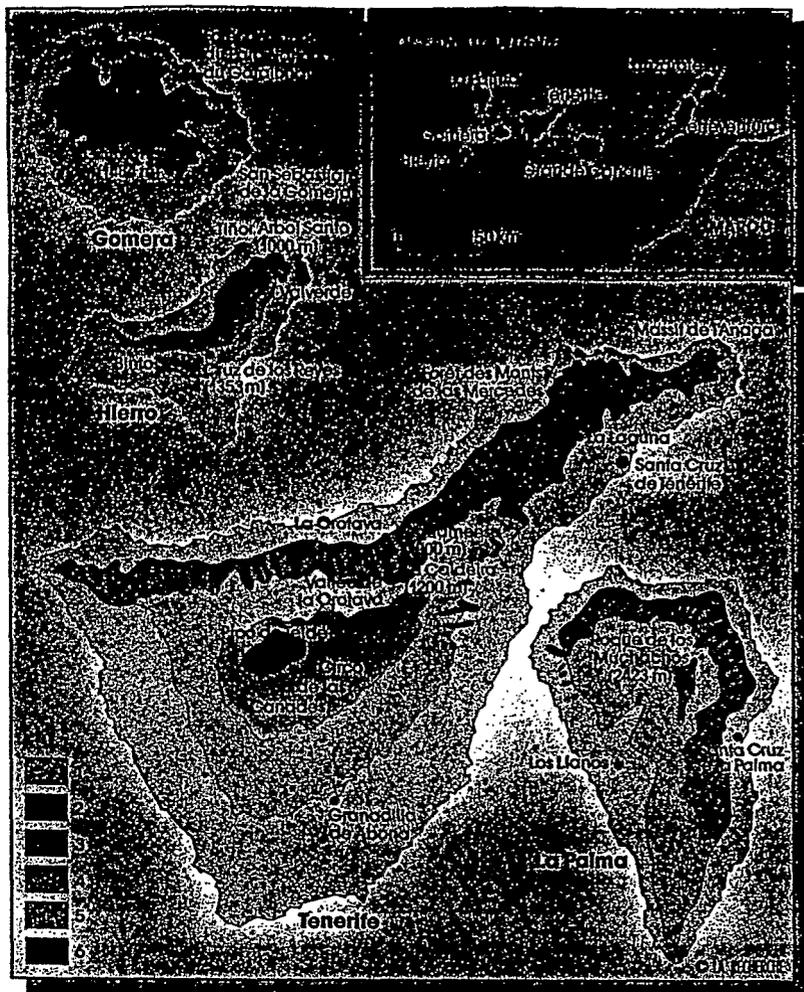


Figure 3. La végétation de quelques îles hautes des Canaries permet d'apprécier l'étagement des formations végétales dû au brouillard. La forêt de lauriers est presque exclusivement cantonnée aux versants septentrionaux. Elle est soumise à l'influence des masses nuageuses, dont les brouillards, poussés par l'alizé qui souffle du nord-est. Des sept îles principales de l'archipel des Canaries, Hierro est la plus petite (280 km²) et la moins peuplée (7 400 habitants). Elle fait partie des îles hautes (1 500 m au Malpaso) de l'archipel qui est exclusivement volcanique. Sur les îles basses, Lanzarote et Fuerteventura, la forêt de lauriers ne peut se développer. Elle a quasiment disparu de la Grande Canarie, très déboisée. Les différentes formations visibles sur cette carte sont les suivantes : en (1) formations broussailleuses xérophytes à petits îlots de *Juniperus phoenicea*, (2) forêts de lauriers, (3) formations « Faya-Brezal » caractérisées par *Myrica arborea*, (4) forêts à *Pinus canariensis* avec petites étendues de formations arbustives à *Cytisus proliferus*, (5) formations arbustives « Retama-Codexo » caractérisées par *Spartocytisus nubigenus* et *Adenocarpus viscosus*, (6) formations altimontaines. (Schémas d'après F. White, 1986)

(1) D.C. Darias y Padrón, Noticias generales históricas sobre la isla del Hierro, Goya (ed.), S/ Cruz de Tenerife, 3^e éd., 1988.

lard sont localisées dans les endroits très venteux comme les cols, c'est-à-dire dans des sites où l'Organisation météorologique mondiale et les constructeurs déconseillent d'implanter des pluviomètres, d'où le manque de données disponibles. Notre exemple de départ, le garoé, était situé au nord-est de Hierro, face à l'alizé soufflant du nord-est dans l'hémisphère nord (fig. 3). Les eaux du brouillard associées systématiquement avec le vent sont appelées par les Espagnols et les Sud-Américains précipitations horizontales. Dans des localités très favorables, d'importantes précipitations annuelles liées uniquement au brouillard ont été relevées. Elles peuvent atteindre 4 176 mm à la Serra Malagueta à Santiago dans l'archipel du Cap-Vert, à 900 mètres d'altitude⁽¹⁰⁾ et 1 354 mm sur la Montagne de la Table (1 086 mètres d'altitude), en Afrique du Sud au-dessus du Cap⁽¹¹⁾. Signalons que les pluies enregistrées aux mêmes lieux et époques furent de 699 mm dans le premier cas et de 1 940 mm dans le second. Le maximum mensuel à la Serra Malagueta a été atteint en août 1980 avec 856 mm de précipitations nébuleuses, alors qu'au pluviomètre n'étaient mesurés que 447 mm ! S'il est poussé par un vent violent, le brouillard précipite sur tout objet interposé. Ainsi le long du désert côtier de Namibie, où la précipitation du brouillard peut atteindre 40 à 50 mm par an, l'eau se condense d'abord à la surface des rochers. Ensuite, l'eau d'une vaste surface de captage s'écoule à l'intérieur de crevasses et les plantes vasculaires peuvent se développer dans les zones sablonneuses même sans précipitations

(2) G. Glas, The fountain tree (1764), 15, 374, Weather, 1960.
 (3) I. Font Tullot, Climatología de España y Portugal, Servicio Meteorológico Nacional, Madrid, 1983.
 (4) I. Sanchez Garcia, Bosque y agua en El Hierro, ICONA, 30, 1982.
 (5) E. Charton, Voyageurs anciens et modernes, Magasin Pittoresque, Paris, III, 1855.
 (6) P.L. Pérez de Paz (ed.), Parque Nacional de Garajonay, ICONA, Madrid, 1990.
 (7) P. Dansereau, Collectanea Bot. VII, I, 11, 227, 1968.
 (8) M.J. Dourojeanni et C.F. Ponce, Los parques nacionales del Perú, INCAFO, Madrid, 1978.
 (9) Reis F. Cunha Garcia de Ota, 12, 4, 719, 1964.
 (10) A.N. Acosta Baladón, A. Gioda, Sécheresse, 2, 132, 1991.
 (11) J.F. Nagel, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 82, 452, 1956.

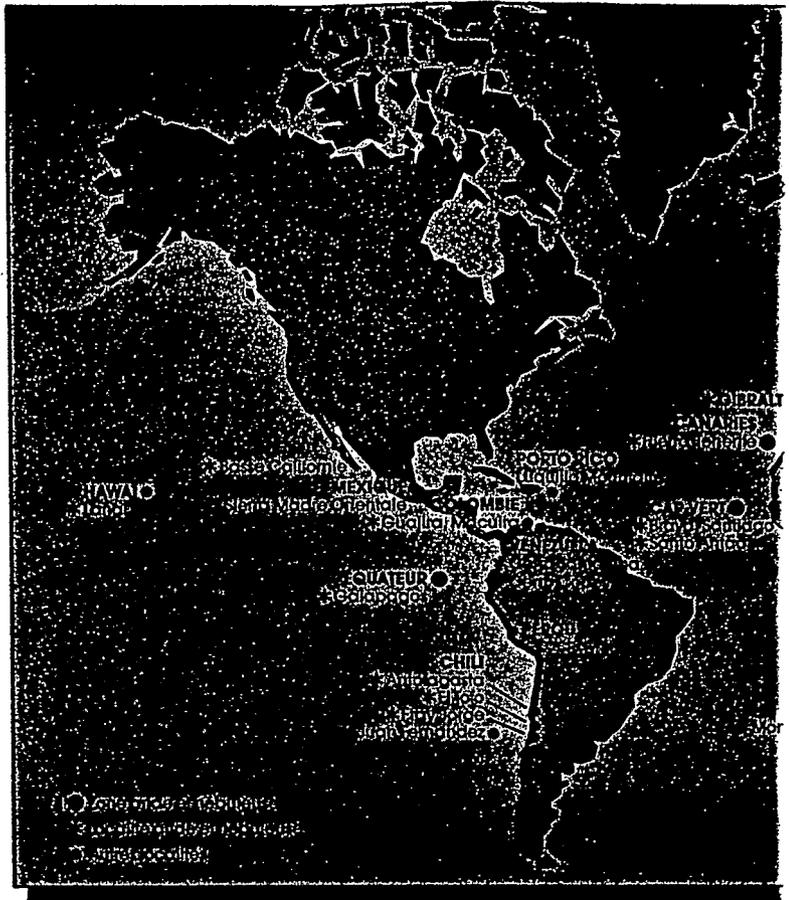
se rattache la forêt de lauriers des Canaries, qui baigne presque tous les jours dans le brouillard grâce à l'alizé⁽⁶⁾. Ainsi, *O. foetens*, le garoé, fait partie du cortège floristique de la forêt de lauriers, la laurisyve, constituée à peu près exclusivement d'arbres à larges feuilles persistantes, vestige de la flore subtropicale humide largement répandue dans le sud de l'Europe et dans certaines parties de l'Afrique du Nord à la fin du Tertiaire⁽⁷⁾. Cette formation végétale constitue une variété des forêts nébuleuses largement répandues dans les montagnes intertropicales. De rares formations comparables existent dans deux archipels océaniques (fig. 5) : à Otago dans l'île du sud de la Nouvelle-Zélande (46° S-171° E) ; sur le petit archipel chilien de Juan Fernández (34° S-78/81° W)⁽⁷⁾. Ces forêts ont en commun un climat très océanique accentué par leur insularité. Au second sous-type, plus sec, se rattachent les forêts d'elfes des collines du Pérou, comme Lachay⁽⁸⁾, ou encore l'oasis d'Erkowit, au sud du Soudan (fig. 5). Les précipitations y sont plus

faibles ; le vent est moins constant le long de la côte Pacifique de l'Amérique du Sud ou bien, comme à Erkowit, la saison sèche sans brouillard dure plusieurs mois. Que requiert le fonctionnement d'un arbre fontaine ? Outre des conditions climatiques particulières, climat tropical et vents importants (fig. 5), il faut d'abord un brouillard très dense et persistant, entrant en contact avec les montagnes à partir d'une certaine altitude (500-600 m en général) permettant la condensation de la vapeur d'eau. Par exemple, sur l'île de Santo Antão dans l'archipel du Cap-Vert⁽⁹⁾, le brouillard se maintient plus de 200 jours/an. De même, à Hierro où existait le garoé, la mer de brouillard n'existe qu'entre 600 et 1 500 m (fig. 4). Cela explique pourquoi le rôle du brouillard est souvent passé inaperçu. En effet, dans le monde entier, la mesure des phénomènes météorologiques est rare en montagne, car les coûts d'installation et de fonctionnement des appareils y sont élevés. De plus, les fortes précipitations du brouil-

mesurables. Dans le désert du Namib, la croissance de la végétation a lieu principalement durant l'hiver austral, quand les brouillards sont fréquents, et non durant l'été qui est la saison des pluies occasionnelles⁽¹²⁾. Le *garoé* lui-même se trouvait au pied d'un escarpement rocheux d'environ 10 m de commandement, au fond d'un long vallon.

La captation d'eau de brouillard par les végétaux est d'autant plus importante que les spécimens sont isolés ou groupés en petits bosquets. En effet, il est nécessaire que la turbulence autour d'eux soit maximale. Notons que l'espèce et la famille des végétaux fontaines peuvent être très variées. Dans un environnement boisé, les arbres fontaines ne pourront être localisés que sur les marges forestières. C'est la situation micro-météorologique qui autorise le phénomène de précipitation des brouillards. Dans le Sultanat d'Oman, près de Salalah, trois arbres permettent de collecter jusqu'à 180 litres/jour pendant la mousson, soit un rendement spécifique maximal de 60 litres/jour, selon P. Cereceda de l'université de Santiago au Chili. Les agaves au Cap-Vert fournissent 20 l/jour pendant les périodes favorables, d'après des observations s'étalant sur une quarantaine d'années. Un petit palmier donnait à peu près la même quantité d'après une illustration des années 1960⁽⁹⁾.

Les végétaux présentent de nom-



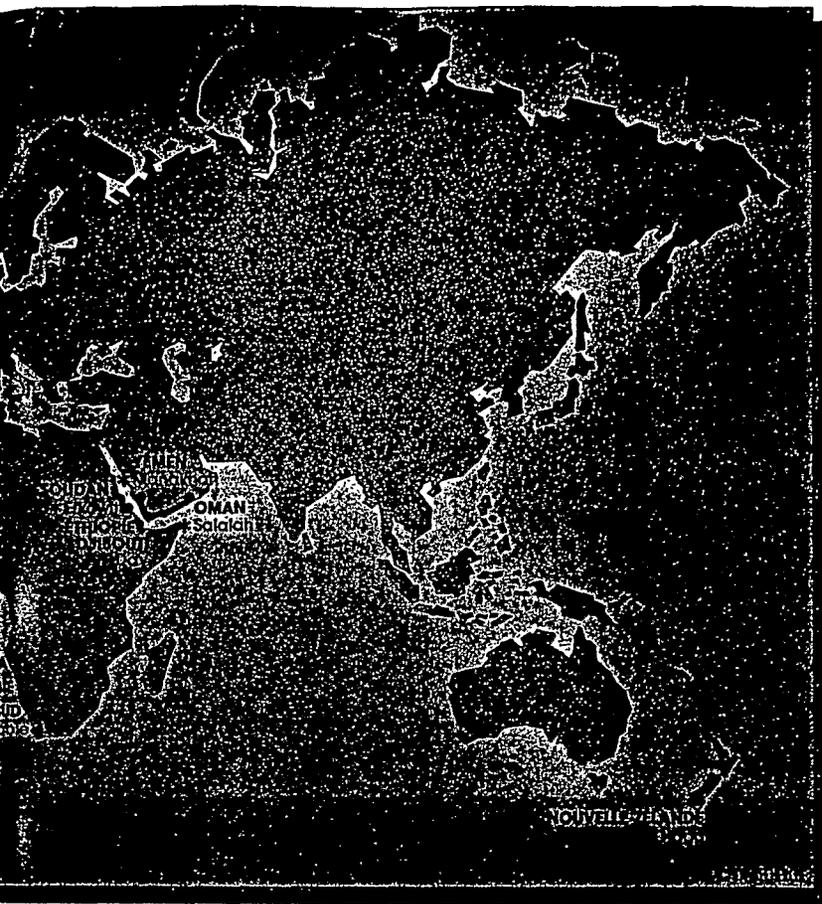
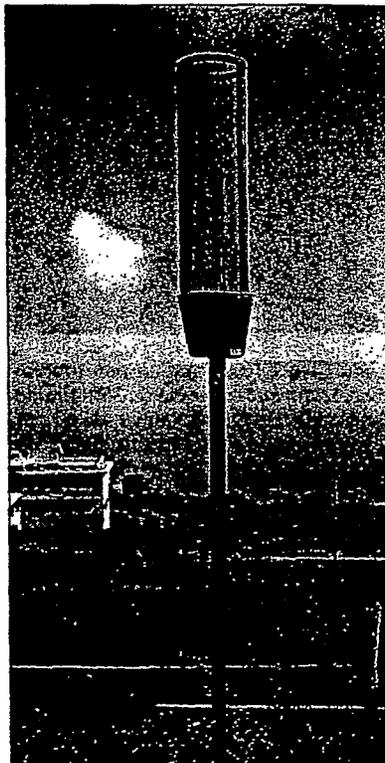


Figure 5. Les zones favorables à la précipitation du brouillard sont nombreuses sur le globe notamment dans les régions côtières et insulaires des zones tropicales et subtropicales. Les régions concernées sont à la fois les tropiques humides et les tropiques arides. Parmi les zones tropicales et subtropicales humides, les précipitations des brouillards ont été étudiées notamment à Porto Rico, en Colombie, sur la côte orientale du Mexique. Dans les zones arides et en Amérique, les régions favorables sont essentiellement les montagnes côtières du Chili, du Pérou et de l'Équateur méridional, y compris les Galapagos, celles du nord du Venezuela et de la Colombie atlantique, de la Basse-Californie, et, dans le Pacifique, l'île de Lanai à Hawaï. L'Afrique du Sud, la Namibie et l'Angola méridionale et, tout à l'est du continent, les chaînes côtières du Soudan, de l'Érythrée et de Djibouti constituent les deux pôles africains des brouillards en zone aride. Ils sont complétés par une région atlantique, comprenant les Canaries et l'archipel du Cap-Vert, qui mord sur la Mauritanie et le Maroc méridional. Enfin, en Asie, le sud de la péninsule arabique (Dhofar d'Oman et Yémen) constitue le pendant de la Corne de l'Afrique.

breuses adaptations aux milieux arides, la captation des brouillards par les végétaux fontaines étant l'une d'entre elles. A côté du cas des arbres fontaines, d'autres stratégies existent pour capter l'eau du brouillard à l'échelle de la feuille et du rameau. Ainsi, les gouttelettes de brouillard peuvent être arrêtées par une feuille large ou grande. Formées par coalescence, les gouttes sont amenées à un collecteur formé par la nervure centrale et débouchent sur un réservoir à la naissance de la feuille.

Figure 4. L'apparition des arbres fontaines est liée à la présence d'un brouillard très persistant, localisé en montagne à partir d'une certaine altitude (500-600 mètres). A Hierro, où est prise la photographie (A), la mer de brouillard n'existe qu'entre 600 et 1 500 m. Les nuages sont ici accrochés aux versants abrupts du Golfo à environ 600 m d'altitude. Au premier plan, on voit les maisons de Frontera. En B est photographié le type de capteur de brouillard adopté aux Canaries pour mesurer précisément la quantité de précipitations horizontales. Il s'agit d'un cylindre de un mètre de haut et d'un diamètre de 20 centimètres, constitué d'un grillage métallique du style moustiquaire. L'appareil est situé sur Tenerife dans la vallée de La Orotava à 1 000 m d'altitude; il est installé à 2 m de hauteur et jouxte la station météorologique gérée par l'ICONA. (Clichés Alain Gioda)



C'est la stratégie adoptée par les agaves, par les broméliacées, c'est-à-dire la famille comprenant l'ananas, par l'arbre du voyageur (*Ravenala madagascariensis*) qui est une espèce proche d'allure du bananier, etc. Un autre type d'adaptation a lieu quand le réseau dense et mouvant de la couronne de l'arbre est formé par des feuilles minces ou petites. Le réseau de la couronne du feuillage est alors assimilable à un filet ou un grillage, c'est-à-dire comparable à un bon capteur de gouttelettes de brouillard. Se rattachent à ce type les acacias, les *Prosopis*, les tamaris, etc. Ces types d'adaptation se partagent l'espace. Le premier correspond à la strate du taillis et le second à celle arborée. De leur côté, les arbres fontaines sont des spécimens isolés ou groupés en bosquets ou encore ils sont confinés aux marges forestières. Par conséquent, il n'existe pas une formation végétale unique spécifique des oasis nébuleuses. Il est possible d'y rencontrer des formations arbustives comme le *fynbos*, nom vernaculaire qui définit une formation végétale de la région du Cap en Afrique du Sud et évoquant le maquis méditerranéen, des forêts à *Juniperus procera* comme dans l'écosystème de Day à Djibouti, des formations ouvertes à *Haageocereus lachayensis*, une cactacée, dans les collines péruviennes... Par delà la grande diversité des formations, l'ensemble des végétaux des zones nébuleuses doit présenter une même adaptation à une faible luminosité. La physiologie la mieux connue des plantes du brouillard est celle des végétaux d'une grande importance économique, comme les caféiers et les théiers. Le caféier *Arabica* et les théiers sont des plantes tropicales

(12) F. White, La végétation en Afrique, Orstom-Unesco, 1986.



Figure 6. Il existe des arbres fontaines modernes. En témoigne cet exemplaire centenaire de genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*) sur l'île de Hierro, à Cruz de los Reyes (en A). Le diamètre de sa couronne mesurait 8 m; il a été employé comme capteur d'eau dans les années 1980 par l'ICONA, le génie rural espagnol. L'eau qu'il produisait était canalisée vers trois réservoirs clos atteignant une capacité totale de 200 m³. Autre exemple, en B, l'olivier et un arbuste méditerranéen *Rhamnus* dominent une citerne dans une région montagneuse du Sultanat d'Oman (Arabie méridionale), El Djebel, où les précipitations horizontales représentent 80 % des précipitations totales. Durant les mois d'été (mousson asiatique), cette citerne recueille 180 litres par jour en moyenne. A droite, un capteur de brouillard est installé avec un petit fût pour collecter et mesurer les précipitations. (Cliché A: Z. Hernandez Martín; B: Pilar Cereceda de l'université de Santiago du Chili).



parfaitement adaptées à la nébulosité; la première plante est originaire des hauts-plateaux de l'Abyssinie du sud-ouest, vers 2 000 m d'altitude, dans des zones à brouillard. Nous nous attachons au caféier *Arabica*, car c'est aussi une plante pouvant bien s'adapter à la sécheresse et prospérer sous des climats arides. O. Neuvy, du Bureau agricole franco-yéménite de Sana'a, étudie la croissance du caféier dans des conditions extrêmes près de Manakhah, au-dessus de la mer Rouge, en liaison avec F.N. Reyniers et P. Quideau, du CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) de Montpellier. Sur les

montagnes à 1 600 m d'altitude, le caféier *Arabica* se contente de 350 mm de pluies par an en moyenne alors que l'évapotranspiration potentielle pendant la même période atteint 1 700 mm environ⁽¹⁰⁾. Plusieurs éléments, comme des sols volcaniques de qualité protégés par des couches de pierres, qui les isolent du rayonnement direct de l'atmosphère, un réseau de rigoles, qui apportent l'eau à chaque plant lors des rares pluies, et une culture en terrasse sont à l'origine d'une partie de ce paradoxe. Toutefois, le fait que la plante soit un petit ligneux à feuilles persistantes implique qu'elle transpire continuellement et que le pourcentage de ses

pertes en eau dépend exclusivement des conditions météorologiques. En décembre 1991, des sondes ont été installées sur les petits troncs et les branches de caféier afin d'en mesurer le diamètre, surtout lors de la montée de la sève. L'accroissement de leur diamètre, liée à l'alimentation par les précipitations horizontales, est survenu la nuit en concomitance avec le brouillard. La montée de la sève cesse au tout début de la matinée avec la dissipation des brouillards nocturnes. Un phénomène comparable existe dans d'autres zones marginales de culture, favorisées par une autre caractéristique du caféier: la lenteur de son assimilation chlorophyllienne pendant la journée. Cette lenteur rend l'arbuste insensible à la réduction de la lumière par le couvert nuageux.

Sans le brouillard, certaines forêts n'auraient pas existé. C'est, par exemple, le cas de Fray Jorge au Chili, une forêt nébuleuse qui domine directement la mer, accrochée aux sommets d'un chaînon atteignant 600 m d'altitude. Elle est située au sud de la ville de La Serena. La forêt comprend, entre autres, trois essences typiques: l'olivillo (*Aextoxicon punctatum*), le canelo (*Drimys winteri*) et l'arrayán (*Myrce-*

genia correaefolia). Dans les forêts nébuleuses des collines et des montagnes, le froid est vif. Tous les 100 m en altitude, la température moyenne diminue de 1,2 °C environ soit, à peu de choses près, une baisse deux fois plus rapide que la normale sous les mêmes latitudes. Dans le patrimoine écologique mondial, les forêts de brouillard tropicales sont le conservatoire d'une flore qui s'est adaptée à des conditions plus froides durant les périodes glaciaires du Quaternaire. Les nuages bas et stratiformes y masquaient alors fréquemment le soleil, abaissant la température et permettant ainsi l'extension à basse altitude de végétations typiquement

montagnardes⁽¹³⁾. Il est aisé de concevoir que, dans les localités où des végétaux jouent le rôle de capteur de l'humidité et de producteur d'eau à la manière d'une borne-fontaine, les hommes aient pu installer une agriculture qui mette à profit le caractère presque permanent des brouillards. Déjà, les Pré-Colombiens avaient exploité les anciennes oasis nébuleuses du Pérou et du Chili.

A Lachay, au Pérou, de nombreuses civilisations se sont succédé jusqu'à aujourd'hui. Située à une centaine de kilomètres au nord-ouest de Lima, Lachay est une oasis à brouillards, caractéristique des collines côtières du Pérou qui abritent des traces antiques de mise en valeur agricole et des ruines d'établissements humains. Après la disparition, vers 3 800 ans BP (avant le présent), de la civilisation côtière du Pré-Céramique Terminal, le plus important établissement de Lachay fut le village de Doña María peuplé entre 2 800 et 2 500 ans BP et qui se rattache à la civilisation Chavín. L'un des bois actuels de *taras* et de *palillos*, deux légumineuses arborées, se développe entre les terrasses de Chavín, toujours bien visibles et datées grâce à leur céramique. La *tara* (*Caesalpinia tinctoria*)

fut utilisée comme source de tanin⁽⁹⁾. Le paysage actuel serait hérité en totalité des hommes et de l'ancienne mise en culture et en valeur des terroirs⁽¹⁴⁾. La flore aurait survécu jusqu'à aujourd'hui grâce aux ressources en eau provenant des brouillards. De plus, dans les dépôts des gisements Chavín, se trouvent des restes abondants de fruits comestibles comme des avocats, des goyaves et des baies du lucuma, un arbre fruitier du Chili et du Pérou. Il est possible que les arbres produisant ces fruits aient été plantés aussi dans les collines à brouillard au I^{er} millénaire avant J.-C.

Ensuite, un autre établissement important très proche de Doña María fut peuplé par la civilisation Teatino vers 800 après J.-C. Puis le village de Doña María fut de nouveau habité, entre 800 et 900 de notre ère, par un groupe appartenant à la culture Maranga. Des membres de cette même culture établirent aussi en pleine zone des brouillards, à plus de 500 m d'altitude, un village perché de type défensif à Chancaylo, au nord de Doña María. Enfin, Lachay fut occupé par un groupe de la culture Chancay à la fin du XIV^e siècle et au début du XV^e siècle. Après la conquête espagnole et jusqu'à son clas-

l'archipel du Cap-Vert, a bu de l'eau de brouillard en 1942, pendant la Seconde Guerre mondiale⁽⁹⁾. Pour cela, il a exploité un très grand agave d'origine brésilienne (*Furcraea gigantea*) comme collecteur. Aujourd'hui, les Cap-Verdiens exploitent toujours les agaves pour se procurer de l'eau. Le dattier (*Phoenix dactylifera*) a lui aussi été utilisé dans un milieu très aride, toujours dans le même archipel⁽⁹⁾. Sur Hierro, le genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*) a été employé comme capteur dans les années 1980 par l'ICONA (Instituto nacional para la conservación de la naturaleza), le génie rural espagnol (fig. 6A). Il a fourni l'eau de boisson pour les pèlerins de la Cruz de los Reyes située à une altitude de 1 353 m⁽⁴⁾. Autres exemples, l'olivier (*Olea europea*) et un arbuste méditerranéen (*Rhamnus spp.*) sont utilisés comme collecteurs au-dessus d'une citerne depuis la fin des années 1980 dans le Dhofar d'Oman (Arabie du Sud), à El Djebel (fig. 6B). Cette petite liste n'est pas exhaustive. Parfois connus de façon anecdotique ou seulement localement, les arbres fontaines ont existé et existent encore, soit de façon isolée, soit sous forme de bosquets.

LE CAPTAGE DU BROUILLARD AVEC DES GRILLAGES PERMET L'ALIMENTATION EN EAU DES JEUNES ARBRES DANS LES PAYS ARIDES



De nos jours, une recherche systématique sur cette collecte commence à être entreprise et des techniques sont mises au point. Par exemple, du phénomène de précipitation sur les rochers, que nous avons vu plus haut, est venue l'idée d'optimiser un attrape-brouillard. Les scientifiques ont remplacé les pierres par des grillages du type moustiquaire. Ces recherches ont débuté sous l'impulsion d'un Uruguayen, R.P. Saá, dans les années 1950 à l'université catholique du Nord, à Antofagasta au Chili. De très nombreux capteurs, dont certains montés sur des girouettes, ont été mis au point. Quelques-uns d'entre eux sont même flexibles, leur support étant en bambou, comme celui mis au point à Antofagasta par les physiciens O. Tapia et R. Zuleta, qui ont travaillé pendant vingt ans sur le projet « Camanchaca » (le nom indien du brouillard côtier au Chili). La flexibilité du capteur évite son arrachage lors des vents violents. De plus, s'il est monté sur une girouette, on est sûr qu'avec un capteur de brouillard fixé perpendiculairement à celle-ci, la collecte de

(13) J. Maley, *Climatic Change*, 19, 79, 1991.
(14) F.A. Engel, *De las begonias al maíz*, CIZA, Lausanne, 1987.
(15) R.S. Schemenauer, P. Cereceda, *J. Applied Meteorology*, 31, 3, 275, 1992.



Figure 7. Les recherches sur l'utilisation des brouillards comme source d'eau potable sont aujourd'hui reprises par exemple pour l'alimentation de villages au Chili et au Pérou ou encore en agroforesterie. Cette photographie illustre une expérience de reboisement menée au Chili dans la région particulièrement aride d'Antofagasta par R. Espejo Guasp. On peut voir, en arrière de chaque plant et orientés face au vent dominant lors des épisodes nébuleux, des capteurs de brouillard qui permettent d'apporter un supplément d'eau aux jeunes arbres en multipliant la surface interceptant les gouttelettes. Grossies par coalescence, ces dernières créent un écoulement sur les capteurs qui parvient ensuite au sol pour alimenter les plants. (Cliché R. Espejo Guasp)

sement en 1977 comme Réserve nationale, pastoralisme et coupe forestière furent les modes d'exploitation de Lachay.

Dans un passé plus proche, l'homme s'est contenté de collecter et de stocker l'eau de brouillard. L'usage de l'eau de brouillard pour l'approvisionnement en eau potable était associé aux périodes de grande sécheresse et à un isolement total des populations. Ce fut le cas des habitants de Hierro avant 1610 ou de ceux du hameau de Tiñor pendant la guerre civile espagnole et en 1947, une année où la sécheresse fut exceptionnelle. Enfin, Hermógenes Gonçalves, un agriculteur de l'île de Brava, dans

l'eau du brouillard sera maximale car la surface interceptée le sera aussi. Aujourd'hui, toujours à Antofagasta, R. Espejo Guasp suit la croissance de jeunes arbres alimentés par l'eau condensée sur ces capteurs (fig. 7). Actuellement, les arbres fontaines ont permis à l'agroforesterie de se développer dans ces étonnantes régions brumeuses. Parmi les arbres utilisés pour reboiser des zones à brouillard, citons les genres *Acacia*, *Prosopis*, *Cupressus* (cypress), *Juniperus* (genévriers), *Eucalyptus*, *Olea* (oliviers), *Podocarpus*. Tous ces arbres existent déjà dans les forêts dites climaciques (constituées d'une communauté stable de végétaux bien adaptés à l'environnement) et certains, comme les acacias, les oliviers et les eucalyptus, ont fait la preuve de leur rusticité. Par exemple, le genre *Acacia* est bien adapté aux conditions difficiles en milieu aride et en milieu nébuleux. Dans l'archipel du Cap-Vert, *A. nilotica* et *A. farnesiana* sont parmi les essences de reboisement les plus répandues. Toutefois, dans le cadre des forêts de brouillards, le meilleur exemple est *A. spirocarpa*, l'acacia-parasol. Cette espèce se rencontre notamment dans l'oasis nébuleuse d'Erkowit, entre 600 et 1 000 m d'altitude, au sud de Port-Soudan près de la mer Rouge. Les précipitations sous ces arbres fontaines sont si abondantes qu'une véritable prairie s'y développe, exactement à l'aplomb de leur couvert, alors qu'entre chaque arbre, la végétation reste clairsemée. Les études de C. Troll, botaniste allemand, en 1935, et de l'écologue M. Kassas de l'université de Khartoum, en 1956, ont montré que c'est bien l'eau de brouillard qui était cause de la croissance de la prairie et non pas l'ombrage protecteur que dispensent les acacias. L'inclinaison du Soleil à cette latitude (19° N) est en effet suffisante pour donner des ombres portées auxquelles ne correspondent pas les taches de végétation herbacée. Du strict point de vue de l'optimisation de la ressource du brouillard, le succès des arbres fontaines suggère d'effectuer des plantations de reboisement en bandes, en boqueteaux et fondées sur des plants déjà suffisamment grands pour intercepter les gouttelettes projetées par le vent, c'est-à-dire les précipitations horizontales. De plus, juste en arrière de chaque plant et orientés face au vent dominant lors des épisodes nébuleux, des capteurs de brouillard peuvent apporter un supplément d'eau aux jeunes arbres en multipliant la surface interceptée par les gouttelettes. Grossies par coalescence, ces dernières créent un écoulement sur les capteurs qui précipite ensuite sur le sol pour alimenter les plants. C'est, entre autres la démarche suivie au Chili par la

CONAF (Corporación nacional forestal) pour le reboisement dans la région particulièrement aride d'Antofagasta (fig. 7).

Les forêts nébuleuses des zones arides sont assimilables à des oasis dans les déserts et elles ont donc depuis longtemps été exploitées par les hommes. Le plus souvent, l'élevage extensif fut le meilleur mode de mise en valeur, les ressources en eau étant en effet trop limitées pour une agriculture intensive. Ajoutons que de nombreuses plantes cultivées, comme la tomate ou le maïs, ne supportent pas le faible ensoleillement de ces régions. En revanche, grâce aux arbres fontaines naturels, la charge de caprins atteignait cinq animaux par hectare et par an à Lachay, au Pérou, avant le classement de la zone en Réserve nationale survenu en 1977⁽⁸⁾. Il était indispensable de limiter cette charge pour conserver le patrimoine botanique. Ce dernier est, dans le Parc national de Garajonay sur l'île de La Gomera aux Canaries, d'une qualité si remarquable qu'il a justifié son classement au patrimoine mondial de l'UNESCO en 1986. Ce parrainage pérennise aussi des études scientifiques, notamment sur le brouillard, entamées il y a une dizaine d'années par L. Santana Pérez de l'ICONA dans cet environnement forestier⁽⁹⁾.

LE BROUILLARD UTILISÉ COMME SOURCE D'EAU POTABLE



De nos jours, des recherches sur la qualité des précipitations du brouillard utilisées comme source d'eau potable sont menées à plus grande échelle notamment par R.S. Schemenauer, d'Environnement Canada, et P. Cereceda, de l'université pontificale de Santiago⁽¹⁵⁾. Il s'agit au Chili de l'alimentation en eau du village de Chungungo (330 habitants) et au Pérou de celle de petites communautés dans la région de Lima. Outre le soutien de services nationaux comme la CONAF (Corporación nacional forestal), au Chili, l'ensemble bénéficie de subventions canadiennes entre autres du CRDI (Centre de recherche pour le développement international). Soixante-quinze capteurs étaient en place en 1991 à El Tofo au nord de La Serena. Chacun est constitué d'un cadre sur lequel est tendue une double moustiquaire de 48 m² en polypropylène. Une gouttière recueille l'eau du brouillard par gravité au bas du cadre. Il s'agit d'une technologie très économique, s'appuyant sur une énergie éolienne renouvelable et ne

consommant aucun combustible fossile. L'ensemble est hors de portée des animaux, la gouttière étant à deux mètres de haut. L'eau est canalisée des collines, vers 800 mètres d'altitude, jusqu'à la côte. Calculée sur plus de trois années, la production journalière moyenne d'eau de brouillard est de 3 l/m² de moustiquaire. En été austral, elle a déjà dépassé 8 l/m² comme en novembre 1989. La production de brouillard est notable, même pendant les mois défavorables de l'hiver austral. Enfin, il faut signaler que le brouillard est un très bon marqueur de la pollution atmosphérique. Ainsi, sa composition chimique est étudiée depuis 1986 pour un travail sur les pluies acides et le dépérissement des forêts des monts Šumava en Bohême par l'équipe de V. Eliáš du laboratoire d'hydrodynamique de Prague.

Cette recherche nous a fait envisager l'eau du brouillard comme un don des dieux grâce à l'histoire du *garoé* et comme une ressource trop souvent négligée tandis que les zones nébuleuses des basses montagnes arides renferment un patrimoine botanique d'une rare importance écologique le long des côtes et sur les îles tropicales. Nous pouvons aussi dire qu'il y a aujourd'hui une voie d'application si les chercheurs acceptent, en utilisant les techniques les plus modernes, de mettre leurs méthodes de travail sur la trace d'un savoir ancien. La plantation de nouveaux arbres fontaines est à encourager vivement dans les localités connues par les vieux forestiers pour disposer de bonnes ressources en eau de brouillard, comme l'a fait Z. Hernandez Martín qui, en 1945, a planté un *Ocotea foetens* à la place exacte de l'arbre saint de Hierro, dans le but de créer une nouvelle fontaine végétale. Ces nouveaux *garoé* auront une puissante valeur d'exemple et de sensibilisation en écologie appliquée. Ils pourront aider les services des eaux et forêts à trouver des financements dans une œuvre de longue haleine comme celle du reboisement. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- J. Blot, *Bilan écologique des forêts à Juniperus procera*, Thèse, Univ. Bordeaux III, 1991.
- J. Cavelier et G. Goldstein, « Mist and fog interception in elfin cloud forests in Colombia and Venezuela », *J. Tropical Ecology*, 5, 1989.
- Ch. Gischler, *The missing link in a production chain*, Unesco-Rostlac, Montevideo, 1991.
- O. Kerfoot, « Mist precipitation on vegetation », *For. Abstr.*, 29 (1), 1968.
- R.S. Schemenauer et al., « A neglected water resource : the camanchaca of South America », *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 69 (2), 1988.
- O. Tapia et R. Zuleta, *Veinte años de camanchacas y dos del proyecto Mejillones*, UCN, Antofagasta, Chili, 1980.