

**DE L'HYDROLOGIE DE TERRAIN
A L'HISTOIRE DU CLIMAT
DES PAYS DU SUD**

**par
Alain GIODA
Chercheur IRD de l'UR 32 Great Ice**

**Ecole Doctorale n° 60
« Espaces, Temps et Civilisations »**

**Texte de la soutenance pour
L'HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES
en Géographie**

**Vendredi 24 juin 2005
Maison de la Géographie
Université de Montpellier III - Paul Valéry**

Membres du Jury

**Mme Claude COSANDEY, Directrice de Recherche CNRS, LGP de Meudon
M. Pierre HUBERT, Maître de Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines de
Paris, CIG de Fontainebleau
M. David LEFÈVRE, Rapporteur, Professeur, Université de Montpellier III
M. Georges de NONI, Rapporteur, Directeur de Recherche IRD, Montpellier
M. Bernard POUYAUD, Directeur de Recherche IRD, MSE de Montpellier
M. Jean-Claude ROUX, Rapporteur, Chargé de Recherche IRD, Montpellier
M. Pierre USSELMANN, Tuteur, Directeur de Recherche CNRS, MGM de Montpellier**

DE L'HYDROLOGIE DE TERRAIN A L'HISTOIRE DU CLIMAT DES PAYS DU SUD

par

Alain GIODA

Chercheur IRD de l'UR 32 Great Ice

Ecole Doctorale n° 60

« Espaces, Temps et Civilisations »

**Texte de la soutenance pour
L'HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES
en Géographie**

Vendredi 24 juin 2005

Maison de la Géographie

Université de Montpellier III - Paul Valéry

Membres du Jury

Mme Claude COSANDEY, Directrice de Recherche CNRS, LGP de Meudon

**M. Pierre HUBERT, Maître de Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines de
Paris, CIG de Fontainebleau**

M. David LEFÈVRE, Rapporteur, Professeur, Université de Montpellier III

M. Georges de NONI, Rapporteur, Directeur de Recherche IRD, Montpellier

M. Bernard POUYAUD, Directeur de Recherche IRD, MSE de Montpellier

M. Jean-Claude ROUX, Rapporteur, Chargé de Recherche IRD, Montpellier

M. Pierre USSELMANN, Tuteur, Directeur de Recherche CNRS, MGM de Montpellier

Tout scientifique est un homme précédé

Une adaptation d'une formule du Pasteur Jean Dumas,
spécialiste du dialogue interreligieux.

SOMMAIRE

	Page
Introduction	7
A. Les années de formation et de réflexion (1976-1990)	9
A. 1. <u>Les années de formation (1976-1985)</u>	9
A. 1. 1. L'hydrologie historique (1976-1979)	9
A. 1. 2. L'hydrologie de terrain autour du monde (1980-1985)	10
A. 2. <u>Les années de réflexion (1986-1990)</u>	11
A. 2. 1. Les efforts de synthèse et valorisation	11
A. 2. 2. Vers l'histoire	12
B. Les années de concrétisation (1991-2005)	17
B. 1. <u>Le moyen : la coopération au Sud avec ses scientifiques</u>	17
B. 1. 1. La coopération spontanée avec les scientifiques du Sud	18
B. 1. 2. La coopération structurée avec les scientifiques du Sud	21
B. 2. <u>La méthode : l'utilisation de ressources négligées</u>	25
B. 2. 1. Les précipitations occultes	33
B. 2. 2. Les archives et le changement climatique	35
B. 2. 3. Les avancées en histoire du climat andin	38
B. 3. <u>La valorisation des savoir-faire traditionnels du Sud et de ses scientifiques</u>	44
B. 3. 1. El Hierro, l'arbre fontaine et la Réserve de la Biosphère	44
B. 3. 2. Trans-en-Provence et son puits de rosée	45
B. 3. 3. L'ours de Cuvier et les forêts de nuage	46
B. 3. 4. Les hommages aux scientifiques oubliés des bouts du monde	49
Conclusion	61
Références (hors les miennes)	63
Liste des travaux	65
Articles et des résumés joints	83

SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS ET DES PLANCHES

	Page
Fig. 1. Echantillon de filet attrape-brouillard	20
Fig. 2. Dépliant de 1999 du projet ARCHISS (en français, Enquête archivistique en histoire du climat)	22
Fig. 3. Poster de 2003 du projet ARCHISS en Amérique Latine	27
Fig. 4. Les participants à l'atelier OMM de 2003 autour des projets ARCHISS et DARE (en français, Sauvegarde des données météorologiques)	29
Fig. 5. Le programme du séminaire ARCHISS en histoire du climat andin de juillet 2004	31
Fig. 6. Des habitats au Cusco montant à de plus hautes altitudes (de 200 à 300 m) entre l'an 1000 et 1200	41
Fig. 7. Ourson de Cuvier ou peluche vivante à Monteagudo, 47 ville bolivienne proche de la forêt de nuage	47
Fig 8. Timbre-poste en hommage au botaniste et agronome Martín Cárdenas (1899-1973)	51
Fig. 9. Timbre-poste et enveloppe 1 ^{er} jour en hommage à l'archiviste et historien Gunnar Mendoza (1914-1994)	53
Fig. 10. Article en hommage au jésuite et météorologue Ramón Cabré (1922-1997)	57
Fig. 11. Portrait de l'explorateur Luigi Balzan (1865-1893)	59

Introduction

En une phrase, depuis les années de formation jusqu'au projet ARCHISS (Enquête archivistique en histoire du climat) que j'anime depuis 1998 en Amérique Latine, ma vie professionnelle a toujours été tournée vers coopération.

Si je faisais le bilan de près de trente années d'aventures scientifiques, je dirais que j'ai propagé des idées, sachant que nul n'est propriétaire de celles-ci car elles sont garantes de la liberté de pensée. J'ai prôné un autre comportement, voire je l'ai mis en pratique de manière partielle et, cela, bien plus que l'obtention d'avancées scientifiques.

Néanmoins, mon parcours est sinueux peut-être parce que j'aime faire coexister et donc vivre les extrêmes. Je suis curieux de tout avec un solide appétit et la recherche reste un îlot de libertés dont j'ai essayé de profiter.

Le parcours est sinueux - c'est facile mais irrésistible - un peu comme le cours des rivières, les objets sur lesquels j'ai commencé à travailler en hydrologie ou plutôt en potamologie de 1976 à 1979. La destruction des méandres par l'homme dans la Plaine du Pô y a entraîné la disparition des grands lits majeurs et donc des plaines d'inondation qui étaient pourtant utiles. La leçon que j'en ai tirée : pas trop d'ingénierie et pas trop d'interférence humaine mais laisser sa place à la nature, toute sa place.

Aussi, il est sinueux, de façon plus modeste, parce qu'il faut bien vivre avec les autres et se plier aux demandes de ses différents employeurs et aux attentes des partenaires du Sud qui m'ont accueillis mais sans perdre son nord, son chemin.

Sinueux, ce parcours car il y eut bien de tâtonnements même si ce document cherche à montrer la cohérence de ma démarche. Je suivrai dans ce travail le fil de ma bibliographie qui est celui de la vie de tout scientifique. J'essaierai toutefois de montrer toujours que j'ai évolué sur les côtés d'un triangle liant la science hydrologique et hydraulique, l'écologie et l'histoire. Le meilleur fut quand je parvins à faire dialoguer ces différences sciences, pour l'essentiel à l'aide de la collaboration de Collègues étrangers dans un esprit de coopération.

A. Les années de formation et de réflexion (1976-1990)

L'hydrologie, le terrain autour du monde et l'histoire ont scandé ma vie professionnelle menée tambour battant ces années-là.

A. 1. Les années de formation (1976-1985)

A. 1. 1. L'hydrologie historique (1976-1979)

Ma thèse de 3^e cycle avait eu pour cadre temporel les XIX^e et XX^e s. jusqu'à 1980 mais la période étudiée va de la crue de 1839 à celle de 1977 dans les Alpes piémontaises et la haute Plaine du Pô (Gioda, 1981). C'est une thèse où l'influence de Maurice Pardé (1893-1973), le grand hydrologue et géographe grenoblois, est prégnante. Notamment, la crue de juin 1957 avait été déjà étudiée, du côté français, dans la vallée de l'Ubaye et du Guil par Jean Tricart et Maurice Pardé.

La montagne y était déjà présente car les Alpes du Sud, dont ma famille est issue, dominant, comme un balcon, la Plaine du Pô. Ce thème montagnard se retrouvera souvent dans mon travail avant d'en devenir le cadre essentiel : hydrologie en Nouvelle Calédonie dans la Chaîne Centrale (1980-81) ; recherches autour du brouillard (1990-97) aux Canaries et de la rosée dans la Chaîne Taurique en Crimée (1993-97) ; et histoire du climat dans les Andes depuis 1995.

Le travail de thèse permet de me familiariser avec le monde de l'hydrologie entendu comme les jaugeages, la granulométrie des alluvions, la sismique réfraction, le suivi des crues et l'interprétation de leurs laisses par la photographie aérienne. Ainsi, j'ai participé, quelques heures après les débits de pointe, aux travaux autour des conséquences de la crue alpestre de mai 1977 dans le bassin du Pellice, étymologiquement la rivière qui pèle [ses rives et versants] (Gioda, 1978).

Postérieurement, l'étude de l'eau et de la dynamique torrentielle me permit de mettre le pied à l'étrier dans un domaine du travail plus intellectuel. La recherche archivistique, dès cette époque, y jouait une grande place avec le dépouillement, depuis le début du XIX^e s., des documents du Ministère des Travaux Publics italien (antérieurement piémontais et plus anciennement encore français, lors des conquêtes napoléoniennes) (Gioda, 1986, *article 1 joint*).

Déjà, c'était un travail en coopération fait à l'étranger grâce à deux années de bourses d'étude du Ministère italien des Affaires Etrangères auprès de l'Institut de Géologie de l'Université de Turin suivi d'un un contrat de dix mois

avec le CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*), le CNRS italien. Le cadre physique en fut l'Institut du CNR de Turin, spécialisé dans l'étude des crues et de la dynamique paroxystique des versants (IRPI ou *Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica*).

Ce fut une bonne formation au plan académique demandant des facultés d'adaptation qui permit mon grand saut de l'Italie vers l'outre-mer où je fis, les premières années, essentiellement du terrain, sans lequel le savoir-faire technique risquait d'être négligé et les idées non confrontées à la réalité. Commença donc un véritable compagnonnage avec un tour du monde comparable à l'ancien tour de France des artisans des corporations.

A. 1. 2. L'hydrologie de terrain autour du monde (1980-1985)

Au titre de service militaire civil comme Volontaire à l'Aide Technique (VAT), je fus hydrologue de terrain auprès du Service Hydrologique de l'ORSTOM à Nouméa (Nouvelle-Calédonie) de 1980 à 1981. Je fis surtout les jaugeages et les mesures des pluies, y compris en conditions cycloniques, de l'avant-projet du barrage hydro-électrique de la Néaoua dans la Chaîne Centrale de la Grande Ile. Ce barrage construit dans les années 1980 est le second de la Nouvelle-Calédonie après celui de Yaté. J'ai aussi travaillé à l'annuaire hydrologique de l'île de Tahiti (Anonyme, 1981).

Grâce à cet apprentissage, je fus recruté comme élève à l'ORSTOM. Ce fut une période qui s'acheva en 1983 pendant laquelle j'étudiai, d'abord, à Paris et en région parisienne au Centre ORSTOM de Bondy et à l'ancien Centre National de Recherches de la Météorologie Nationale (CNRM) de Magny-les-Hameaux en vallée de Chevreuse (Gioda, 1982), puis en Côte-d'Ivoire, pays où je fut affecté en 1982 (Gioda, 1983). Mes travaux ivoiriens jusqu'en 1985 couvrirent tout le territoire national : la savane du nord avec la simulation de pluies par infiltrométrie dans la région de Korhogo et de Ferkésegoudou (Albergel & Gioda, 1986, *article 2 joint*) ; la zone forestière avec le traçage à la rhodamine B de la Sassandra (Le Barbé et *al.*, 1987) ; et la ville d'Abidjan avec quatre campagnes de jaugeages dans le réseau pluvial à ciel ouvert c'est-à-dire l'hydrologie urbaine du quartier de Yopougon (Casenave et *al.*, 1983 & 1984 ; Chevalier et *al.*, 1983 & 1984).

Mes travaux intensifs de terrain continuèrent en 1986 au Niger où deux campagnes de simulation de pluies sur parcelles furent menées dans le Sahel autour de Tahoua aux marges du désert (Gathelier & Gioda, 1986) et en ville à Niamey (Bouvier et *al.*, 1986) à la suite desquelles je tombai gravement malade.

A. 2. Les années de réflexion (1986-1990)

Le travail de reconstruction personnelle me coûta bien trois années, mais, de la réflexion obligée, naquirent des points de vue différents que je vais vous exposer.

A. 2. 1. Les efforts de synthèse et valorisation

Il fallut, d'abord, boucler les travaux débutés en Afrique de l'Ouest et particulièrement ceux de la lutte contre l'onchocercose avec la diffusion des insecticides dans les rivières et leur simulation (Le Barbé & Gioda, 1988 & 1989; Gioda et al., 1989, avec l'article 3 joint). Je coordonnai aussi, avec Frédéric Moniod, la publication des Actes des Journées ORSTOM de 1998 autour de la physico-chimie des eaux (Moniod & Gioda, 1989). Plus largement, les relations compliquées entre eau et santé firent l'objet d'une synthèse avec le concours de Jean Mouchet, le père des études d'entomologie médicale à l'ORSTOM (Gioda, 1992, article 4 joint).

L'absence de longue mission et d'affectation à l'étranger me permit de mettre le pied à l'étrier en muséologie avec le lancement, sous la direction de M. Malassis, du projet d'Agropolis-Museum devenu rapidement une réalité à Montpellier et un point focal pour la communication des résultats obtenus par les différentes universités et instituts de recherche de la ville (Gioda, 1989). Une retombée lointaine de mon ébauche de 1989, un projet proposé mais alors non repris à son compte par l'architecte d'Agropolis-Museum, est peut-être la petite rivière artificielle qui court sur le côté de la Maison des Sciences de l'Eau de l'Université de Montpellier II.

De même, la valorisation du dépôt important de la littérature grise des hydrologues de l'ORSTOM se fit en liaison avec son Responsable, le regretté Eugenio Rabbia (Anonyme, 1989 ; Sicard et al., 1990 a & b , 1991 a, b, c ; Gioda et al., 1992; Gioda & Rabbia, 1992 , Gioda et al., 1993, a , b & c). La documentation du Service Hydrologique de l'ORSTOM est devenue au fil du temps (plus de 50 années) l'une des meilleures bibliothèques thématiques en France. Quand il s'est agi de mettre en valeur l'un des points forts de la future Maison des Sciences de l'Eau, le Chef de Département de l'ORSTOM proposa que la documentation soit très bien mise en valeur y compris visuellement. Il en a découlé une conséquence fort heureuse ; son personnel ne travaille pas en sous-sol, caché comme bien souvent les documentalistes, mais au rez-de-chaussée dans une ambiance lumineuse et à la vue de tous.

Ces actions dans le domaine de l'édition, de la documentation et de la muséologie contribuèrent à me faire évoluer positivement. En effet, plutôt que de courir à 300 km/h tel un jeune cadre dynamique, j'ai pris le temps d'écouter les autres et considéré la science comme partie de la vie, et seulement partie,

ayant constaté *de visu* les échecs de nombreux projets techniques dans le tiers-monde qui ne sont que de simples collages souvent non viables.

Penser et agir autrement me semblèrent indispensables surtout dans l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), le nouveau nom de mon employeur adopté à la fin des années 1990 à la place de celui d'ORSTOM.

Un texte 'L'eau : passé, présent et futur' me servit de bréviaire. La première version avait été écrite pour l'ADEMART, une association nantaise de vulgarisation scientifique animée par un ingénieur de l'INRA (Gioda, 1991). Puis, le Programme Hydrologique International de l'UNESCO le mit en ligne sur la Toile en 1997. Ce texte reste disponible encore de nos jours à l'adresse de son Bureau Régional de Montevideo (Uruguay) pour l'Amérique Latine et les Caraïbes [<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/histeau/tapa.html>], avant d'être repris par deux revues de l'UNESCO (Gioda, 1998 & 1999 a). D'où, il est devenu une sorte de passeport afin d'aborder les problèmes de l'eau par les écologistes. Il fut encore publié en 1999 et 2002, après sa mise à jour, sous le titre de 'L'histoire de l'eau' dans le livre de l'INRA 'Le point sur... L'Eau' (Gioda, 1999 b, *article 5 joint*), finalisant une collaboration avec cet Institut de Recherche entamée dès le début des années 1990 (Gioda et al., 1992, *résumé de l'article 6 joint*).

Par conséquent, cette histoire fut aussi bien accueillie chez les scientifiques. Le travail reprenait la division chère au climatologue anglais Hubert H. Lamb entre passé, présent et futur. Toutefois, pour lui donner plus d'âme, j'avais utilisé dans les dernières versions les images de l'écrivain John Milton du XVII^e s. avec ses textes célèbres 'Paradis perdu' et 'Paradis reconquis' afin de décrire le passage de l'eau, des dieux dans l'histoire, à son actuelle utilisation marchande et pour ouvrir vers un futur plus respectueux de sa qualité et plus économe de son usage.

Toutefois, ce texte ne me permit pas une place au soleil chez les historiens ; ces derniers ne lisent guère les ouvrages scientifiques, à quelques exceptions près dont le pionnier fut Emmanuel Le Roy Ladurie (1983) qui enseigna longuement à cette Université de Montpellier. Si bien que je pris ce dernier comme acteur de référence même si son héritage en histoire du climat était en déserrance en France dans les années 1990 (alors qu'il avait été relayé en Suisse par Christian Pfister et en Belgique par Pierre Alexandre). Toutefois, l'histoire n'est pas l'histoire naturelle ni même celle des sciences.

A. 2. 2. Vers l'histoire

Il me fallut partir de ma base autodidacte afin de mieux planter mon discours et articuler mes idées.

Le Sud tropical et sub-tropical fut longtemps une terre d'avancées de l'homme. Ses richesses dans le monde vivant (flore, faune et cultures) ne furent

dépassées par l'Occident qu'à la Renaissance au XVI^e s., elle-même puissamment alimentée par le sac des deux grands empires tropicaux américains, l'aztèque puis l'inca. Ce n'est qu'après ce siècle que s'effaça l'avance de la Chine et de l'Inde, sans parler de celle du monde arabe, passé au second plan après la bataille de Lépante qu'il perdit à cause des nouvelles galères de Venise (1571).

Auparavant, les hautes terres du monde tropical apparaissaient comme des châteaux-forts, des îles au dessus des jungles chaudes et humides et comme des lieux de grande biodiversité et de sièges de sociétés très sophistiquées (royaumes d'Ethiopie, de Sabah ou Yémen, Tibet, empires aztèque et inca, etc.) à l'abri des grandes maladies tropicales (Gioda, 1994).

Les étroites limites géographiques de ces mondes perchés ne voulait pas signifier l'immobilisme mais bien au contraire, le développement de civilisations raffinées y compris au plan agricole avec la mise au point de nombreux cultivars de pommes de terre, tomates, haricots, cacao, café... qui nous nourrissent encore aujourd'hui (Gioda & Humala-Tasso, 2000).

A. 2. 2. 1. Une approche humaniste

Dans mon esprit, une approche humaniste se mit en place avec l'homme au centre de la réflexion scientifique.

L'humanisme fut d'abord une activité, un métier. Dès le XIII^e s., le premier usage d'*umanista* désigne le professeur de langues anciennes avec une connotation péjorative (le pédant, le grammairien) qui n'a rien de surprenante à une époque où les deux modèles de perfection humaine étaient le saint et le héros militaire. Qu'avait-on besoin d'un obscur intellectuel passant son existence à traduire et commenter de vieux textes surannés et oubliés de tous ?

Aujourd'hui, le saint est remplacé par l'homme politique ou le chargé de communication et le guerrier par l'ingénieur si bien que, pour beaucoup, le problème est resté inchangé : a-t-on besoin d'un obscur intellectuel ? C'est pourtant ce que je fais avec presque rien, des grimoires poussiéreux, une recherche dans l'ombre et donc du savoir au sens de ce qui est caché. Ce ressourcement de la pensée à partir des textes anciens (scientifiques dans mon cas) remontant jusqu'à ceux de l'Antiquité engendra un état d'esprit, un changement de perspective dans la perception que l'homme avait de lui-même et du monde dans lequel il vivait. C'est la grande définition de l'humanisme. La plus profonde et la plus durable. 'On ne peut rien voir de plus admirable dans le monde que l'homme' écrivait Pic de la Mirandole en 1486. L'esprit humaniste est donc le grand introducteur de cette conception moderne de l'humanité : l'homme digne de ce nom est celui qui a pour essence la culture. Plus qu'une philosophie, l'humanisme est donc un vaste mouvement qui fédère par delà les

disciplines, les pays et les moeurs tous les esprits animés par une quête de l'homme idéal et par une confiance dans le progrès de l'humanité.

Il est à noter un travers de l'humanisme. Mettant l'homme au centre, il bascule facilement vers l'individualisme et un esprit ségrégationniste en séparant ceux qui savent des autres. Je ne suis pas sûr d'y avoir toujours échappé...

Aujourd'hui, après bien des cheminements, la science se présente trop souvent comme un simple calcul opérationnel à partir d'observations ou de données recueillies de façon systématique (Lecourt, 2003). La pensée scientifique comme aventure intellectuelle, avec ses tâtonnements, ses doutes, ses demi-tours, ses succès et ses erreurs monumentales, est oubliée ou a tourné court. Le plus triste reste que l'enseignement des sciences en devient dogmatique et qu'il détourne les étudiants. Ne souffle plus le vent de la quête de l'homme idéal. Dominique Lecourt (2003) écrit encore : 'Nous avons abandonné la tradition de l'union des sciences et des humanités pour un apprentissage technique qui a montré ses limites'.

A. 2. 2. 2. Une approche s'inspirant des Anciens

Après ses hauteurs, je retourne en humaniste aux textes anciens et qu'y a-t-il plus essentiel pour un historien que ceux d'Hérodote (484/482-425 av. J.-C.), le fondateur de la discipline ?

J'ai utilisé ses textes au sujet des Scythes pour l'histoire des puits de rosée (Gioda & Acosta, 1991 ; Beysens et al., 1996 ; Nikolayev et al., 1996). Dans son sillage, je basculai autour de l'année 1991 car Hérodote c'est l'histoire au sens littéral grec 'd'enquête, recherche et exploration'. Aussi, je me plaçais dans ce filon de travail avec toutefois beaucoup de modestie car c'est un domaine presque infini que le passé et sa visite, selon ses différentes lectures au fil des siècles.

Il faut noter qu'Hérodote n'eut pas que des admirateurs notamment dans l'Antiquité et que son oeuvre n'a été réhabilitée qu'à partir de la Renaissance.

Le propos d'Hérodote reste actuel : '.... Afin que le temps n'abolisse pas le souvenir des hommes...'. Son idée : raconter la geste des hommes pour qu'elle ne soit pas oubliée. Pour moi, elle passa par la réhabilitation de la biographie en histoire, celle que Dosse (2005) appelle 'la levée d'écrou' du genre dans le monde universitaire, après les longues décennies de l'hégémonie de l'histoire économique débutant dans les années 1940 avec l'Ecole des Annales.

Depuis les années 1980 avec l'avènement de la micro-histoire, ce fut la redécouverte de la vie des humbles, des obscurs, des gens sans histoires, au sens qu'ils ne firent pas l'Histoire avec un grand H comme César ou Napoléon et dont le monde universitaire français était dégoûté après la boulimie du genre au XIX^e s. La vie des scientifiques se rattache indubitablement à ce courant de la micro-histoire car, particulièrement sous les tropiques, ils n'eurent jamais un rôle très visible dans l'évolution des sociétés bien qu'on puisse espérer qu'il fût moteur.

B. Les années de concrétisation (1991-2005)

Les archives historiques et les voyages de travail seront les fils d'Ariane de cette partie. Si le voyage correspond à un besoin vital, celui du mouvement, il peut apparaître, surtout de nos jours où il est devenu aisé, quelquefois vain lorsque recherche de l'inconnu et écoute de l'autre apparaissent secondaires.

La quête des vieilles histoires dans les archives historiques et le calme de leurs salles de travail sont les contrepoints des découvertes faites lors des missions et de l'agitation des voyages. Du calme de l'étude, naît la réflexion nécessaire à toute enquête.

Je pus formaliser par des missions ciblées, loin de France, des actions qui semblaient au début marquées par l'éclectisme voire la dispersion. En effet, j'avais appris à écouter car toute recherche ne peut s'alimenter que de celles des autres. Toutefois, j'ai préféré les voix des ingénieurs et chercheurs du Sud, car plus en phase avec les intérêts et problèmes locaux des pays où j'étais appelé à travailler, plutôt que le choix des thèmes élaborés par des Collègues du Nord.

B. 1. Le moyen : la coopération au Sud avec ses scientifiques

Deux écueils sont évités par ce type de coopération :

- l'échec de nombreux grands projets de développement ;
- l'émigration définitive des chercheurs des pays pauvres.

La petitesse des ressources des laboratoires et des institutions du Sud est certes un gros handicap mais, à l'inverse, elle évite toute mégalomanie qui caractérise les grands projets de développement dans le domaine agricole, piscicole et industriel, appelés de façon péjorative et humoristique à la fois 'les éléphants blancs'.

Le départ définitif de leur pays des scientifiques et ingénieurs du Sud correspond à une lourde perte sachant les faibles ressources économiques de ces nations. Tout développement autonome, c'est-à-dire fait par ou avec des locaux qui connaissent le terrain et ses gens, devient impossible. D'où, une dérive qui peut aller jusqu'au premier écueil à éviter : l'échec des grands projets de développement correspondant uniquement à des besoins exprimés par une agence internationale ou nationale ou bien encore une organisation non gouvernementale pilotées par l'argent venu du Nord. Le neuf, ici le projet importé, y apparaît quelquefois comme le plus mal conçu car le moins réfléchi.

Il est impossible de faire correctement de l'histoire sans l'aide et l'apport d'historiens et archivistes locaux, ce qui me met systématiquement en position d'étudiant dans des pays où traditionnellement un étranger, bien formé et envoyé par un pays développé pour y travailler, est considéré comme un expert

quasi omniscient dont les autorités des gouvernements en place font mine d'espérer beaucoup pour résoudre leurs problèmes de développement.

Ne sont amenés dans mes bagages que de l'empathie, un peu d'argent, quelques nouvelles technologies robustes et une boîte à idées. S'y ajoute la possibilité de faire le lien par des voyages fréquents entre des chercheurs aux thématiques proches mais éloignés dans l'espace et ayant des possibilités économiques limitées. D'où, une vie comparable aux *missi dominici* et peut-être une recherche universitaire conçue comme ouverture au monde. Moins pompeusement, ce tour du monde et ses multiples étapes apparaissent tel un compagnonnage formateur avec l'utilisation obligée de plusieurs langues dans la Babel mondiale (travaux publiés en français, espagnol, anglais, italien et parfois en russe et portugais).

Ensuite, par un effort de communication, il y a la volonté de donner une valeur ajoutée aux techniques, produits et personnalités du Sud, dans des pays où la propriété intellectuelle, tels les droits d'auteur ou les brevets, est généralement bafouée. Accessoirement, cela permet de briser le lieu commun suivant : les archives sont synonymes d'obscurité, poussière et mort.

Un aspect pédagogique est sous-jacent : la volonté d'éclairer la jeunesse du Sud car l'absence d'un bon enseignement de base tend à y occulter les œuvres de ses scientifiques, intellectuels et techniciens. Il y est bien plus aisé d'importer un livre à succès, édité aux Etats-Unis ou en Europe, que de reprendre le fil de la pensée d'un intellectuel du Sud qui a publié selon le bon vouloir d'éditeurs de revues confidentielles et éphémères, un peu comme un feuilletoniste du XIX^e s.

B. 1. 1. La coopération spontanée avec les scientifiques du Sud

J'avais connu l'existence en 1985 d'un agro-météorologue uruguayen, Andrés Acosta Baladón, de façon fugace à Niamey dans le Sahel, alors qu'il travaillait pour l'OMM au Tchad. Dans ce dernier pays, il était en charge de la remise en route du service national hydrologique, suite à la guerre civile qui l'avait déchiré.

Une fois à la retraite en 1990 à l'âge de 60 ans, Acosta me visita à Montpellier. L'objectif de la venue d'Acosta chez les hydrologues de l'ORSTOM était d'y trouver une aide pour valoriser ses travaux et les connaissances acquises au fil de sa carrière, depuis les années 1960 dans les zones arides : Atacama chilien, Iles Canaries, archipel du Cap-Vert et Sahel.

Notre collaboration autour d'un projet de développement a commencé aux îles Canaries soit l'archipel qui permet de faire le saut entre l'Europe et l'Amérique au temps de Colomb. Ces îles sont accessibles à un faible coût, tout étant sub-tropicales car situées dans la zone biogéographique de la Macaronésie.

Andrés Acosta y avait travaillé, au début des années 1970 dans le cadre du Service Météorologique espagnol, surtout à Lanzarote et à Tenerife où il s'était intéressé aux pratiques traditionnelles en agronomie très économes vis-à-vis des faibles ressources en eau locales. J'ai donc repris la direction de Tenerife quelque 20 années après. A la fin d'un voyage en 1991 sur l'archipel, il me vint à l'idée de pousser jusqu'à la dernière île soit la plus éloignée des côtes africaines, El Hierro ; elle était connue dans l'histoire comme le lieu où se trouvait l'arbre fontaine jusqu'en 1610, capteur des eaux du brouillard et vénéré par les Guanches, le peuple berbère balayé par les premiers conquistadors. Une histoire qui pouvait toucher au mythe c'est-à-dire une histoire fabuleuse qui mettait en scène les dieux des populations pré-hispaniques des Canaries et qui apportait une explication aux mystères du monde.

Ma surprise fut grande quand, sur le site de l'arbre fontaine disparu depuis près de quatre siècles, dans un vallon isolé de la montagne, j'en retrouvai un nouveau en pleine croissance et qui captait l'eau du brouillard, très dense ce jour-là. J'appris qui l'avait planté à nouveau dans les années 1940 : le technicien des Eaux et Forêts, Zósimo Hernández Martín dit Don Zósimo. Je le visitai et, au fil des années, je devins l'ami de *'L'homme qui plantait des arbres fontaines'*, en adaptant le titre et le contenu de la nouvelle de Jean Giono.

Par la suite, nous avons écrit ensemble, entre 1991 et 1997, Andrés Acosta, Don Zósimo, d'autres Collègues canariens et chiliens et moi-même, une série d'articles sur la captation des eaux de brouillard, à partir d'expériences isolées et faites avec très peu de moyens qui remontaient en général aux années 1940. Ces travaux montrent la possibilité pour des petites populations du tiers-monde, si elles restent structurées, de se procurer de l'eau à bon compte sans investissements coûteux venus du Nord. Aucun brevet n'est à acheter et l'expertise locale est suffisante. Le capteur est bon marché à 0,5 euro/m² pour la maille Rachel c'est-à-dire un tissage lâche, proche de celui du sac à pommes de terre, de fils de polypropylène ou de polyéthylène traités anti-UV (Fig. 1). Toutefois, l'essentiel pour obtenir un approvisionnement en eau régulier reste la préservation des attrape-brouillard du vandalisme ; les filets doivent être protégés parce que considérés comme bénéfiques par les populations locales. Ensuite, ils sont aussi fragiles au vent et leur bon état doit être contrôlé.

Toujours à partir d'anciennes publications signalées par Acosta, je retournai, dès la fin de 1990, sur les sites d'anciennes expériences de captation de la rosée où des bâtiments, appelés condenseurs, furent construits au début du XX^e s. Dans un cas, mon déplacement fut vain car le condenseur de l'ancienne station agronomique Bel-Air de Montpellier avait été détruit dans les années 1960. Dans un autre, je retrouvai le bâtiment abandonné mais en bon état à Trans-en-Provence (Var). Enfin, je sus que le prototype se trouvait en Crimée à Théodosia où il avait été construit dans les années 1910 par un ingénieur russe, Ziebold. Toutefois, le pays était éloigné, restait mystérieux (car tout nouveau, au sens d'indépendant seulement en 1991) et je ne parle pas le russe.

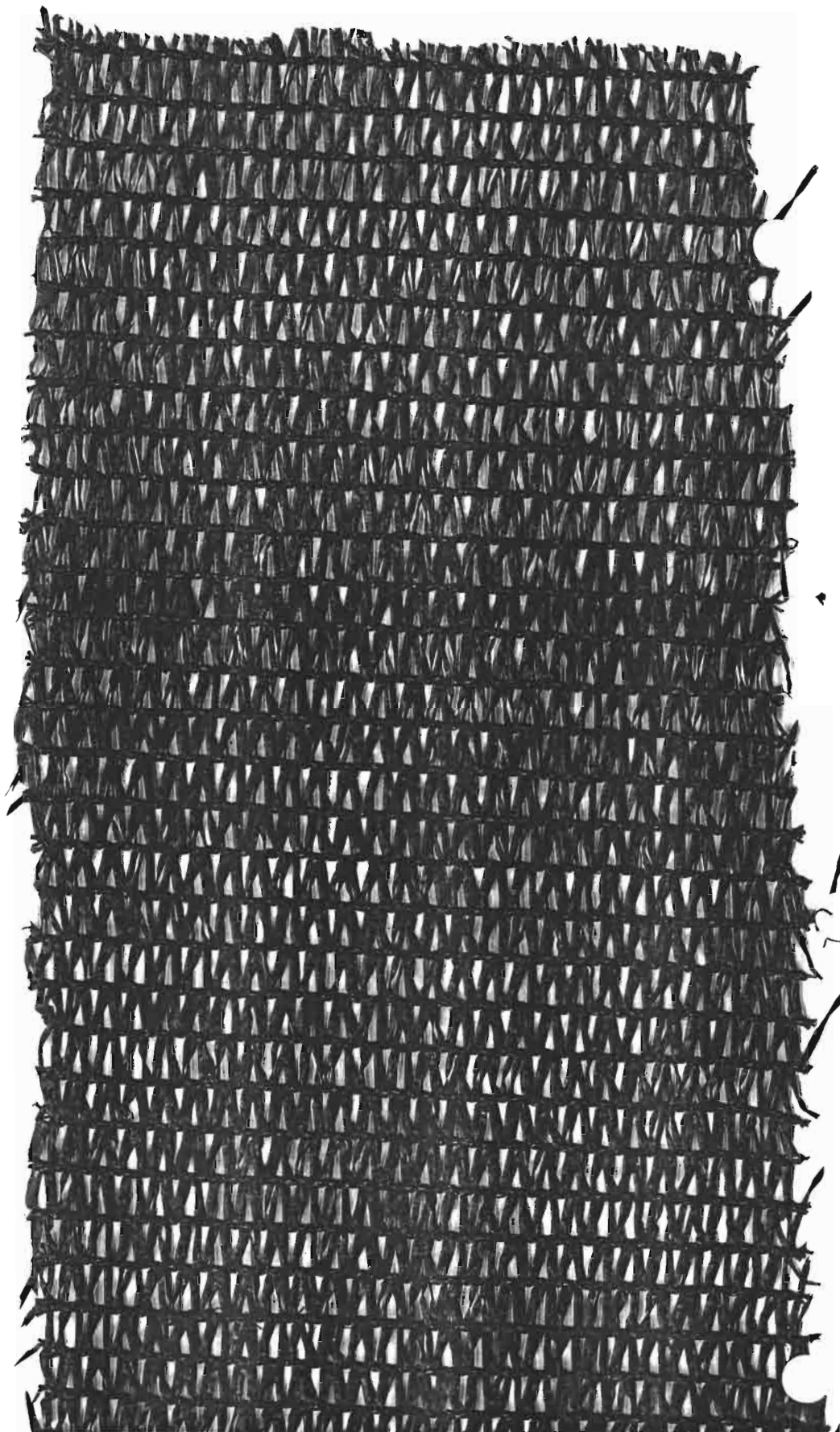


Fig. 1. Echantillon de filet attrape-brouillard.

Utilisé au Pérou, le filet est en polyéthylène traité anti-UV. Son coût est inférieur à 0,5 euro\$/m² (Bouillon S.A., Caudry, Nord, www.bouillon-sa.fr).

D'où, l'idée de contacter un physicien du CEA, spécialiste de la buée, qui avait déjà travaillé en Ukraine, Daniel Beysens. Emballé par l'idée de mêler physique, histoire et écologie, il prit totalement en charge le projet alors que je montai une longue expatriation en Amérique du Sud. L'équipe comporta plusieurs Ukrainiens de Kiev et de Lviv et aussi un archéologue français confirmé du CNRS, Jean-Paul Morel, spécialiste des civilisations antiques de Mer Noire. A la suite des missions des étés 1993, 1994 et 1997, les résultats et la valorisation furent satisfaisants : article scientifique dans *Journal of Hydrology*, de vulgarisation dans *La Recherche* et film achevé en 1999.

Toutefois, on tomba hélas dans un travers commun de la coopération : l'émigration définitive de trois jeunes scientifiques ukrainiens de notre équipe attirés par les conditions de vie matérielles supérieures de l'Occident.

B. 1. 2. La coopération structurée avec les scientifiques du Sud

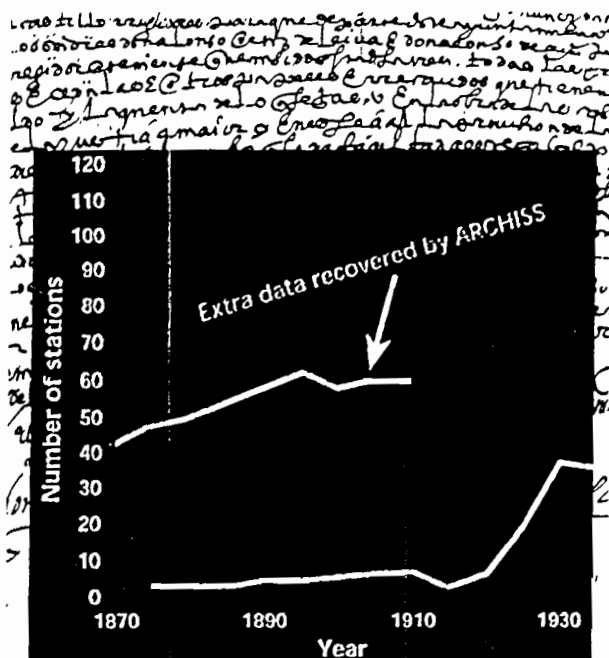
Actuellement, j'anime le projet ARCHISS (Enquête archivistique en histoire du climat) en Amérique Latine et Caraïbes qui est l'aboutissement provisoire de ma démarche de coopération avec le Sud.

Le projet ARCHISS fut lancé en 1988 par le Conseil International des Unions Scientifiques (ICSU, son sigle en anglais), le Conseil International des Archives (ICA en anglais), l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme Hydrologique International de l'UNESCO. C'était la première fois qu'une collaboration systématique était encouragée entre archivistes, historiens, climatologues et hydrologues. Son but était et reste l'étude des climats passés par l'analyse systématique des documents écrits. Les sources consultées vont, à partir des plus proches dans le temps, des anciennes données météorologiques (depuis le XVIII^e s.) jusqu'aux données qualitatives dispersées dans les archives, bibliothèques, cartothèques, etc. Le projet ARCHISS se propose aussi d'examiner les conséquences socio-économiques des anomalies climatiques et, enfin, de reconstruire des longues séries météorologiques en utilisant au mieux des sources documentaires au sujet du climat qui sont souvent hétérogènes et incomplètes (Fig. 2). L'encodage de l'incertitude des données bénéficie de l'apport de l'analyse par la logique floue (en anglais *fuzzy logic*).

Je repris le projet ARCHISS en 1998 à la suite d'une étude dans laquelle la trop grande hétérogénéité de l'échantillon des précipitations et des sécheresses mexicaines avait débouché sur un échec relatif. Par conséquent, l'étude des sources et de la qualité de l'information devint un préalable et progressivement je me transformai, bien obligé, d'hydrologue en archiviste... A l'époque, j'étais déjà en Bolivie en train d'y lancer les recherches en histoire du climat, dans le cadre de l'Unité de Recherche en glaciologie de l'ORSTOM.

ARCHISS

Archival Climate History Survey



Sponsoring Organizations

International Council on Archives (ICA)

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Unesco)

World Meteorological Organization (WMO)

1999

Archival Climate History Survey

As our understanding improves of how climate has changed or varied in the past, our ability to predict the changes that will take place in the future will be enhanced. We are usually frustrated however by the lack of long series of reliable observations of the past climate because there are only a few meteorological and hydrological stations that have been in continuous operation for more than a hundred years and there are only a few stations with instrumental observations made before the latter part of the last century. To try to assess the weather conditions and climate variations and changes before then, we have to analyse historical documents, diaries, chronicles and such. To extend these series of observations and to try to fill gaps, a search of the National and Regional Archives was launched in 1988 by the International Council on Archives (ICA), the International Council for Science (ICSU), the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) and the World Meteorological Organization (WMO). This is the first time such a systematic collaboration has been arranged between archivists and climatologists.

Another technique that is being developed to increase the reliability of projections and predictions of future climates is to identify important large-scale climate anomalies, such as the El Niño/Southern Oscillation and, using historical data about previous occurrences of similar phenomenon, to project the expected evolution of similar anomalies. For this technique, we also need to extend further backwards in time our knowledge of past climate changes and variations. The current situation is complicated by the possible effects of human activities such as the increasing concentrations of greenhouse gases from agriculture, domestic fuel use, industry, transport, etc. These increases have become of major concern because it seems

possible that they may already have begun a process that will lead to climate changes such as an increase in the average global temperature, and to possible increases in the number of extreme events, such as floods, hurricanes, storms, droughts, etc.

European Pilot Project

ARCHISS began with a successful pilot project carried out with the help of the archival communities in five European countries (France, Germany, Italy, Spain, U.K.). The results were submitted to the evaluation by an international group of scientists which stated that the "project is very useful for completing the climate record. It is clear that the project should be expanded and become operational". This advice was taken and the Steering Committee for ARCHISS began a study of those climatologically significant regions of the world where additional instrumental data would be important to help resolve enigmas and aid climate modellers.

Recent Successful Activities

After further consultations with climatologists concerning the best regions into which to develop the survey, it was agreed to avoid the data-rich regions, such as most of Europe, China and parts of North America and, in the first instance, to concentrate on Latin America and the Caribbean. Preliminary studies were carried out in late 1994 and early 1995 in Mexico, Cuba and Colombia. The positive results of these led to two six-month searches in the National Archives in Mexico City and Havana. The results were submitted to ICA, UNESCO and WMO and then to scientific evaluation. This evaluation stressed the success of the searches and in particular the fact that for Mexico "very significant amounts of data were brought to light, including a long-term set that provides daily data

from the late 1700s" and for Cuba "a century long time series at the Real Colegio de Belen and at the Observatorio of the Real Colegio on the outskirts of Havana" and "a five-century continuous record of the occurrence of cyclones"

Digitization

The data from Mexico and from Cuba have been digitized in each National Archive to avoid, insofar as possible, damage to fragile documents. The digitized data were then submitted to quality control and transmitted to the Global Historical Climatology Network (GHCN) database, where they are available for use by the international scientific community. From the inception of the project, it was decided that a copy of each set of digitized data obtained during the ARCHISS project would be made available to the appropriate national Meteorological and Hydrological Services

Current Activities

The National Archives of Chile, Ecuador and Peru have been contacted recently in order to carry out preliminary surveys for the period of 1880 to 1940. (This has been chosen because there were at least eight very severe or severe El Niño events during the period.) These surveys will provide information about measured serial data not currently available to climatologists and will be followed by more comprehensive searches and then digitization of the data discovered. In order to make the preliminary searches as effective as possible, a representative of the Mexican National Archives, who was deeply involved in the Mexico searches, will visit each of the countries to provide practical advice on methodology, the types of archives most likely to yield useful information and on the techniques of data recording and digitization. Arrangements are also being made for a

representative of each national Meteorological and Hydrological Service to be involved.

In addition, contacts have been made with climatologists in Argentina, Bolivia and Colombia to examine the possibilities of extending the preliminary searches still further.

Finance

Up to the present, most of the funding has come from WMO and UNESCO with the national Meteorological and Hydrological Services of Canada and the USA providing funds for the archival search in the Caribbean and Latin America. The sponsoring organizations have provided secretarial and other support for meetings and for experts.

Future Activities

Future studies will concentrate on selected archives of those data-sparse areas where it is more likely to detect a response to climate system forcing. For example, the Pacific region, to extend backwards in time our knowledge of the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events, parts of Africa; and the circum-Mediterranean region. It is hoped that the studies will be extended to all regions of the globe of potential interest in improving our knowledge of past climatic conditions. ARCHISS will concentrate on recovering instrumental observations but when such data are lacking, proxy data will be collected and their quality controlled.

In such searches, care is taken to cooperate with other appropriate international and national organizations. In this respect, the ARCHISS Steering Committee is in contact with several other involved organizations, such as IGBP-PAGES, CLIVAR, GODAR, etc. in order to eliminate or at least diminish unnecessary duplication of effort.

Searches in the near future will be limited to Latin America and the Caribbean but will be extended to other parts of the world when adequate support is available.

Contacts

ICA: Joan Van Alba, Conseil international des Archives, 60 rue des Francs-Bourgeois, 75003 Paris, France
Tel: 33(0)140276306; Fax 33(0)142722065
e-mail secretariat@ica.cia.org

UNESCO: Alice Aureli, IHP, 1 rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15, France
Tel: 33(0)145683995; Fax 33(0)145685811
e-mail a.aureli@unesco.org

WMO: Peter Scholefield, WCDMP, 7 bis avenue de la Paix, P.O. Box No. 2300, 1211 Geneva 2, Switzerland
Tel: 4122.7308377; Fax 4122.7308042
e-mail: scholefield_p@gateway.wmo.ch

Global Historical Climatology Network: National Climate Data Center, Federal Building, 151 Patton Avenue, Asheville, NC 28801-5001, USA
Tel: 1828.2714800; Fax 1828.2714876
e-mail: orders@ncdc.noaa.gov



International Council on Archives (ICA)



United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)



World Meteorological Organization (WMO)

Je travaillais aux Archives et à la Bibliothèque Nationales à Sucre depuis 1995, ce qui facilita cette métamorphose. J'y étudiais déjà en liaison avec l'historienne argentine María del Rosario Prieto et le spécialiste en métallogénie et historien de la mine Carlos Serrano de Potosi (Gioda & Prieto, 1999, *article 11 joint* ; Gioda & Serrano, 1999, *article 12 joint*).

Le premier contrat ARCHISS-UNESCO de 1998, bénéficia du savoir-faire de l'archiviste bolivienne Ana Forenza et il commença par le dépouillement de l'ensemble des actes municipaux inédits de la municipalité de Potosi (1585-1816), la capitale minière de l'Amérique du Sud née en 1545. La série reconstruite présente une distribution statistique similaire des sécheresses à celle enregistrée par les appareils modernes de météorologie mis en place à partir des années 1940. Toutefois, dans le détail, il faut séparer dans la reconstruction historique, les séries issues des archives (documents primaires) de celles provenant des historiens (documents secondaires) car ces derniers, comme auparavant certains administrateurs des colonies espagnoles, ont tendance à augmenter artificiellement le nombre d'années au climat contrasté et les phénomènes extrêmes, sans doute pour mieux illustrer leur travail (Gioda & L'Hôte, 2002, *article 13 joint*).

Une dizaine de contrats individuels de l'UNESCO pour des Latino-américains, dans le cadre du projet ARCHISS, suivit ces études au sujet de Potosi tandis que le soutien de l'IRD, héritier de l'ancien ORSTOM, restait acquis en histoire du climat. Ce furent les contrats au sujet de la recherche du climat de Lima au XVIII^e s. par Carlos Carcelen (Université San Marcos), des événements climatiques dans les registres paroissiaux des archives de l'archidiocèse de Sucre par Ana Forenza, des débuts de la météorologie équatorienne par Alfredo Terneus (Quito) et bolivienne par Ana Forenza (Sucre), de l'histoire de la mine andine par Carlos Serrano (Potosi)...

Peut-être que des difficultés pour aller plus loin avec des séries toujours plus complexes à analyser comme celle de Potosi, firent ouvrir le champ géographique à l'ensemble de l'Amérique Latine ; selon cette hypothèse, les acquis d'autres régions permettent de dépasser les problèmes rencontrés localement. Le Mexique se révéla une terre particulièrement fertile, montrant toute la qualité de l'apport des archives religieuses à l'histoire du climat sud-américain. La documentation des sanctuaires de Mexico, tel celui de la Vierge de 'Los Remedios', fut dépouillée en y cherchant systématiquement les manifestations liées aux aléas climatiques : neuvaines, processions, rogations... Elle permit la reconstruction des sécheresses régionales depuis 1600, avec une longue série homogène jusqu'aux années 1870 (Garza Merodio, 2002, *article 14 joint*).

Des travaux encadrés furent publiés en Amérique Latine et Europe (Gioda & Serrano, 2000 ; Gioda & Forenza, 2000, *résumé de l'article 15 joint* ; Carlos Carcelen, 2002 ; Garza Merodio, 2002 ; Gioda et al., 2002 ; Terneus & Gioda, 2005, *résumé de l'article 16 joint*).

Il est à noter l'âge, quelquefois avancé, des membres du groupe, mais qui mieux que ces scientifiques et chercheurs peut connaître la mémoire de leurs anciens services et administrations nationaux ?

L'inclusion des travaux d'ARCHISS dans le plus grand projet de l'OMM DARE (en français, Sauvegarde des données météorologiques anciennes), lors de la 13^e session de la Commission de Climatologie tenue à Genève du 21 au 30 novembre 2001, assura la pérennité du groupe de travail pour les années futures vis-à-vis de l'ensemble de la communauté scientifique (Fig. 3).

Enfin, l'organisation de trois séminaires ARCHISS à Sucre (Bolivie) en 1999, Guayaquil (Equateur) en 2003 et Quito en 2004, permit de souder le groupe, de le faire connaître aux responsables des banques de données de l'ensemble des services nationaux de météorologie de l'Amérique du Sud et des Caraïbes et, enfin, d'amplifier les recherches aux Andes du Nord (Fig. 4). Le groupe compte aujourd'hui une bonne dizaine de membres, allant du Mexique à l'Argentine et passant par l'ensemble des cinq pays andins. La publication des actes du séminaire de juillet 2004 qui s'est tenu dans les locaux du Service National de Météorologie et Hydrologie de l'Equateur à Quito est programmée et elle a été mise en route en mars 2005 (Fig. 5).

En conclusion, il faudra souligner l'importance, pour les voix du Sud, des projets des organisations internationales telles l'Unesco, qui parrainent les scientifiques sans qu'il soit par exemple question de l'âge des collaborateurs. Un peu de la sagesse africaine avec la maxime '*Les vieux qui disparaissent sont autant de bibliothèques qui brûlent*' a été prise en compte dans notre projet, comme dans des travaux antérieurs (Goloubinoff et *al.*, 1997 & 2002).

B. 2. La méthode : l'utilisation de ressources négligées

L'exhumation d'histoires oubliées ou la redécouverte des acquis de personnalités négligées permettent de résoudre des problèmes scientifiques avec des techniques proches de l'enquête policière. C'est une démarche un peu différente de celle traditionnellement pratiquée en science car assez éloignée du socle fort d'une seule discipline.

Grâce à des ingénieurs et scientifiques du Sud, j'ai eu connaissance d'anciennes histoires et je suis remonté jusqu'aux revues confidentielles, comme celles dans lesquelles publient les scientifiques du tiers-monde, puis aux archives voire jusqu'à l'archéologie comme en Crimée puis au Cusco.

Géographiquement, ces histoires sont celles de bouts du monde ou de milieux insulaires. L'isolement, même relatif, crée des laboratoires de la nature, obligeant les hommes à utiliser au mieux des ressources limitées (eau en zone aride) ou qui furent négligées ailleurs : brouillard, rosée, etc. Ainsi, souvent mes travaux portent-ils sur les bouts du monde : le Sahel au Niger, la dernière île des

THE ARCHISS CLIMATE HISTORY SURVEY PROJECT (ARCHISS) IN LATIN AMERICA: EXAMPLES OF HOMOGENEOUS DOCUMENTARY DATA SERIES (POTOSI, MEXICO CITY AND LIMA)

Alain Gioda (1), Mike Baker (2), Gustavo Garza (3), Carlos Carcelen (4), Carlos Serrano (5), Ana Forenza (6), Lucien Dufstein (7), Maria Naranjo (8), Maria del Rosario Prieto (9)

(1) IRD, F-34394 Montpellier, (2) ARCHISS, F-26110 Venterol, (3) Geography, UNAM, D.F. Mexico, (4) History, San Marcos University, Lima, Peru, (5) INIHGEO, Potosi, Bolivia, (6) Archivo Nacional, Sucre, Bolivia, (7) ENGRET, F-75015 Paris, (8) University of Colima, Mexico, (9) CRICYT-CONICET, Mendoza, Argentina
E-mail: gioda_trd@yahoo.com

The ARCHISS project was launched in 1988 by the International Council on Archives (ICA), the International Council of Science (ICSU), the World Meteorological Organization (WMO) and the Unesco's International Hydrological Programme. This is the first time such a systematic collaboration has been arranged between archivists, historians, hydrologists and climatologists.

The aim of the project is a long-term study of the climate through the systematic analysis of documentary material. Material in archives is carefully examined for numerical measurements and also: i) to examine socio-economic events related to climatic anomalies; and ii) to reconstruct long-time series based on discontinuous and heterogeneous documentary sources. The lack of homogeneity had impeded the successful use of fuzzy logic to encode the uncertainty of proxy data in an earlier study of history of the Mexican climate.



Tlaloc pottery, the God of rain, Mexico City

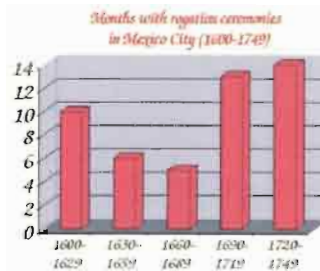


Interior of an ancient silver and tin mill
Ingenio San Marcos, Potosi
(by courtesy of Isabel Ordoñez, 2002)



Baptismal font of the first President of Argentina
in the church of Otuyo (Potosi region)
(by courtesy of Jaime Silvestre)

In the Potosi study, it was decided to reconstruct rainy seasons using Town Hall reports - the so-called "Acuerdos del Cabildo" - (1585-1816). This climatic reconstruction has a similar distribution to the meteorological records of the second half of the 20th century. On the other hand, reconstructions from printed historical chronicles of this famous silver city have generally a different statistical distribution with an higher number of droughts and climatic anomalies which could mean a rather lower quality of the data.



Bibliography
 *Miller 1986 - 113, 116, UNAM, Mexico
 *Carcelen 2001 - Anales del Archivo, 30:502, Sucre 1987-94.
 *Tuchman 1986 - 117 (1), 119:21, Mexico, Potosi
 *García 2000 - Investigaciones Geog., UNAM, México, 44, 2:36-37.
 *Gioda, 1986: 2000 - La Huella Blanca, 4:3-44, 86.
 *Gioda, Prieto 1999 - La Meteorología, 27, 55-62.
 *Prieto, Dufstein, Urbina 1999 - 116:146, 9, 4, 413-41.

In the Mexico City basin, records from "pro pluvia" rogation ceremonies (1600-1870) and particularly those to the Virgin of "Los Remedios" were constantly reported during droughts and provide us with a homogeneous data bank.



Cattle activities map, Mexico City, XVIIIth century



German edition of La Condamine's travel (1735-1745) in Peru and Ecuador

Lastly, in the Lima case study, we rationalize the data bank for the 18th Century made from different sources: "Juzgado Privativo de Aguas de la Ciudad"; "Real Junta de Temporalidades"; "Derecho Indígena" (General Archives of the Nation). The reconstruction of the Lima climate also benefited from two printed sources: the first newspaper "La Gazeta de Lima"; and books edited in the city.

As a result of studies in Latin America, the 13th Session of WMO's Commission on Climatology (Geneva - Switzerland, 21-30 November 2001) proposed that the ARCHISS project be extended to the whole world in the DARE (Data REscue) programme.





Taller de Rescate y Gerencia, Monitoreo, Aplicación y Predicción de Datos Climáticos
Guayaqui, Ecuador - 31 de Marzo al 4 de Abril, 2003



Seminario Regional de Quito - INAMHI “Los Archivos del Clima en el Norte de los Andes”

PROGRAMA

12 DE JULIO

09H00-10H00	Registro de participantes
10H00-10H25	Mensaje de bienvenida a los participantes. Ing. Gustavo García Dávila, Director Ejecutivo del INAMHI, Quito; Jean-Paul Roufast, Agregado Cultural, Embajada de Francia, Quito; Grecia Vasco, Directora Archivo Nacional del Ecuador, Quito; Jon Maiza, Coordinador Proyectos Ambientales y Científicos, UNESCO, Quito.
10H25-10H30	Inauguración del evento. Ing. J.-G. Rosero, Vice-Ministro de Energía y Minas.
10H30-10H45	Introducción al tema a tratarse. El Proyecto ARCHISS (Archival Climate History Survey) en América Latina. Dr. Alain Gioda, IRD-Francia, Montpellier.
1.- Presentación de resultados obtenidos en diferentes subregiones de América Latina	
11H20-11H45	Series de sequías para las ciudades de México y Morelia; situación actual de los estudios paleoclimáticos utilizando roativas en México. Gustavo Garza ,Geografía, UNAM, México.
11H45-12H10	La historia del clima en el Perú. Carlos Carcelén Reluz, Historia, U San Marcos, Lima.
12H10-12H35	Los aportes de los exploradores a la historia del clima andino. Bernard Francou, IRD-Bolivia, La Paz.
14H00-14H25	El Programa Hidrológico Internacional y su alcance en Latino América. Pilar Cornejo, PHL, UNESCO, Guayaquil.
14H25-14H35	Las investigaciones en paleo-ecología en Colombia. Thomas Van der Hammen, Fundación Tropenbos, Bogotá.
14H35-14H45	El programa PAGES-Colombia. Gladys Bernal, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
14H45-15H10	Prácticas y manejo del paisaje asociados a fenómenos climáticos en la sabana de Bogotá-Siglos VIII al XVIII. Inés Cavellier, Instituto Humboldt, Bogotá.
15H10-15H35	El estudio de sedimentos lacustres de la región de Cuzco. Alexander Chepstow- Lusty, Universidades de Cambridge y de Montpellier 2.
15H35-16H00	La interpretación de los antiguos datos meteorológicos de Lima del siglo XVIII. Carlos Carcelén Reluz, Historia, Universidad de San Marcos, Lima.
2.- Riqueza de los depósitos documentales de los países de los Andes del Norte	
16H30-16H55	El archivo nacional del Ecuador y los archivos regionales. Grecia Vasco, Archivo Nacional de Ecuador, Quito.
16H55-17H20	Archivos meteorológicos de Ecuador. Alfredo Terneus, ex INAMHI, Quito.
17H20-17H45	Estado de la información meteorológica en el Ecuador. Gonzalo Ontaneda, INAMHI, Quito.
17H45-18H00	El proyecto DARE (Rescate de datos) de la OMM. José Luis Santos, CIIFEN, Guayaquil.
13 DE JULIO	
09H00-09H25	El potencial en historia del clima de las bibliotecas y archivos colombianos. Germán Torres. U Nacional de Colombia, Bogotá.
09H25-09H50	Los archivos militares en Venezuela. Luis Pérez Escalona, Meteorología de la Aviación, Maracay.
09H50-10H15	Los mapas y planos del Archivo Nacional del Ecuador, referente para el estudio del clima María Teresa Carranco, Archivo Nacional de Ecuador, Quito.
10H30-10H55	Relación entre el clima y la historia de la minería en los Andes. Carlos Serrano Bravo, INHIGEO, Potosí y Universidad Internacional de Andalucía, España.
3.- Organización del trabajo futuro	
11H00-11H30	Las lecciones de los conocimientos técnicos adquiridos desde los años 1980 en historia del clima . Gustavo Garza y Alain Gioda.
11H30-12H00	La examinación de los archivos religiosos y de la meteorología antigua. Gustavo Garza.
14H00-15H00	Edificios de archivos en clima tropical y bajos recursos. Sara González Hernández, Archivo General de la Nación y Presidente ALA, Bogotá (presentación cancelada pero llegó el manual de la Asociación Latinoamericana de Archivos).
15H00-17H00	Mesa redonda sobre las conclusiones del Seminario. Moderadores Ing. Gustavo García Dávila, Grecia Vasco, Alain Gioda y Pilar Cornejo.

Canaries (El Hierro, l'ancien méridien zéro avant la découverte des Amériques), la Crimée, la grande ville la plus haute du monde (Potosi), l'orient bolivien, la région du désert d'Atacama chilien...

Deux grands chantiers ont été ouverts depuis 1990 : les précipitations occultes ; et, ensuite, l'histoire du climat andin.

B. 2. 1. Les précipitations occultes

B. 2. 1. 1. Le brouillard

Des rendements élevés sont atteints avec plusieurs litres journaliers par mètre carré de filet attrape-brouillard et des hauteurs annuelles de l'ordre de 4 m de précipitations (brouillard et pluie) ont été enregistrées à la Serra Malagueta des îles du Cap-Vert. Il existe de nombreux déserts côtiers où cette ressource est abondante et régulièrement distribuée dans le temps car il y a des saisons à brouillard. Elle est traditionnellement exploitée par les paysans des îles et autres localités isolées (Gioda *et al.*, 1992, *article 7 joint*).

Néanmoins, pourquoi cette ressource reste négligée par beaucoup ? Parce qu'elle n'est pas prise en compte par les services nationaux de météorologie et hydrologie et autres services régionaux et municipaux. Depuis la fin des années 1990, une ONG canadienne (Fogquest) a essayé de faire une OPA sur les services autour des filets attrape-brouillard. Toutefois, dans le tiers-monde, ONG ne signifie pas toujours le maximum d'efficacité et souvent la bonne volonté manifeste de leurs techniciens de terrain ne peut masquer des lacunes de formation professionnelle et une mauvaise intégration dans le tissu local, régional et national. Il en résulte l'abandon rapide des filets attrape-brouillard qui, s'ils sont bon marché, n'en nécessitent pas moins un entretien suivi, car fragiles, et surtout le respect par les populations de l'intégrité du site de collecte.

Les actions pour promouvoir ces recherches depuis 1997, soit après mes principales publications, furent les suivantes :

- maintien des contacts avec le fabricant français des filets Bouillon S.A (Caudry, Nord) qui utilise une technologie bon marché pour la fabrication des attrape-brouillard la maille Rachel, inventée au XIX^e s. www.bouillon-sa.fr ;
- visites régulières sur le terrain des techniciens et personnalités des services de l'environnement, de la météorologie et de l'hydrologie dans les zones où les paysans, éleveurs, forestiers et villageois sont intéressés par planter des espèces utilisant au mieux cette ressource comme au Canaries, aux îles du Cap-Vert et dans la II^e région du Chili (Antofagasta et Paposo au Chili www.precipitacionesocultas.com ;
- encadrement des étudiants en 2003 pour le concours général de Grandes Ecoles dans des TIPE. (Travaux d'Intérêt Personnel Encadré) dans les serres municipales de Rouen lors de leurs expériences de simulation du

brouillard sur différents feuillages et maillages de filet (Jameau et *al.* 2003) ;

- soutien de l'association des étudiants de l'ENSAR (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes maintenant Agro-Rennes) dans leur projet de soutien hydraulique au paysannat des îles du Cap-Vert <http://capsurleau.free.fr> ;

- réponse rapide aux sollicitations des médias afin de maintenir vivante en France l'idée de l'utilisation de cette ressource, sachant que les bonnes idées ne meurent jamais mais que les imposer peut coûter des décennies (journaux et publications pour adolescents);

- collaboration en terminologie pour le glossaire international d'hydrologie au travers du Comité National Français du Programme Hydrologique International de l'Unesco et du Programme d'Hydrologie Opérationnelle de l'OMM (Hubert et *coll.*, 2000).

B. 2. 1. 2. La rosée

C'est une ressource en eau faible dans l'absolu, car un litre d'air ne pèse avec la vapeur d'eau que 1,25 g mais intéressante par son abondance dans l'atmosphère. Souvent confondue avec le brouillard sous le vocable de précipitations occultes, elle en est physiquement différente puisque la précipitation résulte d'un changement de phases (gazeuse à liquide) exactement comme la buée. A l'inverse, le brouillard est de la matière condensée soit une précipitation formée de milliers de gouttelettes trop légères pour précipiter telle la pluie de façon verticale.

Ma tâche a été la redécouverte des grands condenseurs abandonnés depuis les années 1940 par les scientifiques et de susciter de l'intérêt dans les années 1990 pour les préserver (Gioda & Acosta, 1991, *article 8 joint*). Ceci a commencé par une relecture critique des anciens textes scientifiques ayant assis physiquement leur intérêt et permis leur construction. L'objectif fut la relance les études de la rosée comme ressource alternative en eau même si aujourd'hui les condenseurs légers, comme les feuilles (naturelles ou en plastique) ont supplanté par leur meilleur rendement les condenseurs massifs c'est-à-dire les grandes constructions de pierriers du début du XX^e s. (Beysens *et al.*, 1996 ; Nikolayev *et al.*, 1996, *article 9 joint*).

B. 2. 1. 3. Les forêts de nuages

De grandes surfaces sont couvertes encore par les forêts de nuages subtropicales et tropicales, formations climaciques primaires et secondaires correspondant à la zone où les stratus du brouillard sont en contact quasi permanent avec les versants montagneux. La grande quantité d'épiphytes et de lichens qui peignent le brouillard est leur signature. Leur cartographie a été dressée au niveau

mondial en liaison avec l'UICN (Union pour la Nature) et le World Conservation Monitoring Centre de Cambridge (Doumenge *et al.*, 1995, *article 10 joint*).

On décrit deux grands types de forêts de nuages mais il y a toute une gamme de graduation entre eux.

a) La plus précieuse, car la plus rare, est la forêt de nuages des oasis du brouillard des déserts côtiers. A l'origine, elle croissait sur certaines collines, volcans et chaînons côtiers du continent sud-américain bordant l'Océan Pacifique, en Californie, sur les contreforts de la Mer Rouge, les Canaries, les îles les plus humides du Cap-Vert... Elle a presque disparu de ces régions où le bois est rare depuis toujours. Le gros problème est la difficulté de sa restauration. La croissance des arbres de la forêt de nuage est très lente car le brouillard, la principale source d'eau atmosphérique, n'y est que saisonnier et le climat aride prévaut le reste de l'année.

b) Les autres forêts de nuages sont hyper-humides. Situées à bien plus hautes altitudes au cœur des continents pour les plus grandes, elles couvrent les versants atlantiques du Mexique et de l'Amérique centrale, les contreforts amazoniens du Rio de la Plata et de la Cordillère des Andes, les hauts massifs gréseux du Venezuela, les volcans de l'Afrique orientale, certains versants de l'Himalaya, de Chine du Sud, d'Indonésie et Indochine et enfin de Nouvelle-Guinée et des îles hautes de Mélanésie et Polynésie. Elles apparaissent bien mieux conservées que celles des zones arides mais la faim de terres, liées à la pauvreté des pays du tiers-monde, les met déjà en danger spécialement en Afrique Centrale (Congo, Rwanda et Burundi) très densément peuplée.

En 2004, une aide a été offerte à la rédaction du magazine 'Énergies' de Total afin d'écrire l'article 'Iles dans le ciel' consacré aux formations floristiques et faunistiques des hauts plateaux gréseux du Venezuela et comportant un hommage au vieil écologue sud-américain Charles Brewer García.

B. 2. 2. Les archives et le changement climatique

Dans 'histoire du climat', il y a d'abord le mot histoire et ce mot a une forte résonance chez les intellectuels et scientifiques d'Amérique Latine ce que je ne savais pas ou guère au début de mon travail. Cela est sans doute dû à la fois à la jeunesse des États, avec des dates d'indépendance ne remontant pas au-delà de 1810 voire 1837, et à la rupture fortement ressentie encore entre le monde pré-colombien et le moderne. L'histoire y est donc bien plus prégnante que le thème

du changement climatique que seules ces dernières années ont rendu populaire par un début de prise de conscience de l'écologie.

B. 2. 2. 1. Les archives des mineurs et des cités minières

Les propriétaires, concessionnaires et exploitants des mines n'avaient aucune vocation à être des climatologues, puisque leurs revenus et activités sont largement indépendants de la météorologie *a priori* à l'inverse des agriculteurs qui pratiquent très largement les cultures pluviales.

Néanmoins, la mine va vite, dès le XVI^e s., atteindre une dimension industrielle en Amérique et elle nécessitera donc l'emploi de la force hydraulique, la seule énergie à bon marché disponible. Les mines d'argent, d'or et de pierres précieuses sont en majorité situées dans les Andes et nombreuses sont celles établies dans les régions sèches. L'histoire économique pourra montrer les hauts et les bas de la production des métaux précieux liés en partie à la disponibilité plus ou moins grande des ressources en eau. Toutefois, mieux encore, les archives des actes municipaux des importantes cités, où les mineurs auront vite un poids prépondérant au conseil ou 'Cabildo', serviront de chambre d'enregistrement du suivi de l'alimentation en eau des moulins et usines de transformation des minéraux. De façon générale, toutes les archives spécifiquement intitulées 'Mines' peuvent présenter un grand intérêt en histoire du climat.

B. 2. 2. 2. Les archives religieuses et la météorologie jésuite

Le jésuite José Acosta (1539-1600) fut le premier historien officiel de la couronne espagnole avec son *Historia Natural y Moral de las Indias* mais les autres ordres catholiques ont aussi contribué à la connaissance du Nouveau Monde, surtout ceux présents dès le début aux côtés des conquistadors : franciscains, augustins et dominicains qu'on regroupe sous le nom de capucins. Le clergé mit au point rapidement une doctrine de propagation de la foi et tendit à substituer chez les Indiens, aux anciennes divinités célestes, des saints spécifiques chacune des manifestations météorologiques : éclair, pluie, etc. D'où, une source très grande d'informations climatiques car elle eut vite deux volets :

- pour les 'gentils' ou les Indiens convertis, une religion populaire où Dieu punissait les hommes de leurs péchés par les tremblements de terre, les inondations, les sécheresses... ;

- pour les lettrés, une formation académique de qualité aux mains surtout des jésuites à partir de la seconde moitié du XVI^e s., afin de faire le contrepois aux avancées des Lumières, souvent liées au courant laïque

ou protestant. Les sciences astronomiques dont est dérivée la météorologie y avaient une grande place depuis Kepler, Galilée et la nouvelle conception du monde.

Le régime du Patronat donna un cadre officiel aux activités de l'Eglise dans les colonies espagnoles et portugaises. Il en découle que les archives religieuses sont en partie celles de l'Etat jusqu'aux indépendances latino-américaines. Les archives paroissiales, issues de toutes les campagnes y compris les plus reculées, sont une source d'informations continues en météorologie agricole, même si elles ne sont que qualitatives.

Dans les villes, après la suppression de l'ordre jésuite en 1767, la chaîne de la transmission du savoir par ces Pères fut rétablie en Amérique Latine dans les années 1830. Citer toutes leurs contributions à l'avancement des sciences et à la formation des élèves est impossible mais il faut souligner la météorologie, domaine pour lequel les jésuites bâtirent le premier réseau mondial d'observatoires.

B. 2. 2. 3. Les journaux, écrits et mesures des explorateurs

Depuis le milieu du XVIII^e s., aux missionnaires religieux, se joignent les explorateurs professionnels, des scientifiques, envoyés avec l'aval de la couronne pour moderniser et exploiter ses colonies dans le cadre des Lumières (réformes des Bourbons d'Espagne ou de Charles III). Ils seront notamment plus nombreux après la suppression de l'ordre des jésuites en 1767 et surtout après les indépendances, à partir de 1824. Sous les Bourbons (1700-1824), sont restées fameuses les missions de La Condamine et Jussieu en Equateur, de Malespina et Haenke en Bolivie, d'Azara en Argentine et de Humboldt et Bonpland du Venezuela jusqu'au Mexique en passant par l'Equateur et le Pérou. Ensuite, dans les pays nouvellement indépendants à partir des années 1820, ce furent celles de Darwin aux Galapagos, de Pentland en Bolivie, d'Orbigny en Argentine et en Bolivie, etc. (Gioda & Roux, 2002). A ce filon, se rattachent les premières ascensions des Andes où Wymper joua un grand rôle en Equateur à la fin du XIX^e s. (Francou, 2005).

A ces explorateurs, nous devons les premières mesures barométriques c'est-à-dire l'estimation de l'altitude des sommets des Andes, celle de la limite inférieure des glaciers et des journaux de voyage où sont consignées minutieusement les observations météorologiques (Terneus & Gioda, 2005).

B. 2. 3. Avancées en histoire du climat andin

B. 2. 3. 1. Le Petit Age de Glace dans les archives

Le Petit Age de Glace a été mis en avant en 1999 comme thème de recherche fédérateur dans les Andes centrales en contrepoint de El Niño qui bénéficiait déjà d'un fort éclairage scientifique depuis les années 1980. Ses traces furent recherchées dans les archives boliviennes en liaison avec l'Argentine Maria del Rosario Prieto qui connaissait son fort impact au travers de la lecture des journaux de bord des navigateurs, lors du passage du détroit de Magellan. Travaillant dans une unité de recherche de l'IRD en hydrologie glaciaire, cette quête permit une meilleure intégration de mes études dans l'équipe et prépara l'agrégation de jeunes chercheurs à des thématiques proches comme la recherche du Petit Age de Glace dans la chronologie des arbres, lichens et moraines (Gioda *et al.*, 2004, *article 17 joint*).

L'intérêt des études du Petit Age de Glace dans les Andes doit être maintenu alors qu'il tend à être évacué aujourd'hui, comme la climatologie à l'échelle continentale ou régionale, sous la pression des scientifiques. Les climatologues ont tendance à mettre l'accent sur des recherches à propos de l'accélération du réchauffement de ces 20 à 30 dernières années et aussi à l'échelle de la Terre (Jones & Mann, 2004). Certes, le climat du globe doit être considéré dans son ensemble, en faisant fi des frontières politiques, grâce à l'appropriation des scientifiques du concept de Gaia développé par l'Anglais James Lovelock. Toutefois, garder une thématique montagnarde obligera à montrer toujours les traces indubitables de l'héritage géomorphologique du Petit Age de Glace dont ses moraines restées très fraîches dans les Andes sèches. La collaboration de collègues travaillant dans les Alpes sera aussi recherchée.

B. 2. 3. 2. L'Optimum Médieval dans l'histoire

Depuis 2003, un travail sur la cause de la montée en puissance ou de la disparition des civilisations andines a été entrepris. Vu l'ampleur de la tâche, je me suis appuyé sur les expériences de l'ancien Secrétaire Général de l'ICSU qui a, par définition, une vision mondiale (Gioda & Baker, 2004), d'un agronome spécialiste des Andes depuis une trentaine d'années (Gioda & Morlon, 2005), d'une équipe travaillant les paléo-environnements dont un archéologue actif autour de Cusco depuis des décennies, B. S. Bauer (Chepstow-Lusty *et al.*, 2005).

J'étudie l'histoire du climat avec le jeune historien des religions Carlos Carcelen Reluz (2001 & 2002) bien que son assiette ne soit pas très bonne à l'Université San Marcos de Lima, ce qui est le cas des nombreux intellectuels péruviens.

En histoire, j'ai mené des études comparées pour arriver à la conclusion d'une concomitance entre la montée en puissance de la société médiévale européenne, avec la mise en place des abbayes comme unités de production, et celles de l'épanouissement des civilisations andines dont l'empire Inca. Elle correspond bien à l'Optimum Climatique Médiéval européen entre les XII^e et XVI^e s. Comme le Petit Age de Glace, il se retrouve sur les deux hémisphères, y compris en Afrique (Chepstow-Lusty, comm. pers.), même si son synchronisme n'est pas parfait.

Un acquis important sera de garder une limite temporelle spécifique, les derniers 1000 ans, et de continuer à développer une météorologie, une climatologie et une hydrologie régionale sous les tropiques à haute altitude. Zones de refuge de la flore et de la faune des climats passés et terres de conquête récente des hommes (les Indiens ne s'approprièrent les Andes qu'il n'y a que 11 000 ans environ et les Tibétains, leur haut plateau, il y a 20 000 ans), les montagnes tropicales ne sont pas toujours des mondes faciles à comprendre mais elles n'en sont que plus intéressantes.

B. 2. 3. 3. Une alternative au déterminisme climatique

Moins de déterminisme a été recherché dans l'approche historique. Trop souvent en Amérique du Sud, l'absence d'écriture avant l'arrivée des Espagnols permit le maniement des idées par des scientifiques n'ayant pas de formation historique. D'autres sciences comme l'archéologie, la glaciologie, la géologie ou la climatologie occupent aussi ce créneau vacant. Il en résulta l'éclosion d'un déterminisme scientiste au XX^e s. Ainsi, les climatologues expliquent la chute rapide (?) des civilisations par un changement abrupt du climat, les ingénieurs hydrauliciens par la rupture de barrages, etc.

Comme hydrologue, je devrais faire du déterminisme hydrologique car tout procède de l'eau puisque nous en sommes constitués à 70 % (sic) et bien des civilisations antiques peuvent être qualifiées d'hydrauliques en Egypte, Mésopotamie, le long de l'Indus et du Fleuve Jaune, sur les rives du Lac Titicaca avec Tiwanaku, etc. Toutefois, j'ai montré que l'on peut soutenir l'inverse (Gioda & Baker, 2004, *article 18 joint*). Ce n'est pas le rôle des hydrologues de tirer sur la corde du déterminisme à moins de se convertir en un groupe de pression. Le rôle d'un scientifique est d'aller contre soi-même, contre ses penchants, contre ses idées, pour être à l'écoute, voire même pour s'abreuver des celles des autres.

Toutefois, loin de vouloir évacuer l'influence du climat sur les civilisations, je pense que le biais le plus dommageable est de réfléchir systématiquement en terme de crises historiques, climatiques, géologiques, etc. On aboutit alors à une histoire des catastrophes, une climatologie et une hydrologie des phénomènes extrêmes alors que ces derniers dans la chronologie ne représentent guère plus qu'épsilon. La quête perpétuelle des accidents

climatiques aboutit à une histoire en miettes et à une science réduite aux phénomènes à forte résonance médiatique (Gioda & Dory, 1997, *article 19 joint*).

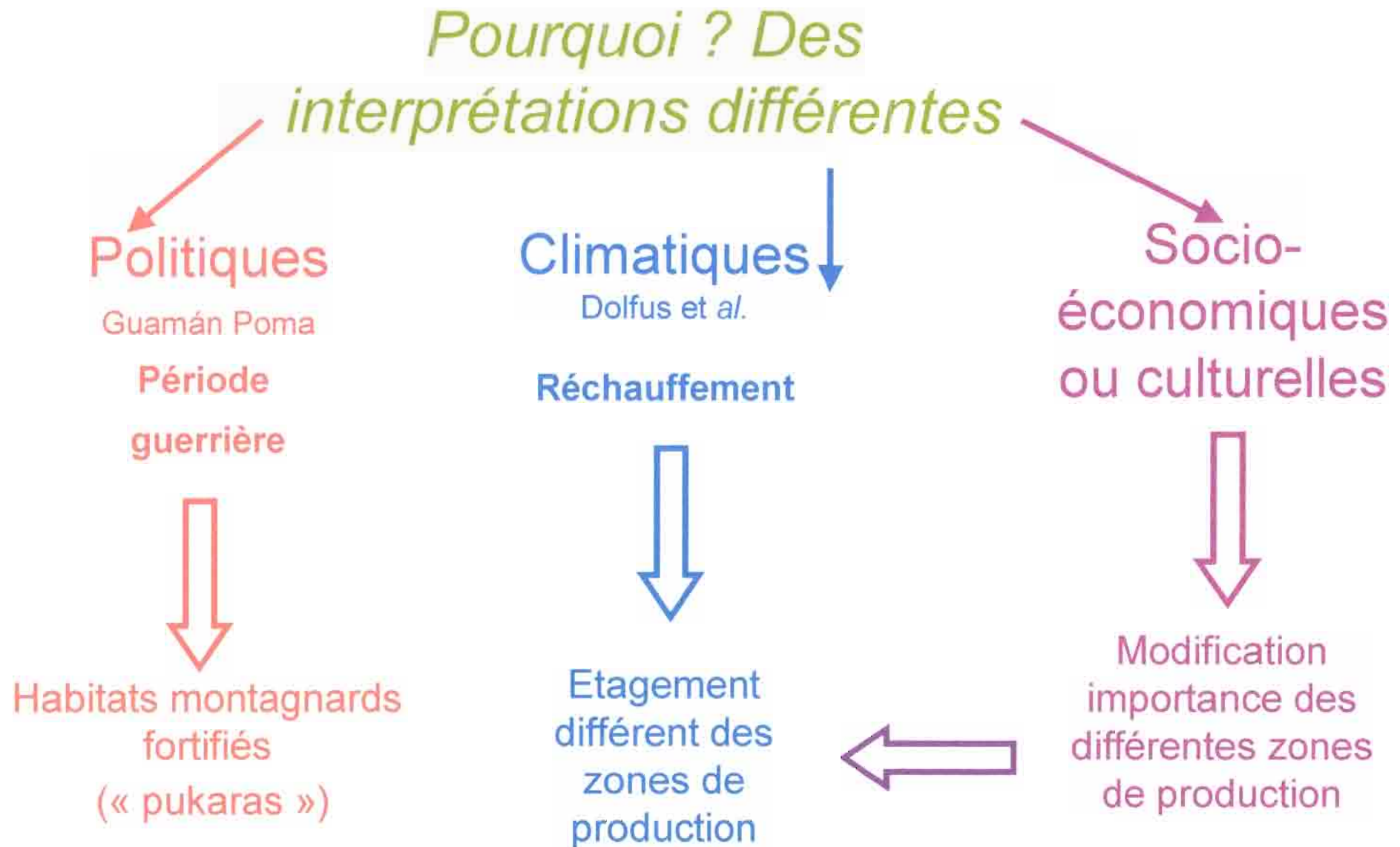
L'histoire de la chute de Potosi en fournit un bon exemple. La cité de l'argent, symbole de l'absolue richesse au temps de Cervantès et de son 'Don Quichotte' (1605), aurait définitivement décliné à cause de la catastrophe hydraulique de 1626, selon deux livres de référence en hydraulique, écrits par des ingénieurs n'ayant jamais visité le site, mais ayant recopié des sources secondaires obsolètes et apocryphes. Nous avons montré, avec Carlos Serrano et Ana Forenza, que le déclin de la population de Potosi fut lent et antérieur à la catastrophe et que la production d'argent y repartit vite, et cela avec un tonnage supérieur à celui de 1625 (Gioda *et al.*, 2002, *article 20 joint*). Ce fut en réalité la montée en puissance de la production de l'argent du Mexique qui dépassa définitivement celui du Pérou en 1650 puis l'épuisement de la grande mine fournissant le mercure à bon marché (élément chimique indispensable à l'amalgamation de l'argent) qui causèrent le déclin définitif de la ville. De plus, des sources non fiables d'informations historiques contribuèrent à gonfler le bilan des pertes en vies humaines de la catastrophe jusqu'à 12 000 victimes, alors qu'elles ne furent que de l'ordre de 2 000.

En histoire, je préférerais donc le type de schéma explicatif suivant, proposé avec mon Collègue Pierre Morlon de l'INRA, quant au perchage des villages andins autour du Cusco entre l'an 1000 et 1200. Il y a plusieurs causes possibles : politiques, climatiques et socio-économiques qui ont été avancées au fil des siècles depuis le XVI^e s. (ce qui montre bien leur valeur relative) et il me semblerait que c'est l'addition de celles-ci, ou de plusieurs de celles-ci, qui ait permis la migration des habitats groupés andins à un étage écologique supérieur (Gioda & Morlon, 2005) (Fig. 6).

Au fil du temps, en histoire andine, des écoles de pensées différentes se succédèrent. L'homme, d'abord dans l'ordre chronologique, est le principal acteur par ses changements de systèmes politiques (Guamán Poma au XVI^e s.), puis c'est encore l'homme qui obéit ou s'adapte aux changements socio-économiques. A la fin du XX^e s., il y a eu un consensus chez les historiens : les sociétés andines, avant les conquistadors, exploitaient au mieux les terroirs des montagnes en colonisant les différents étages écologiques (voir John V. Murra). Depuis sans doute sous l'influence de Jean Tricart et d'Olivier Dolfus (qui avaient lu *Le Roy Ladurie*), le climat fait partie des préoccupations des intellectuels dans les Andes et, depuis une bonne décennie, c'est même le changement climatique qui devient le mot-clef pour expliquer celui des civilisations pré-colombiennes (Chepstow-Lusty *et al.*, 2005, *résumé de l'article 21 joint*).

Toutefois, il y a presque toujours chez les historiens occidentaux le mot changement, car il a pris une grande place chez tous les intellectuels issus de la génération de la fin des années 1960. Dans les Andes, il en va différemment car

Fig. 6. Observations : des habitats au Cusco montant à de plus hautes altitudes (de 200 à 300 m) entre l'an 1000 et 1200



les sociétés paysannes préfèrent les traditions si bien que, là-bas, le mot changement prend une connotation négative. Habités à souffrir à chaque modification imposée de l'extérieur, les sociétés ont tendance à freiner mais, pour ne pas sombrer au fil des siècles, il leur faut s'adapter, créer sans cesse d'autres rites, d'autres fêtes pour développer leur dynamique, leur vie. Il en résulte, que si les sociétés occidentales ont fait des paroles 'flexibilité et ouverture d'esprit' des mots d'ordre les autres, les traditionnelles, pour survivre, même si elles ne revendiquent pas comme valeurs structurantes, ont fait de même. Néanmoins, l'aspect festif dans les sociétés andines a été sans doute exacerbé, peut-être de manière inconsciente, pour lutter contre le rouleau compresseur du développement qui produit certes énormément de biens matériels mais beaucoup moins de liens sociaux.

B. 2. 3. 4. La sécheresse et la modernité

Le concept de catastrophe naturelle est moderne car les hommes, en l'absence d'un Etat fort et bureaucratique, s'arrangeaient localement pour en atténuer ou en gérer les conséquences. C'était un simple accident, un aléa (un jet de dés en latin), ou donc un coup du sort.

Dans les Andes, hors du Cusco, aucune grande ville n'avait été fondée par l'empire Inca et l'habitat était donc largement dispersé. Plus une société est urbaine et moins elle peut s'adapter au changement climatique à l'inverse des pasteurs nomades qui suivent le verdissement des pâturages (Weiss & Bradley, 2001). Les conséquences des sécheresses pouvaient être palliées par l'utilisation d'autres étages écologiques, facilitée par la propriété collective des ayllus (communautés paysannes), et les alliances tissées entre les différents clans. Dans le monde sud-américain, les conséquences d'un El Niño peuvent varier grandement dans l'espace allant des inondations et du désert fleuri sur les côtes et les chañons les dominant jusqu'à la sécheresse sur l'altiplano. La relative régularité des El Niño (au moins un tous les 10 ans) rendait possible la mémorisation des catastrophes par les populations, elles même familiarisées à d'autres aléas naturels car vivant le long de la Ceinture de Feu du Pacifique : tremblements de terre avec la destruction de El Callao et Mendoza, volcanisme, tsunamis ayant rasé plusieurs fois Arica au Chili...

Ce système de complémentarité de l'utilisation des ressources dans un mode difficile avait été déjà mis à mal à partir de 1570 avec le regroupement des populations en villages et villes (*reducciones* et *misiones*) par l'Espagnol qui, de plus, réquisitionna la main d'oeuvre paysanne pendant de longues années consécutives pour le travail de la mine.

Au XVIII^e s., tout changea encore une fois car l'homme ne s'accommoda plus des caprices de la nature et, avec la popularisation de l'esprit scientifique dans les couches cultivées, il chercha à limiter ses impacts. La modernité signifia une pression accrue sur les colonisés qui devaient produire davantage

grâce à une meilleure organisation. Aux Amériques, la création de services *ad hoc* pour le suivi de l'agriculture et l'alimentation en eau par le roi espagnol Charles III a pu aussi générer une multiplication artificielle des catastrophes à la fin du siècle. (Gioda & L'Hôte, 2002).

Cela est valable surtout pour les sécheresses mais l'est moins pour les tremblements de terre, inondations, glissements de terrain et lahars qui sont des phénomènes assimilables à la tragédie classique avec sa règle des trois unités : action, espace et temps. La sécheresse ne respecte pas, entre autres, l'unité de temps, par la longueur de sa mise en place, permettant dans un monde pré-colombien, certes plus pauvre mais plus flexible, une adaptation des besoins en jouant sur les ressources de différents étages écologiques andins (Gioda & Morlon, 2005).

B. 3. La valorisation des savoir-faire traditionnels du Sud et de ses scientifiques

B. 3. 1. El Hierro, l'arbre fontaine et la Réserve de la Biosphère

Quelques années après mon prix Ushuaïa de 1993 obtenu pour protéger le nouvel arbre fontaine, Don Zósimo de l'île de El Hierro reçut à son tour en 1998 le prix César Manrique (1919-1992). Ce dernier fut un grand artiste et architecte espagnol qui centra sa recherche autour du dialogue 'art/nature', donc proche du 'Land Art'. Don Zósimo obtint le prix Manrique comme récompense d'un labeur de toute une vie commencée dans les années 1940 avec, outre la plantation de différents arbres fontaines, la protection des bois de pins canariens, l'aménagement intégré au paysage de plusieurs miradors et la sauvegarde du lézard géant de l'île de El Hierro (*Gallotia simonyi*), le reptile le plus rare d'Europe.

De façon générale, le travail de sauvegarde et d'illustration de la nature fait sur l'île, également par d'autres chercheurs travaillant dans le projet LIFE de la Communauté Européenne, déboucha en 2000 sur le classement d'une large part de El Hierro comme Réserve de la Biosphère par l'UNESCO. Il était difficile d'en faire un Parc National espagnol, sachant sa richesse moindre en plantes endémiques que sur les autres îles de l'archipel et sa forte empreinte humaine dans les campagnes (défrichement des forêts). Aussi, ce statut moins contraignant que celui de Parc National permet de mieux préserver et vivifier des modes de vie traditionnels. Ainsi, ceux tournant autour de l'élevage, restés vivants du fait de l'isolement extrême de El Hierro et donc de l'éloignement des centres de développement touristique, très actifs depuis les années 1960 aux Canaries.

B. 3. 2. Trans-en-Provence et son puits de rosée

Lorsque je visitai en 1991 le puits aérien ou puits à rosée de Trans-en-Provence, il y avait peu que le Maire de cette petite cité varoise, d'environ 4 000 habitants, l'avait préservé et qu'il ne servait plus de pissotière. Néanmoins, une grande impression d'abandon se dégageait du site, les panneaux indiquant sa direction avait plus de 20 ans d'âge, ceux proches du bâtiment effacés ou arrachés, etc. Le bâtiment avait été classé dans les années 1980 à l'inventaire supplémentaire des Monuments Historiques mais son intérêt échappait aux yeux de presque tous les habitants de la commune.

Malgré le changement du maire, l'impression laissée fin 2001 lors d'une visite rapide et la correspondance postérieure échangée avec la mairie montre un changement d'attitude. La série d'articles sur le puits aérien et la quête de l'eau de rosée entre 1991 et 1997 comme le film sorti en 1999 y contribuèrent. Enfin et surtout, les habitants de Trans-en-Provence connaissent bien la finalité de sa construction, ils sont fiers de son caractère unique et ils se le sont appropriés.

En Crimée, les ruines du premier puits à rosée de Théodosia (Féodosia en russe) sont aussi préservées alors que le musée archéologique local de cette ville ukrainienne, colonie grecque du Pont-Euxin dès le VI^e s. avant J.-C., conte dans une salle la saga de l'ingénieur russe Ziebold qui en construisit sur ses collines le prototype dans les années 1910. Eugeni Katiuchin, son Directeur ukrainien, en est le gardien et il fut associé dès le début en 1993 à cette recherche.

B. 3. 3. L'ours de Cuvier et les forêts de nuage

L'action la plus notable pour la sauvegarde de l'environnement des forêts de nuages, effectuée en liaison avec l'UICN-France, fut le rachat en 1998 d'un ours de Cuvier ou encore ours à lunettes (*Tremarctos ornatus* ou *Ursus ornatus*), leur symbole vivant en Amérique du Sud (Fig. 7). Les fonds de la LIDEMA (Liga del Medio Ambiente bolivienne) et de la Fondation Konrad Adenauer (Allemagne) furent utilisés. L'ours survivait chez un restaurateur de Monteagudo où l'animal servit de jouet vivant tant qu'il était jeune. L'animal, baptisé Samson, a été ensuite transféré grâce à l'ASEO (Asociación Ecológica del Oriente) au zoo de Santa Cruz de la Sierra (Bolivie) créé par le grand écologue Noël Kempff.



Fig. 7. Ourson de Cuvier, utilisé comme peluche vivante, en 1997 à Monteagudo, ville proche de la forêt de nuages du sud bolivien. Cet ourson a été sauvé par son transfert au zoo de Santa Cruz.

B. 3. 4. Les hommages aux scientifiques oubliés des bouts du monde

Il y a deux types de personnalités honorées : celles issues du tiers-monde et qui ont valorisé ses ressources ; et celles de jeunes Européens ayant donné leurs meilleures années aux projets de développement.

Le danger pour les jeunes générations du tiers-monde est l'absence de références propres et de conscience de leurs valeurs par la diffusion du modèle du Nord, symbole absolu de succès. Toutefois, ce n'est pas une fatalité. Ce monde peu considéré a compté et il compte sûrement des personnalités fortes. Je me suis attaché à la valorisation de quelques-unes.

B. 3. 4. 1. Deux Boliviens

Martin Cárdenas (1899-1973) est très représentatif de ces grandes personnalités oubliées. Né dans la ville bolivienne de Cochabamba, il fut un scientifique largement autodidacte, étant à l'origine un petit professeur de lycée de province. Toutefois, il s'était frotté, étant jeune, au monde académique nord-américain comme guide et technicien des missions du Jardin Botanique de New York, en Amazonie dans les années 1920. Martin Cárdenas décida de devenir le premier Bolivien à contribuer à l'avancée des sciences botaniques, agronomiques et écologiques de son pays. Il y réussit grâce à un travail de 50 années où il récupéra de nombreux cultivars de pommes de terres, racines et autres tubercules (Gioda & Humala-Tasso, 2000, *article 22 joint*). Plus même, son oeuvre en fit le premier agronome latino-américain et elle permit la création du CIP (Centre International de la Pomme de terre) de Lima. Néanmoins, il mourut assez isolé et sa maison devenue un musée, donnée à sa mort en héritage à l'Etat bolivien, dépérissait. La célébration du centenaire de sa naissance en 1999 permit toute une série de manifestations et d'articles et je fis campagne avec l'archiviste bolivienne Marcela Inch, devenue depuis Directrice des Archives et de la Bibliothèque Nationale, et l'Académie des Sciences du pays pour l'émission d'un timbre-poste qui sortit dès 1998 en son hommage (Fig. 8).

Fort de ce succès, j'entrepris d'honorer par l'émission d'un autre timbre-poste la mémoire de Gunnar Mendoza (1914-1994), un autre Bolivien dont, là aussi, le travail de 50 ans passés à la tête des Archives et de la Bibliothèque Nationales tendait à être oublié. La qualité des recherches de Gunnar Mendoza permit la sortie du timbre en 2002 (Fig. 9). Il faut souligner, parmi ses travaux, son édition critique en 1965 du texte intégral de Bartolomé Arzáns '*L'histoire de la ville impériale de Potosi*'. Ecrite entre 1705 et 1736, cette histoire est considérée, par certains grands écrivains du continent tel le Vénézuélien Uslar Pietri, '*Les mille et une nuits*' des Amériques.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ORSTOM

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

BOLIVIE

Cochabamba, 30 de Enero de 1998

Señor

Dr. Carlos Aguirre Bastos

Presidente

Academia Nacional de Ciencias de Bolivia

Casilla 5829

La Paz

Señor Presidente:


Soy cooperante científico de la Embajada de Francia, acreditado ante el Gobierno de Bolivia (Credencial n° 236/1995) y, habiendo visitado al Padre Francisco Javier Cerdá, Miembro de vuestra prestigiosa Academia y con el estímulo de el, me permito de importunarle para que Usted visite los altos ejecutivos del Correo de Bolivia en La Paz. Mi idea es que, en ocasión del centenario del nacimiento del Dr. Martín Cárdenas (1899-1973), ECOBOL publique una estampilla en el año 1999 en el honor del más importante científico boliviano de este siglo.

Aquí en Cochabamba, la Lic. Itala de Maman, Directora del Archivo Histórico de la H.A.M. y que tutela la Casa-Museo del Dr. Martín Cárdenas declarada Monumento Nacional desde 1974 por el actual Presidente de la República el General Hugo Banzer Suárez, tiene toda la documentación fotográfica necesaria para el dibujo de la estampilla. El Alcalde de la Honorable Municipalidad de Cochabamba, el Cap. Manfred Reyes Villa ya ha apoyado la preservación y la catalogación de la biblioteca científica de Don Martín en 1997.

Por fin, otro Miembro de la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia que considero como oportuno la publicación de una estampilla sobre el Dr. Martín Cárdenas es la historiadora Dra. Teresa Gisbert de Mesa.

Le mando algunas de mis publicaciones recientes sobre grandes figuras científicas de Bolivia del siglo XX como el Padre Ramón Cabre y Don Martín y le pido mil disculpas por haberle molestado de sus múltiples labores.

Señor Presidente, hago propicia la oportunidad para expresarle mis saludos más respetuosos.


Dr. Alain GIODA
ORSTOM y SENAMHI
Casilla 2352 - Cochabamba
Telf.: ++ 591-4-247033
Fax: ++ 591-4-256321
E-mail: gioda@maconlinebbs.com

c.c.: Dra. Teresa Gisbert de Mesa, Lic. Itala de Maman, Padre Francisco Javier Cerdá, s.j.

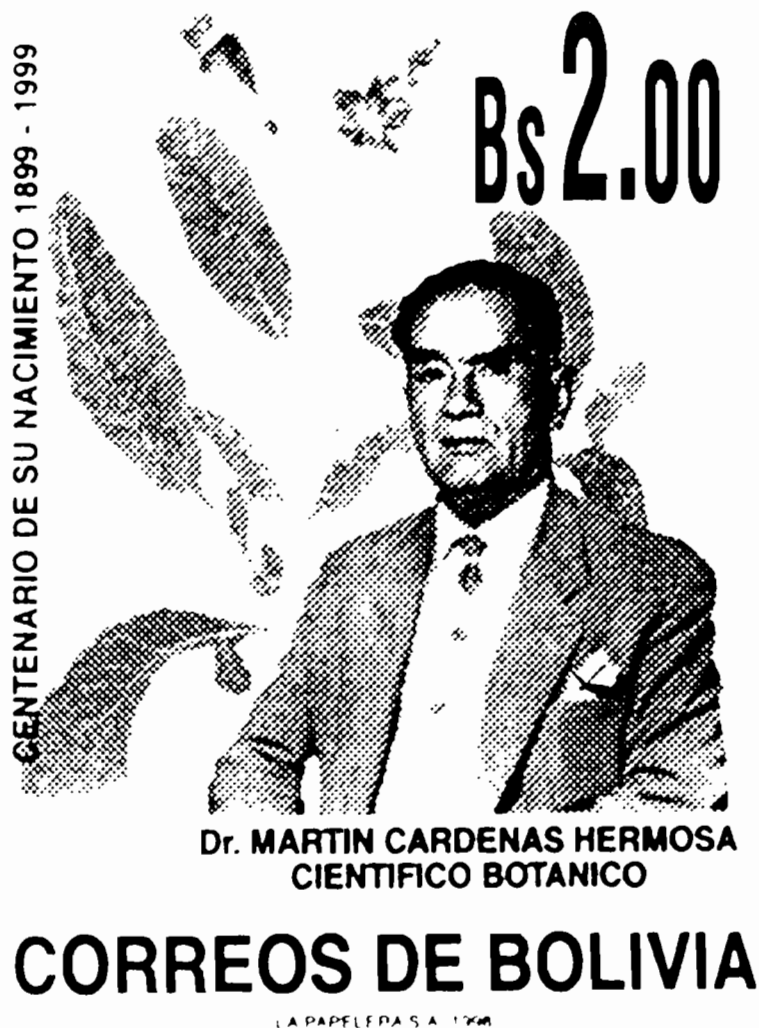


Fig 8. Timbre-poste en hommage à Martín Cárdenas (1899-1973).

De couleur verte devenue le symbole de l'écologie, le timbre a été émis en Bolivie le 10 juillet 1998 soit quelques mois avant l'année du centenaire de la naissance du grand agronome et botaniste. Martín Cárdenas travailla beaucoup la valorisation des plantes andines, comme la pomme de terre, et il fut aussi l'un des pionniers de la lutte contre la destruction de la nature en Amérique du Sud. Ma lettre du 30 janvier 1998, sollicitant l'appui du Président de l'Académie des Sciences de Bolivie pour le projet de cette émission, est jointe.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ORSTOM
BOLIVIE

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Alain GIODA, ORSTOM y SENAMHI, C.P. 2352, Cochabamba
Tefl.: 04.247033, Fax : 04.256321, E-mail gioda@maconlinebbs.com

28 de septiembre de 1998

Señor

Dr. Carlos Aguirre Bastos

Presidente

Academia Nacional de Ciencias de Bolivia

Casilla 5829 - La Paz

Señor Presidente:

La estampilla que conmemora la memoria del Dr. Martín Cárdenas Hermosa, miembro eminente de la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia, que Vs. preside, salió a luz el pasado 17 de julio con motivo del centenario del nacimiento de este gran botánico y agrónomo.


Yo no puedo más que agradecerle, infinitamente, por el resultado obtenido gracias a su colaboración. Vd. me ha superado a la perfección en mi iniciativa del pasado 30 de enero de 1998.

Ha sido una feliz coincidencia que, la Empresa de los Correos de Bolivia (ECOBOL), haya emitido el mismo día 17 de julio de 1998, una serie de tres estampillas, destinadas a honrar a tres grandes intelectuales bolivianos de recientes generaciones como Martín Cárdenas, el editor y bibliógrafo Werner Guttentag y el compositor de música Adrián Patiño Carpio.

Este serie de estampillas, abre a mi modo de ver, la posibilidad de otros homenajes para los próximos años, de parte de Correos de Bolivia. Sin pretender imponer mi parecer, pienso en la edición de varia estampillas, una acerca del archivista e historiador Gunnar Mendoza Loza (Uncía 1914-Sucre 1994.) y otra acerca del Padre jesuíta Ramón Cabré Roigé (Tarragona, España 1922-Cochabamba 1997.), físico y sismólogo. La calidad del trabajo y la personalidad de estos dos grandes ciudadanos de Bolivia están unánimemente reconocidas. Con su asentimiento, el dar lugar a una campaña que lleve acabo mi iniciativa, con el espíritu como la que se ha llevado a cabo la que honro a Martín Cárdenas creo, que es algo perfectamente posible.

Señor Presidente, acepte mis más cordiales saludos.

Dr. Alain Gioda



CC.: Padre Fco/Javier Cerdá, s.j. (que gentilmente apoya esta iniciativa)

CARACTERISTICAS TECNICAS

PRESENTACION : Un sello
DISEÑO : ECOBOL
CANTIDAD : 60.000 piezas
PLIEGOS : 100 piezas
TAMAÑO : 28 x 36 mm.
PRECIO : Bs. 4.00
PAPEL : Couché engomado
PROCEDIMIENTO : Offset
CASA IMPRESORA : Industria Lara Bich S.A.

SOBRES DE PRIMER DIA

CANTIDAD : 300 piezas
PRECIO : Bs. 9.00 c/u.

TECHNICAL DETAILS

DESING : COBOL
QUANTITY : 60.000 pieces
SHEETS OF : 100 pieces
SIZE : 28 x 36 mm.
VALUE : Bs. 4.00
PAPER : Cummen Couché
PRINTING SYSTEM : Offset
PRINTING COMPANY : Industria Lara Bich S.A.

FIRST DAY COVER

QUANTITY : 3.00 pieces
VALUE : Bs. 9.00

DIA DE EMISION
DATE OF ISSUE

22-05-2002

SERVICIO DE VENTAS

Para solicitar sellos postales
deberán dirigirse a:

EMPRESA DE CORREOS DE BOLIVIA
DEPARTAMENTO DE FILATELIA
NIVEL PLAZA-PALACIO DE COMUNICACIONES
TELEFONO: 2374145 • FAX (591-2) 2391620
filatelia_cen@correosbolivia.com
LA PAZ - BOLIVIA

Adjuntando un cheque visado
en dólares americanos, el cambio es de
Bs. 7.06 por un dólar americano.

Boletín Informativo N° 7/2002
cantidad 1.000 Pzas.

Distribución Gratuita

PROD. C&M Telf.: 2120664



EMISION

CIENTIFICO
BOLIVIANO
"GUNNAR MENDOZA"

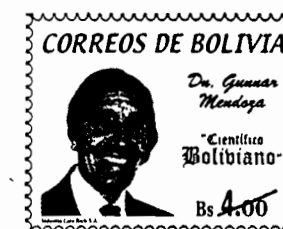


Fig. 9. Timbre-poste en hommage à Gunnar Mendoza (1914-1994).

Sépia, la couleur associée aux études archivistiques et historiques car faites à partir de papiers jaunis par le temps, le timbre a été émis en Bolivie en 2002, moins de dix années après la disparition. Gunnar Mendoza hissa la valorisation et la préservation les fonds documentaires de la Bolivie au premier plan en Amérique.

Ma lettre du 28 septembre 1998, sollicitant l'appui du Président de l'Académie des Sciences de Bolivie, pour le projet d'une émission philatélique en hommage entre autres à Gunnar Mendoza, est jointe.

B. 3. 4. 2. Trois scientifiques étrangers

Le Père Ramón Cabré s.j. (1922-1997) et ses compagnons jésuites, déjà disparus depuis quelques décennies dont Germán Saa et le Père Descottes, sont issus des bourgeoisies des pays riches et ils font le lien avec le sous-groupe suivant, celui des explorateurs européens ; ils passèrent la majorité de leur vie dans des pays en voie de développement, en adoptèrent souvent la nationalité et les usages et ils souhaitèrent reposer définitivement dans la terre américaine.

Ramón Cabré, natif de Catalogne, dirigea l'Observatoire jésuite de San Calixto de La Paz entre 1963 et 1993, qui couple mesures géophysiques et météorologiques, et il le porta à un haut degré de perfection (Fig. 10). Les observations du temps y remontent à 1891 et elles présentent le grand intérêt d'être faites à plus de 3600 m d'altitude, ce qui en fait une série unique au monde. Une synthèse pluviométrique a été faite à partir de ces recherches qui ont bénéficié de l'aide de Lawrence Drake et Agustín Udiás, jésuites et climatologues, comme de Gaston Demarée, de l'Institut Royal de Météorologie de Bruxelles (Gioda *et al.*, 2001/2004, *résumé de l'article 23 joint*), mais l'hommage par un timbre-poste n'a pas encore abouti. Connaître le Père Cabré, quelque temps avant son décès, fut pour moi le point d'entrée dans un monde : la science jésuite, active depuis le XVI^e s. et largement méconnue en France (Gioda *et al.*, 2004).

Alcide d'Orbigny (1802-1857) devrait être le Darwin français, mais il reste largement méconnu chez nous malgré son rôle de fondateur de la micropaléontologie avec la découverte des foraminifères. Les célébrations du bicentenaire de sa naissance en 2002 donnèrent l'occasion de se remémorer ce que la science lui doit et, dans mon cas, elles permirent l'illustration de son voyage en Amérique du Sud entre 1826 et 1832, continent où il joua le rôle de scientifique éclairé par les Lumières et digne héritier du grand Alexandre von Humboldt. En liaison avec la famille de d'Orbigny et l'équipe du Prof. Philippe Taquet du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, des articles furent rédigés (Gioda & Roux, 2002 a, b & c, *article 24 joint* ; Roux & Gioda, 2002). Toutefois, Alcide d'Orbigny fut plus honoré par les Sud-américains que par les Français lors de ces cérémonies. C'est le lot commun des scientifiques qui dédièrent une grande part de leur vie et de leur travail à l'outre-mer, traditionnellement terre d'exil. Humboldt et Darwin furent les grandes exceptions mais, à l'inverse, combien d' Aimé Bonpland (1773-1858) et de Thaddeus Haenke (1761-1816) ? Le premier fut l'ancien compagnon du voyage aux Amériques (1799-1804) de Humboldt et il mourut oublié dans une mission argentine, après presque dix ans passés au Paraguay sous la férule du dictateur Francia (Roa Bastos, 1993); le second, Haenke, ingénieur de Bohême et membre de l'expédition espagnole Malespina, s'est éteint dans sa propriété au nord de Cochabamba en Bolivie. Toutefois, cet oubli est synonyme aussi de leur parfaite intégration dans le Nouveau monde tropical, où les scientifiques étaient

et restent peu de chose. Il est un moindre mal, car le destin fut bien plus cruel envers un grand nombre d'explorateurs tel le suivant.

L'Italien Luigi Balzan (1865-1893) est le dernier scientifique dans l'ordre chronologique dont j'ai essayé de revaloriser les apports mais, par ironie de l'histoire, ce fut le premier dont j'entendis parler dès 1991 par mon Collègue Jean-Claude Roux, spécialiste des explorateurs latino-américains. Pourquoi ce grand temps de latence quant à sa mise en valeur ? Les travaux de Balzan sont écrits en italien une langue peu lue par les scientifiques, ils furent publiés dans des revues confidentielles et cet explorateur mourut très jeune à 28 ans (Fig. 11). C'est d'ailleurs pour cela que j'y suis très attaché ; chassé d'Europe par la misère, il sacrifia sa vie à la science tel un héros antique, fauché par la malaria (Gioda & Forenza, 2003, *article 25 joint*). A partir d'Asunción et de 1891 à 1893, il mena à bien un périple solitaire de plusieurs milliers de kilomètres entre Argentine, Chili, Pérou, Bolivie et Paraguay. Uniquement soutenu par une maigre bourse de la Société de Géographie Italienne, il explora longuement le pays où l'on ne revenait jamais indemne ou vivant : les jungles du caoutchouc, le Far West bolivien (on devrait dire ici le Far East bolivien du point de vue géographique) où la winchester, sinon les fièvres, avait le dernier mot. A la science, outre le récit minutieux de son ultime longue mission (1891-1893), il légua une collection de référence de 240 pseudo-scorpions et quelques objets indiens, conservés respectivement dans des musées de Florence et Rome.

En 2004 puis 2005, deux éditeurs, Gingko et l'IRD, ont accepté de publier ensemble une édition critique et largement annotée de son dernier voyage en français (Roux & Gioda, 2005). Son tirage, sans doute modeste, contrastera avec les dizaines de milliers d'exemplaires de *La Recherche* ou *Pour la Science* ou les centaines de milliers de timbres-poste émis afin d'honorer Cárdenas et Mendoza. Toutefois, je me satisferai de sa petite diffusion, caractéristique des ouvrages au sujet du tiers-monde, néanmoins combien importante pour la survie d'idées et de trajectoires différentes de celles de la majorité des scientifiques.

Era un hombre de fe y de ciencias dentro de la fuerte tradición de los jesuitas en América. Nacido en la provincia de Tarragona, España, en el corazón del país Catalán el 6 de mayo de 1922, el Padre Ramón Cabré Roigé llegó a Bolivia a la edad de 37 años.

Trabajó aquí todo el resto de su vida — 38 años — esencialmente en La Paz, en el Observatorio sismográfico y meteorológico de San Calixto. Allí él seguirá profundizando el trabajo de sus predecesores jesuitas: el padre francés Pierre M. Descotes y el hermano Estaban Tortosa.

Antes de llegar a Bolivia, él estudio Filosofía en el Colegio Máximo de Sarriá (Barcelona), obteniendo su licenciatura en 1948. Concluyó su carrera de Teología en el Colegio Máximo de San Cugat de Vallés en Cataluña en 1957; de 1958 a 1959 realizó su especialidad en geología en el Institut de Physique du Globe de Estrasburgo en Francia, bajo la autoridad del prestigioso profesor Róthé, entonces Director de la Secretaría Internacional de Sismología.

La estación sismográfica de La Paz fue fundada a continuación de la resolución de Manchester, en la segunda reunión de la Asociación Internacional de Sismología en 1911; servirá como modelo de todas las futuras estaciones bolivianas, con el objetivo de registrar los temblores de tierra de la región. La Compañía de Jesús, habiendo sabido de esta resolución, asumió la tarea de construir la estación, contribuyendo así, al desarrollo científico de Bolivia. La estación fue inaugurada en marzo de 1913. Precisamente fue la formación profesional del padre Cabré que lo destinó a dar el mayor lustre posible al Observatorio de San Calixto. Después de cinco años desempeñando el cargo de vice-director, el padre Cabré tomó la dirección de la estación en 1964, responsabilidad que dejara sólo en noviembre de 1993. En el entretanto, él emprendió estudios académicos, coronados con la obtención del doctorado en Ciencias Físicas de la Universidad de Barcelona en 1969, escribiendo una quincena de artículos y libros científicos que se constituyeron en el fundamento de la sismología boliviana, principalmente con "Seismology in Bolivia - Close to the Stars", 1982, publicado

HOMENAJE

Padre Ramón Cabré, s.j.

De las alturas rarificadas de la ciencia,
a las campanas de la Parroquia de Santa Vera Cruz

- Geólogo y meteorólogo en Bolivia desde 1959.
- Fue Director por 30 años del Observatorio de San Calixto de La Paz.
- Una trayectoria coronada por la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia.

Por Alain Gioda

(Climatólogo de la Cooperación Científica Francesa — ORSTOM)



• Ramón Cabré: bajo un hermoso sol de febrero, acaba en el campanario de la Iglesia de Santa Vera Cruz.

en "The Earthquake Bulletin of the U.S. Geological Survey" y "Sismicidad en Bolivia" 1989. Evidentemente editó con mucha regularidad el boletín sísmico del Observatorio de San Calixto a partir de datos fielmente registrados.

Ramón Cabré fue miembro de asociaciones científicas, como la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia desde 1971 y de la Seismological Society of America de San Francisco. Fue catedrático en la Universidad Mayor de San Andrés entre 1968 y 1971. Pero nunca abandonó las tareas de divulgación, realizando numerosos reportajes en la prensa nacional explicando simplemente los movimientos de la corteza terrestre.

El observatorio meteorológico será también objeto de toda su atención, lo que era muy necesario ya que éste fue dejado de lado desde la creación de la estación sísmica. Las observaciones ya habían comenzado desde fines del siglo XIX, en 1891, lo que dará a San Calixto el título de la más antigua estación meteorológica del país. El padre Cabré cuidará en forma notable la valorización de los datos antiguos, a partir de 1913, para publicarlos en 1988 en un pequeño libro de 80 páginas "El clima de La Paz". El subtítulo "Bodas de Diamante 1913-1985" hace alusión a los 75 años de observaciones continuas, efectuadas por los jesuitas en San Calixto. Este trabajo aún sigue siendo

el mejor sobre micrometeorología en Bolivia, por la fineza de las observaciones y la severidad en la crítica de la información. Muy preciso y riguroso, el padre Cabré dará lo mejor de sí mismo proveyendo datos de excelente calidad.

¿Por qué este interés sostenido hacia la lluvia, el tiempo y el clima? Prefiero pensar que estas cosas son ligeras como las nubes y próximas al cielo. ¿No son acaso las nubes la escalera que permite acceder a Dios y que su opacidad es indispensable para no quemarse con la luminosidad divina? ¿Por otra parte, los cielos de Bolivia cerca a 4.000 m.s.n.m. no están entre los más hermosos del mundo? ¿E interesarse no es natural para aquel que es sensible a la grandeza de la creación?

En Bolivia, mientras estuvo vivo, la calidad de su labor fue reconocida. Entre otras actividades, él representó al país ante el

mundo entero en ocho ocasiones en las asambleas generales de la Asociación Internacional de Geodesia y de Geofísica en Berkeley (EE.UU.), Moscú, Viena, Australia, etcétera. Bolivia le concedió la nacionalidad en 1970 y el Cóndor de los Andes en 1994. En 1993, la Academia Nacional de Ciencias le otorgó la Medalla al Mérito Científico.

No obstante, el padre Cabré también fue el pastor que escogió pasar sus últimos años acercándose al rebaño de Dios, abandonando las alturas rarificadas de la ciencia para tocar las campanas de la parroquia del Señor de "Santa Vera Cruz" en Valle Hermoso. En este barrio popular de Cochabamba, él se apagó a sus setenta y cinco años. Ese 25 de febrero, muchos le acompañaron bajo un hermoso sol y con cantos, a su última posada en el cementerio municipal: autoridades como el Presidente de la Academia de Ciencias de Bolivia, pero también y sobretodo gente sencilla. Verdaderamente un hermoso partir de nuestro mundo terrestre y... ¡Hasta pronto en su nube, padre Cabré!

P.D. Este homenaje no hubiera sido posible sin la colaboración de científicos amigos del padre Cabré, como Ricardo Céspedes (arqueólogo), padre Just S.J. (historiador), padre Cerda S.J. (botánico) y Josep Barnadas (historiador). Gracias también al padre Velasco S.J. (Párroco del Señor de "Santa de Vera Cruz").

Fig. 11. Portrait de l'explorateur Luigi Balzan (1865-1893)



Luigi Balzano
1888

Conclusion

J'ai essayé de placer l'arbre fontaine de El Hierro et le puits aérien de Trans-en-Provence, comme symboles tangibles, respectivement, des recherches de captation de l'eau de brouillard et de celles au sujet de l'eau de rosée. Ces recherches difficiles, car portant sur une ressource en eau rare ou fugitive, nécessitent un support physique pour s'ancrer durablement dans l'esprit des scientifiques et du public cultivé.

Les résultats des études (articles scientifiques et médias) visent donc à préserver des héritages culturels que ce soit des patrimoines naturels ou architecturaux. Ils sont tous liés aux ressources en eau et montrent l'ingéniosité des populations du Sud. Le résultat est atteint quand la réanimation (et non pas seulement la restauration) de l'objet ou des techniques est effective, sous réserve de sa prise en charge et appropriation par les habitants de la région.

L'idée forte de ce mémoire est que c'est en puisant dans le réservoir intellectuel et technique de son passé que le tiers-monde trouvera son aliment et pas dans son folklore et ses matières premières. La mémoire du Sud a été dévalorisée depuis trop longtemps, comme ses réalisations, et ce n'est qu'au XX^e s. que l'acquis de ces civilisations a commencé à être pris en compte. Les Olmèques inventèrent pourtant une écriture dès le 2^e millénaire avant le Christ, mais les archéologues virent longtemps les glyphes mayas comme de simples signes magiques. Notons que l'histoire ne commence qu'avec l'écriture, ce qui artificiellement, d'une certaine façon, rangent la plupart des civilisations du Sud parmi les préhistoriques, c'est-à-dire ne pouvant être perçues que par l'archéologie ou l'ethnologie. L'importance de l'écrit au Nord fut renforcée par la culture gréco-latine qui était essentiellement urbaine et dont nous sommes issus. Les civilisations aux cultes totémiques, comme les Guanches des Canaries et leur arbre fontaine, furent qualifiées de barbares. Les sociétés du Sud généralement agraires, comme celles des Andes, furent perçues comme traditionnelles c'est-à-dire arriérées.

Une opposition entre les couples 'réaction/nature' et 'progrès/science' transparaît dans mes propos mais c'est seulement une absence de conscience historique chez la plupart des scientifiques qui a permis ce divorce 'science/nature' au XX^e s.

La science, y compris au Nord, doit être orientée différemment ; les conclusions des études du changement climatique et de l'histoire du climat à l'échelle du globe appellent, chaque jour davantage, à une modification radicale de l'orientation du développement. Doit-on rappeler que le traditionnel est ce qui a crû de façon harmonieuse ? Toutefois, depuis la Renaissance, l'aiguillon de la plupart des intellectuels et scientifiques du Nord est le progrès ou plutôt sa quête, mais l'accumulation des problèmes écologiques à l'échelle de la Terre montre qu'il est important de freiner et de freiner vite. Un nouveau paradigme

doit s'épanouir : une réaction, mais pas du tout dans le sens conservateur du terme, car il s'agit de se comporter autrement qu'aujourd'hui et d'interagir différemment avec l'environnement. Ce serait l'image du réveil et de la reconquête, que je voudrais imposer et non celle d'un quelconque passéisme.

J'achève ce mémoire, qui est un peu mon bréviaire, par un retour à l'image de l'introduction. Mon parcours a été sinueux, certes, mais l'accumulation des expériences a été toujours utilisée pour former un puzzle scientifique, pour un projet, pour une aventure, une histoire en marche où passé, présent et avenir sont intimement mêlés.

Le lecteur voit bien, au travers de l'exemple du livre au sujet de Balzan, que ce qui m'intéresse depuis longtemps, c'est la coopération, et donc de tisser des liens pour rendre possible les choses *a priori* difficiles, y compris et surtout faire revivre les hommes et les techniques les plus oubliés. Ce rôle d'animateur, de catalyseur de points de vue les plus éloignés, me semble la quintessence de la coopération avec la création d'un espace de discussions et donc de libertés. On pourrait certainement me reprocher le caractère hybride de mon approche, mais mon travail incarne bien les tensions entre les sciences humaines et physiques et, par conséquent, il montre toute sa vitalité.

Autres documents cités dans le mémoire de l'HDR

Il s'agit de références récentes afin d'étayer mon discours et situées le plus souvent hors du champ de l'hydrologie, de la climatologie, de l'histoire du climat et de l'écologie tropicale.

- BARNABAS (J.) et coll. 2000 - **Diccionario histórico boliviano**. Grupo de Estudios Históricos, 2 tomes, Sucre.
- BROGGINI (R.) 2001 - **Eugenio Balzan 1874-1953**. Rizzoli, Milan.
- CONDARCO (M.) RAMIRO 1978 - *Historia del saber y de la ciencia en Bolivia*. ANCB, La Paz.
- DEMARÉE (G.) 2002 - **Soldiers, Missionaries and Merchants on the Road – Early Instrumental Meteorological Observations carried out by Westerners in China**. *Bull. Séanc. Acad. r. Sci. Outre-Mer*, vol. 48 (2002-n° 4), pp. 393-395.
- DEMARÉE (G.) 2003 - **Le pluviographe centenaire du plateau d'Uccle : son histoire, ses données et ses applications**. *La Houille Blanche*, n° 4, pp. 95-102.
- DOSSE (F.) 2005 - **Le pari biographique. Ecrire une vie**. La Découverte, Paris.
- EPSTEIN (P. R.) 2000 - **Salud y calentamiento global de la atmósfera y océanos**. *Investigación y Ciencia, (edición española de Scientific American)*, n° 289, pp. 16-24.
- FOCCROULLE (B.), LEGROS (R.), TODOROV (T.) 2005 - **La naissance de l'individu dans l'art**. Nouveau Collège de Philosophie, Grasset, Paris.
- FRANCOU (B.) 2005 - **Andes del Ecuador: los glaciares en la época de los viajeros (siglos XVIII a XX)**. *Bull. Inst. franc. Et. Andines*, sous presse.
- GOLOUBINOFF (M.), KATZ (E.), LAMMEL (A.) eds. 1997 - **Antropología del clima en el mundo hispanoamericano**. Ed. Abya-Yala, Quito.
- GOLOUBINOFF (M.), KATZ (E.), LAMMEL (A.) eds. 2002 - **Entre ciel et terre. Climat et sociétés**. Editions Ibispress & IRD, Paris.
- GROVE (J. M.) 2004 - **Little Ice Ages. Ancient and Modern**. 2 vol. Routledge, London.
- HUBERT (P.) et coll. 2000 - **Glossaire international d'hydrologie**. CNF du PHI-UNESCO & du PHO-OMM, Paris, terminologie en 11 langues, CD.
- JONES (P. D.), MANN (M. E.) 2004 - **Climate over Past Millennia**. *Reviews of Geophysics*, 42, RG2002, pp. 1-42.
- LECOURT (D.) 2003 - Entretien. *In : Ceux qui pensent autrement. Enjeux- Les Echos*, n°197, décembre, pp. 66-69.
- LE ROY LADURIE (E.) 1983 - **L'histoire du climat en Europe depuis l'an mil**. Flammarion, 2 tomes, Paris.
- ROA BASTOS (A.) 1993 - **Moi, le Suprême**. 1^{ère} publication en espagnol en 1974, Le Seuil, Paris.

UDÍAS, (A.) 2003 - **Searching the Heavens and the Earth: The History of Jesuit Observatories.** ASSL Vol. 286, Kluwer, Dordrecht/Boston/London.
WEISS (H.), BRADLEY (R. S.) 2001 - **What Drives Societal Collapse.** *Science*, vol. 291, pp. 609-610.

Liste des travaux dans l'ordre chronologique

1978

GIODA (A.) 1978 - **Dynamique paroxystique du Bas Pellice (Piémont) : aménagement et protection du milieu riverain.** *Atti del XVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 25-27 settembre 1978, Torino, 15 p.*

GIODA (A.), MARAGA (F.) 1978 - **Morfologia sepolta del substrato roccioso Dora Maira e modello fluviale del torrente Pellice al suo sbocco in pianura (Piemonte).** *Atti del Convegno di Geosismica a Piccola Profondità per la ricerca e l'ingegneria civile, 25 maggio 1978, Museo della Scienza e della Tecnica, Milano, Bison Instruments, Milano, 13 p.*

1980

GIODA (A.) 1980 - **Comuni, corsi d'acqua e conseguenze delle piene nella pianura a sud di Torino.** *Atti "Rischio Idrogeologico e Pianificazione del Territorio", 16 maggio 1980, Regione Piemonte, Torino, 8 p.*

1981

ANONYME 1981 - **Annuaire hydrologique de l'île de Tahiti. Année 1979.** Service de l'Équipement Tahiti/ORSTOM Nouméa, 161 p.

ANSELMO (V.), CARONI (E.), GIODA (A.) 1981 - **Aspects hydrologiques du bassin occidental du Pô (Italie). Limites des données et problèmes d'application des connaissances.** *Atti del Convegno Internazionale su: Problemi Idraulici nell'Assetto Territoriale della Montagna, maggio 1981, Milano, 15 p.*

GIODA (A.) 1981 - **Effets géomorphologiques des crues dans la plaine sud-occidentale du Pô (Piémont).** Thèse 3ème cycle, Université Nice/CNR-IRPI Turin, 366 p. + annexe.

1982

GIODA (A.) 1982 - **Utilisation du radar pour la prévision des crues à l'échelle régionale.** DEA Sciences de l'Eau, revu en 1985, ORSTOM/Paris VI, 56 p.

1983

CASENAVE (A.), SIGHOMNOU (D.), MAHIEUX (A.), GIODA (A.), HOORELBECK (J.) 1983 - **Mesures hydropluviométriques en zone urbaine Yopougon (Côte d'Ivoire). Deuxième campagne août-décembre 1983.** ORSTOM, Abidjan - Adiopodoumé, 32 p.

CHEVALLIER (P.), SIGHOMNOU (D.), MAHIEUX (A.), GIODA (A.) 1983 - **Mesures hydropluviométriques en zone urbaine Yopougon (Côte d'Ivoire). Installation et première campagne avril-juillet 1983.** ORSTOM, Abidjan - Adiopodoumé, 62 p.

GIODA (A.) 1983 - **Etude du rapport pluie-débit sur un petit bassin de savane à l'aide d'un infiltromètre à aspersion (Korhogo-Waraniéné).** Rapport d'élève, ORSTOM, Abidjan - Adiopodoumé, 64 p.

1984

CHEVALLIER (P.), CASENAVE (A.), ETIENNE (J.), GIODA (A.), LAPETITE (J.-M.), MAHIEUX (A.) 1984 - **Mesures hydropluviométriques en zone urbaine. Yopougon (Côte d'Ivoire). Troisième campagne avril-juillet 1984.** ORSTOM, Abidjan - Adiopodoumé, 51 p.

1985

GIODA (A.), LAPETITE (J.-M.) 1985 - **Etude du rapport pluie-débit sur un petit bassin de savane à l'aide d'infiltromètre à aspersion. (Worossantiakaha, Côte d'Ivoire, 1984).** ORSTOM, Abidjan - Adiopodoumé, 54 p.

GIODA (A.), RANDON (R.) 1985 - **Observations sur une année hydrologique très sèche (1983-1984). Les exemples des bassins de Korhogo et de Waraniéné.** ORSTOM, Abidjan - Adiopodoumé, 28 p.

GIODA (A.), SIMON (J.-M.), ETIENNE (J.) 1985 - **Comparaison entre les relations précipitations-débits déduites de la simulation de pluie sur parcelles (1983) et celles observées à l'échelle du bassin (1968-1971) et (1983-1984). Waraniéné Korhogo.** ORSTOM, Abidjan - Adiopodoumé, 105 p.

1986

ALBERGEL (J.), GIODA (A.) 1986 - **Extension des surfaces agricoles et modification de l'écoulement. Analyse sur deux bassins de la savane africaine. Actes 19^e Journées de l'Hydraulique : "L'Impact des Activités Humaines sur les Eaux Continentales", Paris, 9-11 septembre 1986, SFH, Paris, pp. I.9.1-I.9.6.**

BOUVIER (C.), GATHELIER (R.), GIODA (A.) 1986 - **Campagne de simulation de pluies en milieu urbain. Niamey avril 1986,** ORSTOM, Montpellier, 56 p.

GATHELIER (R.), GIODA (A.) 1986 - **Etude des relations pluies-débits à l'aide d'un simulateur de pluie sur un petit bassin sahélien (Kountkouzout-République du Niger).** ORSTOM, Niamey, 64 p.

GIODA (A.) 1986 - **Crues et aménagements des lits depuis le XIX^e siècle dans la plaine du Pô au sud de Turin.** *Actes 19^e Journées de l'Hydraulique : "L'Impact des Activités Humaines sur les Eaux Continentales", Paris, 9-11 septembre 1986*, SHF, Paris, pp. 4.9.1-4.9.7.

1987

COLLECTIF 1987 - **Etudes hydrologiques menées dans le cadre du programme de lutte contre l'onchocercose (Togo). Etude expérimentale de la propagation de l'insecticide dans les rivières. Rapport de campagne 1985-1986.** ORSTOM et OMS / OCP, Montpellier, 86 p.

LE BARBÉ (L.), GIODA (A.) 1987 - **Epandage d'insecticides dans les rivières. Portées et dosages optimaux.** ORSTOM, Montpellier, 17 p.

LE BARBÉ (L.), GIODA (A.), DELFIEU (G.), WOMÉ (K. A.) 1987 - **Etudes hydrologiques menées dans le cadre du programme de lutte contre l'onchocercose. Etude expérimentale de la propagation des insecticides dans les rivières. Rapport final.** ORSTOM et OMS / OCP, Montpellier, 184 p.

LE BARBÉ (L.), GIODA (A.) 1987 - **Voir rougir la rivière.** *Journées Hydrologiques : « Processus Hydrologiques et Transferts de Polluants à l'Echelle des Bassins Versants », Comité National de Géographie, octobre, Thonon-les-Bains*, Poster.

1988

GIODA (A.) 1988 - **Compte-rendu de mission au Canada du 27 mai au 11 juin 1988.** ORSTOM, Montpellier, 9 p.

GIODA (A.), LE BARBÉ (L.), BADER (J.-Cl.) 1988 - **Jaugeages, télétransmission et traçages : éléments pour une stratégie contre l'onchocercose (Afrique occidentale).** *Actes VI^e Congrès Mondial des Ressources en Eau de l'AIRE/IWRA, Ottawa, 28 mai-3 juin 1988*, IWRA, vol. III, pp. 497-506.

LE BARBÉ (L.), GIODA (A.) 1988 - **Recherche d'un protocole standard d'épandage d'insecticide dans les rivières traitées par le programme de lutte contre l'onchocercose.** *Hydrologie Continentale*, vol. 4, n^o2, pp. 93-112.

1989

GIODA (A.) 1989 - **AGROPOLIS-MUSEUM. Exprimer une dynamique et les facteurs du changement au sein d'un musée type "AGROPOLIS".** *Journée d'Etude AGROPOLIS, Table ronde n^o2, 20 décembre 1989*, Montpellier, AGROPOLIS, Montpellier, 9 p.

LE BARBÉ (L.), GIODA (A.) 1989 - **Modélisation de la propagation des insecticides dans les rivières infestées par l'onchocercose.** *SISIPPA 89, Actes Symposium International sur des Solutions Intégrées pour des Problèmes de Pollution de l'Eau, 19-23 juin 1989, Lisbonne, LNEC, Lisboa, vol. III, pp. 199-208.*

MONIOD (F.), GIODA (A.) (éds.) 1989 - **Qualité physico-chimique des eaux continentales.** *Quatrièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 14-15 septembre 1988, Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris, 328 p.*

LITTÉRATURE GRISE

ANONYME 1989 - **Liste des documents des hydrologues de l'ORSTOM reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier (1^{er} janvier 1985-1^{er} novembre 1988).** ORSTOM, Montpellier.

GIODA (A.), LE BARBÉ (L.), DELFIEU (G.) 1989 - **Traçages à la Rhodamine B. Note technique.** ORSTOM/OMS, Montpellier, 19 p.

1990

ARNAUD (Y.), DESBOIS (M.), GIODA (A.) 1990 - **Towards a rainfall estimation using Meteosat over Africa.** *Proc. International Symposium on the Hydraulics/Hydrology of Arid Lands, 30 July - 3 August 1990, San Diego, HY & IR/ASCE, pp. 311-316.*

GIODA (A.) 1990 a - **Aperçu du coût de la maintenance des systèmes de télémessure suivant la technologie de réalisation.** *Séminaire VERSEAU d'Initiation aux Nouvelles Technologies, 21-22 juin 1990, Montpellier, ORSTOM, Montpellier, 17 p.*

GIODA (A.) 1990 b - **La Piazza Navona et ses fleuves.** *L'Eau, l'Industrie, les Nuisances, n°142, pp. 78-79.*

GIODA (A.), GUILBOT (A.), JOSEPH (C.), CLERC (J.-M.) 1990 - **Telemisura, teletrasmissione e polo scientifico-industriale VERSEAU.** *Journée Franco-Italienne "Recherche et Développement dans les Industries de l'Eau", 25 octobre 1990, La Villette, AFIRIT, Paris - Rome, 17 p.*

JOSEPH (C.), RODIER (C.), BLATEYRON (F.), CLERC (J.-M.), GIODA (A.) et al. 1990 - **Systèmes de télémessure en contrôle et gestion de l'environnement,** *Cahiers de Verseau, Montpellier, n°1, 61 p.*

LITTÉRATURE GRISE

GIODA (A.) 1990 c - **D'EPSAT-Niger vers HAPEX-II-SAHEL. Une bibliographie I.** ORSTOM, Montpellier, 17 p.

GIODA (A.) 1990 d - **Note sur le Rwanda et l'Hydrologie ORSTOM.** ORSTOM, Montpellier, 17 p.

- GIODA (A.) 1990 e - **Compte-rendu de l'Atelier : Eaux et Agriculture.** *Journée Franco-Italienne "Recherche et Développement dans les Industries de l'Eau", 25 octobre 1990, La Villette, AFIRIT, Paris-Rome, 9 p.*
- GIODA (A.) 1990 f - **L'audiovisuel au Centre ORSTOM de Montpellier.** Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier.
- SICARD (M.), RABBIA (E.), GIODA (A.) 1990 a - **Périodiques reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier. Sommaire 1989.** ORSTOM, Montpellier.
- SICARD (M.), RABBIA (E.), GIODA (A.) 1990 b - **Liste des documents des hydrologues de l'ORSTOM reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier 1988-1989.** ORSTOM, Montpellier, 21 p.

1991

- ACOSTA BALADÓN (A. N.), GIODA (A.) 1991 - **L'importance des précipitations occultes sous les tropiques secs.** *Sécheresse*, vol. 2, n°2, pp. 132-135.
- ACOSTA BALADÓN (A. N.), GIODA (A.), FONTANEL (P.) 1991 - **L'importance des précipitations sous les tropiques secs. Un essai de synthèse.** *Proc. VIIth IWRA World Congress, 13-18 May 1991, Rabat*, Special Edition of French Language Papers, IWRA, Urbana, pp. 73-80.
- GIODA (A.) 1991 a - **L'hydrologie et la cécité des rivières en Afrique.** *Prep. Proc. VIIth IWRA World Congress, 13-18 May 1991, Rabat*, IWRA, Urbana, 8 p.
- GIODA (A.) 1991 - **L'eau : passé, présent et futur.** ADEMART - Pays de Loire, Nantes, 26 p.
- GIODA (A.), ACOSTA BALADÓN (A. N.) 1991 - **Les puits aériens de Théodosia, de Montpellier et de Trans.** *Sécheresse*, vol. 2, n°3, pp. 215-219.

LITTÉRATURE GRISE

- GIODA (A.) 1991 b - **D'EPSAT-NIGER vers HAPEX-II-SAHEL : une bibliographie II,** ORSTOM, Montpellier, 5 p.
- GIODA (A.) 1991 c - **Compte-rendu de la mission au Maroc au "VIIth IWRA World Congress".** ORSTOM, Montpellier, 17 p.
- GIODA (A.) 1991 c - **Végétation et brouillard sous les tropiques arides. Une bibliographie commentée.** ORSTOM, Montpellier, 15 p.
- SICARD (M.), RABBIA (E.), GIODA (A.) 1991 a - **Liste des documents entrés au fonds de la Bibliothèque du Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier (1^{er} janvier 1985-1^{er} mars 1991).** ORSTOM, Montpellier.
- SICARD (M.), RABBIA (E.), GIODA (A.) 1991 b - **Périodiques reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier. Sommaire 1990.** ORSTOM, Montpellier.

SICARD (M.), RABBIA (E.), GIODA (A.) 1991 c - **Liste des documents des hydrologues de l'ORSTOM reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier 1989-1990.** ORSTOM, Montpellier, 24 p.

1992

ACOSTA BALADÓN (A. N.), GIODA (A.) 1992 - **Las precipitaciones ocultas y la desertificación. Sus aplicaciones a la agricultura.** *Encuentro Meteo 92, 1-9 octubre 1992, Cáceres-Salamanca*, Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, Tomo II, pp. 370-374.

GIODA (A.) 1992 - **Les mêmes causes ne produisent pas les mêmes effets : travaux hydrauliques, santé et développement.** *Sécheresse*, vol. 3, n°4, pp. 227-234.

GIODA (A.), ACOSTA BALADÓN (A. N.), FONTANEL (P.), HERNÁNDEZ MARTIN (Z.), SANTOS (A.) 1992 - **L'arbre fontaine.** *La Recherche*, vol. 23, n°249, décembre, pp. 1400-1408.

GIODA (A.), BAU (J.) 1992 - **Les moulins à marée du Portugal.** *L'Eau, l'Industrie, les Nuisances*, n°155, p. 65.

GIODA (A.), DEPRAETERE (C.), MALEY (J.), ACOSTA BALADÓN (A. N.), FONTANEL (P.), HERNÁNDEZ MARTIN (Z.), ESPEJO GUASP (R.) 1992 - **Cloud forest, fog precipitation and digital elevation model in the tropics.** *Annales Geophysicae*, Springer International, vol. 10, suppl. II, II, C 273.

GIODA (A.), JOSEPH (C.), RODIER (C.) 1992 - **Sistemi di telemisura per il controllo e la gestione dell'ambiente. Applicazione all'acqua intesa come risorsa.** *Seminario Europeo COMETT, Università di Genova, 28-30 ottobre 1992*, 58 p.

GIODA (A.), MERLO (C.), DE CARMANTRAND (B.), SIMON (J.-Cl.), JAMET (P.) 1992 - **Efeitos da agricultura sobre o abastecimento d'água.** *Prep. Brazilian/European Community Int. Symposium on Agriculture and the Environment, 3-6 May 1992, Belo Horizonte*, 22 p. Une version française a été rédigée sous le titre "Effets de l'agriculture sur l'approvisionnement en eau en Europe".

LITTÉRATURE GRISE

GIODA (A.), RABBIA (E.), MAIRE (C.) 1992 - **Périodiques reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier. Sommaire 1991.** ORSTOM, Montpellier.

GIODA (A.), RABBIA (E.) 1992 - **Liste des documents des hydrologues de l'ORSTOM reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier 1990-1991.** ORSTOM, Montpellier, 22 p.

1993

- DOUMENGE (Ch.), GILMOUR (D.) RUIZ PÉREZ (M.), BLOCKUS (J.), W.C.M.C., GIODA (A.) 1993 - **Tropical montane cloud forests: conservation status and management issues. Keynote.** *Proc. Tropical Mountain Cloud Forests: State-of-Knowledge Symposium and Workshop, San Juan, Puerto Rico, 1-5 June 1993*, East-West Center, Honolulu, pp. 17-24.
- ESPEJO G. (R.), BURGOS C. (C.), ZULETA M. (R.), MARTINEZ (L.), CORREA C. (H.), GIODA (A.) 1993 - **Balance teórico y experimental de captación de agua de los estratocumulos costeros (Lat. 25° S.).** *1ª Reunión Internacional Andina de Física, 9-11 octubre 1993, Arica*, Universidad de Tarapacá, Arica, Chili, pp. 235-240.
- GIODA (A.) 1993 a - **A new fountain tree for Hierro (Canary Islands).** In : *Spirit of Enterprise - The 1993 Rolex Awards*, Buri, Bern, p. 477.
- GIODA (A.), ACOSTA BALADÓN (A. N.), FONTANEL (P.), HERNÁNDEZ MARTIN (Z.), SANTOS (A.) 1993 - **El árbol fuente.** *Mundo Científico*, vol. 13, n°132, pp. 126-134.
- GIODA (A.), BEYSENS (D.), ACOSTA BALADÓN (A. N.) 1993 - **Dew and atmospheric wells in mediterranean climates.** *International Symposium on Precipitation and Evaporation, A. Becker et al. (eds.), Bratislava, 20-24 September 1993*, vol. 3, pp. 279-284.
- GIODA (A.), BLOT (J.), ESPEJO GUASP (R.), MALEY (J.) 1993 - **Les forêts du brouillard dans un environnement aride.** *Résumés des Journées du Programme Environnement du CNRS et ORSTOM, 13-15 janvier 1993*, Lyon, p. 6.
- GIODA (A.), ESPEJO GUASP (R.), ACOSTA BALADÓN (A. N.) 1993 - **Fog collectors in tropical areas.** *International Symposium on Precipitation and Evaporation, A. Becker et al. (eds.), Bratislava, 20-24 September 1993*, vol. 3, pp. 273-278.
- GIODA (A.), HERNÁNDEZ MARTIN (Z.), GONZÁLES (E.) 1993 - **Observatoires, brouillards et arbres fontaines des Canaries / Observatories, fogs and fountain trees in the Canary Islands.** *Veille Climatique Satellitaire*, n°46, pp. 38-49.
- GIODA (A.), MALEY (J.), ESPEJO GUASP (R.), ACOSTA BALADÓN (A.) 1993 - **Some low elevation fog forests of dry environments including some African paleoenvironments.** *Proc. Tropical Mountain Cloud Forests: State-of-Knowledge Symposium and Workshop, San Juan, Puerto Rico, 1-5 June 1993*, East-West Center, Honolulu, pp. 97-101.
- GIODA (A.), NIEBLA (R.), HERNÁNDEZ (J. C.) 1993 - **L'arbre fontaine.** *La Garance Voyageuse*, n°23, pp. 2-5.

LITTÉRATURE GRISE

- BEYSENS (D.), GIODA (A.), MOREL (J.-P.), KATIOUCHINE (E. A.), MYLYMOUK (I.), NIKOLAYEV (V. S.) 1993 - **Les fontaines aériennes de**

Théodosia (Crimée, Ukraine). CR de mission, septembre-octobre, CEA-Saclay, Gif-sur-Yvette, 12 p. + fig.

GIODA (A.), RABBIA (E.), FRÉON (M.) 1993 a - **Périodiques reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier. Sommaire 1992.** ORSTOM, Montpellier.

GIODA (A.), RABBIA (E.), FRÉON (M.) 1993 b - **Périodiques reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier. Sommaire mi-1993.** ORSTOM, Montpellier.

GIODA (A.), RABBIA (E.), FRÉON (M.) 1993 c - **Liste des documents des hydrologues de l'ORSTOM reçus au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier 1991-1992.** ORSTOM, Montpellier.

PRESSE

GAZETTE DE THEODOSIA. 1993 - Journal du 28 octobre 1993, **La sensation vient de Paris.** Théodosia (Crimée). Coupure de presse d'une page, en russe.

PONCHELET (H.) 1993 - **Déserts. Oasis des brouillards.** *Le Point*, 9 avril 1993, n°1125, pp. 42-43.

RADIO

GIODA (A.) 1993 b - **L'arbre fontaine.** *Perspectives Scientifiques.* France-Culture, 25 mai, interview de 30 mn, cassette disponible.

1994

ESPEJO G. (R.), BURGOS C. (C.), MARTINEZ (L.), CORREA C. (H.), GIODA (A.) 1994 - **Relación entre la presión atmosférica en la base de la inversión de la subsidencia, con la captación de agua de los estratocumulos.** *Actas Vº Simposio Chileno de Física Experimental y Aplicada, 11-14 enero 1994, Antofagasta, UCN, Antofagasta, Chili, pp. 233-236.*

GIODA (A.), ESPEJO (R.), BLOT (J.), NEUVY (O.) 1994 - **Arbres fontaines, eau du brouillard et forêts de nuages.** *Sécheresse*, vol. 5, n° 4, pp. 237-243.

GIODA (A.), ESPEJO GUASP (R.), BOUILLON (A.) 1994 - **Des filets attrape-brouillard ou le principe de l'arbre-fontaine.** *Espaces pour Demain*, n°42, pp. 4-5.

GIODA (A.), BEYSENS (D.), KATIOUCHINE (E. A.), MOREL (J.-P.), NIKOLAYEV (V. S.) 1994 - **The aerial wells of Theodosia (Crimea, Ukraine): unsuccessful dew-catcher buildings.** *Annales Geophysicae*, Springer International, vol. 12, suppl. II, II_C448.

GIODA (A.), NIEBLA (R.), HERNÁNDEZ (J. C.) 1994 - **L'arbre fontaine.** *Vivre Ici, Le Journal de la Montagne*, 7^e année, n°25, p. 11.

CONTRAT

GIODA (A.) 1994 - **Annotated bibliography on tropical mountain forest management.** Technical writer's contract n° 70176/1993. Forestry Department, FAO, Rome, Italy, January, 110 p.

1995

DOUMENGE (Ch.), GILMOUR (D.) RUIZ PÉREZ (M.), BLOCKUS (J.), W.C.M.C., GIODA (A.) 1995 - **Tropical montane cloud forests: conservation status and management issues.** In: *Tropical Montane Cloud Forests*, Hamilton L. S. et al. (eds.), Ecological Studies, vol. 110, Springer Verlag, New-York, pp. 24-37.

ESPEJO G. (R.), MARTINEZ D. (L.), ESTADES M. (C.), GUITIERREZ G. (G.), GIODA (A.) 1995 - **L'aridité et sa spécificité dans les déserts côtiers de l'Amérique du Sud.** *Succulentes*, 18^e année, n°3 & 4, pp. 30-32 & 7-11.

GIODA (A.), HERNÁNDEZ (Z.), GONZÁLES (E.), ESPEJO (R.) 1995 - **Fountain trees in the Canary Islands: legend and reality.** *Advances in Horticultural Sciences*, vol. 9, n°3, pp. 112-118.

GIODA (A.), MALEY (J.), ESPEJO GUASP (R.), ACOSTA BALADÓN (A.) 1995 - **Some low elevation fog forests of dry environments: application to African paleoenvironments.** In: *Tropical Montane Cloud Forests*, Hamilton L. S. et al. (eds.), Ecological Studies, vol. 110, Springer Verlag, New-York, pp. 156-164.

LITTÉRATURE GRISE

BEYSENS (D.), GIODA (A.), MOREL (J.-P.), KATJUSIN (E. A.), EVSEEV (A. A.) 1995 - **Les fouilles dans les environs de Féodosia.** Traduit du russe. U.M.R. CNRS 9968, Dpt. Archéologie, Centre Camille Jullian, Université de Provence, Aix-en-Provence, 4 p.

1996

BEYSENS (D.), GIODA (A.), KATIUCHIN (E.), MILIMUK (I.), MOREL (J.-P.), NIKOLAYEV (V.) 1996 - **Les puits de rosée, un rêve remis à flots.** *La Recherche*, mai, n°287, pp. 30-33.

BEYSENS (D.), GIODA (A.), KATIUCHIN (E.), MILIMUK (I.), MOREL (J.-P.), NIKOLAYEV (V.) 1996 - **Los pozos de rocío, un sueño reflatado.** *Mundo Científico*, julio/agosto, n°170, pp. 620-623.

ESPEJO G. (R.), MARTINEZ D. (L.), GUITIERREZ G. (G.), GIODA (A.) 1996 - **Variabilidad temporal de la cualidad del agua de niebla en el Norte de Chile.** *Actas del II^o Encuentro Internacional de Físicos de la Región Inka, 10-14 junio 1996, Cusco - Perú*, Universidad de Tarapacá, Arica, Chili, 9 p.

GIODA (A.) 1996 - **Historia del agua.** In : *Anuario 1996 Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre, pp. 349-357.

NIKOLAYEV (V. S.), BEYSENS (D.), GIODA (A.), MILIMOUK (I.), KATIUSCHIN (E.), MOREL (J.-P.) 1996 - **Water recovery from dew.** *Journal of Hydrology*, vol. 182, pp. 19-35.

PEFAUR (J.), BALLINAS (R.), GIODA (A.), HENSCHER (J.), LACAZE (D.), LEON (B.), LOPEZ (E.), LUYO (M.), PUIG (H.), SALBITANO (F.), TALAVERA (C.) 1996 - **Coastal hills ecosystem: use of fog water towards restoration and sustainable use.** *Proc. of the Symposium U.E. STD3 "Evaluation of fog as a water resource"*, Semenzato R. (ed.), October 1996, Arequipa, Peru, 5 p.

PRESSE

EL SIGLO - **Especialistas de Francia y Argentina: Conferencia en Potosí sobre historia y ecología en Bolivia.** Potosí, 29 junio 1996.

PRESENCIA - **Sucre: Conferencia sobre ecología e historia en Bolivia.** La Paz, 26 junio 1996.

1997

GIODA (A.), ARRÁZOLA (S.) 1997 - **Le naturaliste bolivien Martín Cárdenas et ses grandes cactées.** *Succulentes*, 20^e année, n°4, pp. 3-11.

GIODA (A.), HERNÁNDEZ (Z.), ACOSTA BALADÓN (A.), BLOT (J.) 1997 - **L'arbre-fontaine : brouillard et aridité en Afrique.** *Le Flamboyant*, n°41 Spécial Eau, pp. 9-11.

GIODA (A.), PRIETO (M. R.) 1997 - **Para una historia del clima y del ambiente en los Andes Centrales.** *Anuario 1997 Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre, pp. 403-422.

PRESSE

FRANCOU (B.), GIODA (A.) 1997 - **¿Por qué este diluvio desde octubre?** "Facetas", Supplément dominical des quotidiens : *El Correo del Sur / Sucre & Los Tiempos / Cochabamba*, 27 abril, pp. 4-5.

GIODA (A.) 1997 a - **Homenaje. Padre Ramón Cabré, s.j.** "Facetas", Supplément dominical des quotidiens : *El Correo del Sur / Sucre & Los Tiempos / Cochabamba*, 9 marzo, p. 5.

GIODA (A.), DORY (D.) 1997 a - **¿Que se sabe de El Niño en Bolivia?** "Facetas", Supplément dominical des quotidiens : *El Correo del Sur / Sucre & Los Tiempos / Cochabamba*, 2 noviembre, pp. 4-5.

GIODA (A.), DORY (D.) 1997 b - **La increíble edad de El Niño.** "Ventana", Supplément dominical du quotidien de La Paz : *La Razón*, 2 noviembre, pp. 6-7.

LOS TIEMPOS 1997 a - **Gobierno de Francia y Armada construyeron "bote científico".** *Quotidien de Cochabamba*, 5 abril 1997, A-6.

LOS TIEMPOS 1997 b - **Ch'alla de la Armada**. Quotidien de Cochabamba, 9 avril 1997, Citas sociales (*Ch'alla en quechua veut dire sacrifice ici à entendre comme baptême du bateau*).

INTERNET - <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/histeau/tapa.html>

GIODA (A.) 1997 b - **Brève histoire de l'eau**. Contribución a la red sobre "Agua y Civilización". ORSTOM-Francia, Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia, SENAMHI-Bolivia, CONAPHI-Bolivia y UNESCO-PHI, *Waterway*, Boletín PHI (UNESCO, Montevideo), n°10, p. 33.

1998

GIODA (A.) 1998 - **About water**. *IHP Waterway*, n°16, pp. 33-37 [disponible aussi en français].

GIODA (A.), ARRÁZOLA (S.) 1998 - **Vida y bibliografía del naturalista Martín Cárdenas (Homenaje en el centenario de su nacimiento)**. *Anuario 1998 Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre, pp. 315-338.

GIODA (A.), PRIETO (M. R.) 1998 - **Historical « El Niño » and the Little Ice Age in the dry tropical Andes**. "2^d International Conference on History of Climate", Norwich, England, 7-11 September 1998, Poster.

GIODA (A.), SERRANO (C.) 1998 - **L'eau et l'argent à Potosi (ancien Haut-Pérou puis Bolivie)**. *La Houille Blanche*, n°7, pp. 22-32.

PRESSE

LOS TIEMPOS. 1998 - **Dos expertos ofrecerán charlas sobre "El Niño"**. Cochabamba, 14 mayo 1998.

GIODA (A.), DORY (D.) 1998 - **Historia del clima. El Niño, Bartolomé Arzans y Francisco de Viedma**. "Facetas", Supplément dominical des quotidiens : *El Correo del Sur / Sucre & Los Tiempos / Cochabamba*, 8 marzo, pp. 8-9.

GIODA (A.), MAMANI (D.) 1998 - **Historia del clima. El Niño, las sequías y la Cordillera Chiriguana**. "Facetas", Supplément dominical des quotidiens : *El Correo del Sur / Sucre & Los Tiempos / Cochabamba*, 7 junio, pp. 6-7.

TIMBRE-POSTE

Martín Cárdenas. ECOBOL, valeur faciale 2 bolivianos, 1^{er} jour d'émission 10 juillet 1988, premier tirage 300 000 exemplaires.

1999

GIODA (A.) 1999 a - **A short history of water**. *Nature & Resources*, vol. 35, n°1, pp. 42-48 [disponible aussi en français et espagnol].

- GIODA (A.) 1999 b - **L'histoire de l'eau.** In : *L'eau*. Grosclaude G. (éd.), Coll. "Un point sur...", INRA-Editions, Paris, tome 1, pp. 31-41.
- GIODA (A.), ARRÁZOLA (S.) 1999 - **Martín Cárdenas, un hombre entre dos mundos.** *Cultural* (Revista de la Fundación Cultural del Banco Central de Bolivia), año 2, n°8, pp. 7-14.
- GIODA (A.), DUCKSTEIN (L.), PRIETO (M. R.) 1999 - **ARCHISS in South America: Encoding Uncertainty in the Potosi Case Study.** Abstracts *Reconstructing Climatic Variability from Historical Sources and Other Proxy Records, Manzanillo (México), 1-3 December 1999*, U. S. NSF & NOAA, p. 15.
- GIODA (A.), PRIETO (M. R.) 1999 - **Varabilidad climática y documentos históricos en la antigua Charcas (Bolivia) entre los siglos XVI y XIX.** *Actas Seminario El Fenómeno El Niño en Bolivia, 3-5 junio 1998, La Paz, OMM-SEMAMHI-IRD*, pp. 18-35.
- GIODA (A.), PRIETO (M. R.) 1999 a - **Histoire des sécheresses andines : Potosi, El Niño et le Petit âge glaciaire.** *La Météorologie*, 8^e série, n°27, pp. 33-42.
- GIODA (A.), PRIETO (M. R.) 1999 b - **Historia del clima: Potosí, El Niño y la Pequeña Edad del Hielo.** *Anuario 1999 Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre, pp. 317-329.
- GIODA (A.), PRIETO (M. R.) 1999 c - **Para una historia climática de La Paz en los últimos cinco siglos.** *Historias...* (Revista de la Coordinadora de Historia, La Paz), n°3, pp. 13-33.
- GIODA (A.), SERRANO (C.) 1999 a - **El agua y la plata en Potosí (Charcas y Bolivia, siglos XVI-XX).** *Anuario 1999 Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre, pp. 139-167.
- GIODA (A.), SERRANO (C.) 1999 b - **L'argent de l'ancien Pérou.** *Pour la Science*, mai, n°259, pp. 42-47.
- RONCHAIL (J.), GIODA (A.) 1999 - **San Calixto de La Paz: las lluvias y las fases de la Oscilación Austral durante cerca de un siglo.** *Actas Seminario El Fenómeno El Niño en Bolivia, 3-5 junio 1998, La Paz, OMM-SEMAMHI-IRD*, pp. 73-86.
- SERRANO (C.), GIODA (A.) 1999 - **Apuntes relacionados con la catástrofe hidráulica de 1626 en Potosí.** *Revista de la Casa de la Libertad*, año 3, n°6, pp. 77-123.

FILM SCIENTIFIQUE

Les fontaines aériennes de Féodosia. Films de 13 mn et 26 mn. Producteur : Facettes Productions – Pontoise, co-production : CEA - CNRS Image Média - CNRS Audiovisuel - IRD Audiovisuel, soutiens : Action Culturelle U. E. DG X, Ville de Trans-en-Provence.

LITTERATURE GRISE

GIODA (A.) et coll. 1999 - **Para una historia del clima en los Andes Centrales. El proyecto "Potosí"**. *Contracto Unesco n°833.077 B*, proyecto Cono Sur - ARCHISS, Cochabamba, Bolivia, Contracto individual ARCHISS, PHI, UNESCO, Montevideo.

PRESSE

CORREO DEL SUR. 1999 a- **Empieza curso en la Andina**. Sucre, 26 octubre 1999, p. 6

CORREO DEL SUR. 1999 b- **Destacan valor del seminario en la Andina**. Sucre, 27 octubre 1999, p. 6.

PAGINA 20. 1999 a- **Seminario de sabios del clima develará importantes datos**. Sucre, 26 octubre 1999, p. 9.

PAGINA 20. 1999 b- **Sabios del clima aprueban muchas recomendaciones**. Sucre, 29 octubre 1999, p. 1.

2000

GIODA (A.), FORENZA (A.) 2000 - **José María Bozo y la meteorología de La Paz (1828-32)**. *Anuario 2000 Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre, pp. 391-410.

GIODA (A.), HUMALA-TASSO (K.) 2000 - **Cardenas et les tubercules des Andes**. *Pour la Science*, janvier, n°267, pp. 10-13.

GIODA (A.), PRIETO (M. R.), FORENZA (A.) 2000 - **Archival climate history survey in the central Andes (Potosi, 16th-17th centuries)**. *Prace Geograficzne* (Krakow), vol. 107, pp. 107-112.

GIODA (A.), SERRANO (C.) 2000 - **La plata del Perú**. *Investigación y Ciencia (édition espagnole de Scientific American)*, julio, n°286, pp. 56-61.

TRAVAIL ENCADRÉ

CARCELEN RELUZ. (C.) 2000 – **Proyecto Historia del clima de Lima en el siglo XVIII. Informe final**. Contracto individual UNESCO. ARCHISS, PHI, UNESCO, Montevideo.

2001

GIODA (A.), ARRAZOLA (S.) 2001 - **Martín Cárdenas entre deux mondes : l'indien et l'occidental**. *Succulentes*, 24^e année, n°2, pp. 16-22.

GIODA (A.), PRIETO (M. R.), FORENZA (A.), SERRANO (C.) 2001 - **Datos de archivos y reconstrucción de las estaciones de lluvias en Potosí (1585-1737)**. *Actas del Simposio Nacional de Cambios Globales, Argollo J. & Miranda G. (eds.), 20-22 junio 2000, La Paz*, Academia Nacional de Ciencias de Bolivia, La Paz, pp. 84-91.

TRAVAIL ENCADRÉ PUBLIÉ

CARCELEN RELUZ (C.) 2001 - **Fuentes para una historia del clima de Lima en el siglo XVIII.** *Anuario 2001*, Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia, Sucre, pp. 465-494 (à partir des résultats du contrat individuel 2000 ARCHISS, PHI, UNESCO, Montevideo).

TRAVAIL ENCADRÉ

FORENZA. (A.) 2001 - **Proyecto ARCHISS-Bolivia. Informe final.** Contrato individual UNESCO *Contrato Unesco n°833.150-1*. ARCHISS, PHI, UNESCO, Montevideo.

GARZA MERODIO. (G.) 2001 - **Proyecto ARCHISS-México. Informe final.** Contrato individual UNESCO *Contrato Unesco n°833.153*. ARCHISS, PHI, UNESCO, Montevideo.

2002

GIODA (A.) 2002 a - **L'histoire de l'eau.** In : *L'eau*. Grosclaude G. (éd.), Collection "Un point sur...", INRA-Editions, 2^e édition, Paris, tome 1, pp. 31-41.

GIODA (A.) 2002 b - 4 articles du **Diccionario de Historia Boliviana**, ed. Josep Barnadas, Grupo de Estudios Historicos, Sucre, 2 vol. : **Clima**, vol. 1, pp. 543-544 ; **Ecología**, vol. 1, pp. 715-717 ; **El Niño (fenómeno de)**, vol. 1, pp. 760-761, **Qari-qari (lagunas de)** [lacs coloniaux de Potosí], vol. 2, pp. 640-641.

GIODA (A.), L'HOTE (Y.) 2002 - Archives, histoire du climat et pluviométrie : un exemple sud-américain. *La Houille Blanche*, n°4/5, pp. 44-50.

GIODA (A.), ROUX (J.-Cl.) 2002 a - **Alcide d'Orbigny voyageur philosophe en Amérique.** *Pour la Science*, n°296, juin, pp. 68-74.

GIODA (A.), ROUX (J.-Cl.) 2002 b - **Alcide d'Orbigny y las independencias sud-americanas (homenaje en el bicentenario de su nacimiento).** *Anuario 2002 Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre, pp. 93-105.

GIODA (A.), ROUX (J.-Cl.) 2002 c - **Alcide d'Orbigny: magia y revelación de Bolivia.** *Cultural* (Revista de la Fundación Cultural del Banco Central de Bolivia), n°19, pp. 7-17.

GIODA (A.), SERRANO (C.), FORENZA (A.) 2002 - Les ruptures de barrages dans le Monde : un nouveau bilan de Potosi (1626, Bolivie). *La Houille Blanche*, n°4/5, pp. 165-170.

ROUX (J.-Cl.), GIODA (A.) 2002 - Alcide D. d'Orbigny : savant de terrain, encyclopédiste et homme engagé. *Sciences au Sud*, n°15, p. 16.

PRESSE

RAUX (A.) 2002 - **Les chasseurs d'eau.** *VSD*, rubrique Techno, n°1311, 10-16 octobre, pp. 46-49.

TIMBRE-POSTE

Gunnar Mendoza. ECOBOL, valeur faciale 4 bolivianos, 1^{er} jour d'émission
22 mai 2002, premier tirage 60 000 exemplaires.

TRAVAIL ENCADRÉ PUBLIÉ

GARZA MERODIO. (G.) 2002 - Frecuencia y duración de sequías en la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX. *Investigaciones Geográficas*, n° 48, pp. 106-115. (à partir des résultats du contrat individuel 2001 ARCHISS, PHI, UNESCO, Montevideo).

2003

GIODA (A.) 2003 - El proyecto ARCHISS (Archival Climate History Survey). Disponible aussi en anglais. CIFEN-OMM, *Taller DARE (Data REscue)*, Guayaquil, Ecuador, 31 marzo-4 mayo.

http://www.wmo.ch/web/wcp/clips2001/html/otros_html/taller_guayaquil.html

voir *Lista de las conferencistas* dans le site.

http://www.wmo.ch/web/wcp/clips2001/html/otros_html/archiss.htm

GIODA (A.), BAKER (M.), GARZA (G.), CARCELEN (C.), SERRANO (C.), FORENZA (A.), DUCKSTEIN (L.) 2003 - The ARCHISS (Archival Climate History Survey) Project in Latin America. Examples of Homogeneous Documentary Data Series (Potosi, Mexico City and Lima). *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 7-11 April 2003, Nice, Session CL 11.08: Climate of the Last Millennium*, résumé CD-ROM.

GIODA (A.), FORENZA (A.) 2003 - Luigi Balzan, les rivières et le climat de l'orient bolivien dans la presse de son temps (1891-1893). *Anuario 2003 Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre, pp. 195-209.

SERRANO (C.), GIODA (A.) 2003 - Potosi, Mining, and Heavy Metals in Bolivia: A Large History (16th-21th centuries). *Proc. "XIIth International Conference on Heavy Metals in the Environment", C. Boutron et C. Ferrari (eds.), 26-30 June 2003, Grenoble*, Abstract 1530, Late abstracts, p. 8.

PRESSE

EL UNIVERSO 2003. Meteorólogos aceptan fallas en predicciones.
Quotidien de Guayaquil, Equateur, 1^{er} avril, p. 11A

ESPINASSE (P.) 2003 - Alain Gioda : « Le temps se détraque et ce n'est qu'un début ». *Le Midi Libre*, Montpellier, 26 octobre, p. 12.

HALLÉ (F.) 2003 - L'arbre fontaine. *Le Midi Libre*, Montpellier, 3 mars.

JONES (A.) 2003 - Alain Gioda sur son nuage en forme de piège à brume.
Le Midi Libre, Montpellier, 10 octobre, p. 12.

LEFEVRE (P.) 2003 - Les arbres : drôles de spécimens. *Science & Vie Junior*, n°166, juillet, pp.66-72.

TRAVAUX ENCADRÉS

- JAMEAU (Cl.) et al., 2003 - **L'atmosphère : une ressource alternative en eau pour l'Homme**. TIPE (Travail d'Initiative Personnelle Encadré), Concours des Grandes Ecoles, Lycée Corneille, Rouen, 10 p.
- TERNEUS, T. (A.) 2003 - **Algo sobre la historia del desarrollo de la meteorología en el Ecuador**. Contrato individual ARCHISS, PHI, UNESCO; Montevideo.

2004

- GIODA (A.), BAKER (M.) 2004 - **Water, Civilizations and Governance**. « *The basis of Civilization – Water Science?* », *Proc. of the UNESCO/IAHS/IWHA symposium held in Rome, December 2003*, IAHS Publ. n°286, pp. 284-290.
- GIODA (A.), JOMELLI (V.), RABATEL (A.) 2004 - **Petit Age de Glace, lichens et archives religieuses**. *Pour la Science*, Dossier n°42, janvier-mars, pp. 100-103.
<http://museum.agropolis.fr/pages/savoirs/climat/climat.htm>
- GIODA (A.), RONCHAIL (J.), L'HOTE (Y.), POUYAUD (B.) 2004 - **Analyse et variabilité temporelle d'une longue série de pluies des Andes en relation avec l'Oscillation Australe (La Paz, 3658 m, 1891-2000)**. *Proc. 2d Conference on Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology, Brussels, 12-14 December 2001*, Royal Meteorological Institute of Belgium & ARSOM, G. Demarée et al. (eds.), pp.199-217.

PRESSE

- GIODA (A.), ORTLIEB (L.) 2004 - **La mémoire de l'Histoire in** : Archives du climat. *Sciences au Sud*, n°27, novembre-décembre, pp 8-9.
- RIOU (A.) 2004 - **Les tepuyes du Venezuela**. *Energies* (revue du pétrolier Total), mai, n°4, pp. 52-55.

TRAVAIL ENCADRÉ

- SERRANO. (C.) 2004 - **Historia de la minería andina boliviana (siglos XVI-XX)**. Contrato individual ARCHISS, PHI, UNESCO, Quito y Montevideo.

2005

- CHEPSTOW-LUSTY (A. C.), FROGLEY (M. R.), LENG (M. J.), CUNDY (A. B.), BOESSENKOOL (K. P.), BUSH (M. B.), GIODA (A.), BAUER (B. S.) 2005 - **The 'Medieval Warm Period' and the Rise of the Inca State**. *Science*, submitted March, accepted by Chief Editor first stage April.

- GIODA (A.), MORLON (P.) 2005 - **Cultural Strategies for the Mitigation of Droughts in the Dry Andes.** *Proc. Conference on Natural Disasters and Cultural Strategies Responses to Catastrophes in Global Perspective*, Mauch, Ch., Pfister, Ch. (eds.), German Historical Institute, Washington, 19-22 February 2004. In : Anuario 2005, Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia, Sucre.
- ROUX (J.-Cl.), GIODA (A.) (éds.) 2005 - **Des Andes à l'Amazonie bolivienne : le périple solitaire du naturaliste Luigi Balzan (1890-1893).** Préface de Claude Lorius, Médaille d'Or CNRS & Prix Balzan 2001. Editions Ginkgo et IRD, Paris, 250 p., manuscrit accepté.
- TERNEUS (A.), GIODA (A.) 2005 - **History of Climate, Jesuits and Meteorology in Ecuador with special reference to the El Niño of 1925.** *Proc. 1st Alexander von Humboldt Conference on the El Niño Impact, Guayaquil (Ecuador), 16-20 May, EGU & CIIFEN*, pp. 1-11.

Articles et des résumés joints

Ces articles et résumés sont présentés dans l'ordre d'appel dans le texte et non pas dans l'ordre chronologique même si le résultat final est proche. Un classement chronologique et les références complètes ont été donnés dans la section précédente.

1. Crues et aménagements des lits depuis le XIX^e s. dans la plaine du Pô au Sud de Turin - 1986
2. Extension des surfaces agricoles et modifications de l'écoulement. Analyse sur deux bassins de la savane africaine - 1986 (*avec Jean Albergel*)
3. Recherche d'un protocole standard d'épandage d'insecticide dans les rivières traitées par le programme de lutte con l'onchocercose - 1988 (*avec Luc Le Barbé*)
4. Le mêmes causes ne produisent pas le mêmes effets : travaux hydrauliques, santé et développement - 1992
5. L'histoire de l'eau - 1999
6. Résumé : 'Efeitos da agricultura sobre o abastecimento d'água' - 1992 (*avec Carlo Merlo, Bruno de Carmantrand, Jean-Claude Simon et Paul Jamet*)
7. L'arbre fontaine - 1992 (*avec Andrés Acosta Baladón, Pierre Fontanel, Zósimo Hernandez Martín, Arnoldo Santos*)
8. Les puits aériens de Théodosia, de Montpellier et de Trans - 1991 (*avec Acosta Baladón*)
9. Water recovery from dew - 1996 (*avec Vladimir Nikolayev, Daniel Beysens, Irena Milimouk, Eugeni Katiushin et Jean-Paul Morel*)
10. Tropical Montane Cloud Forests : Conservation Status and Management Issues (*avec Charles Doumenge, Don Guilmour, Manuel Ruíz Pérez et Jill Bockhus*)
11. Histoire des sécheresses andines : Potosi, El Niño et le Petit Age Glaciaire - 1999 (*avec Maria del Rosario Prieto*)
12. L'argent de l'ancien Pérou - 1999 (*avec Carlos Serrano*)
13. Archives, histoire du climat et pluviométrie : un exemple sud-américain. - 2002 (*avec Yann L'Hôte*)
14. Travail encadré
Gustavo Garza - 2002. Frecuencias y duración de sequías de la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX
15. Resumé : José María Bozo y la meteorología de La Paz (1828-1832) - 2000 (*avec Ana Forenza*)
16. Résumé : History of Climate, Jesuits and Meteorology in Ecuador with special reference to the El Niño of 1925 - 2005 (*avec Alfredo Terneus*)
17. Petit Age de Glace, lichens et archives religieuses - 2004 (*avec Vincent Jomelli, Antoine Rabatel et Gaston Demarée*)

18. Water, civilizations and governance - 2003/2004 (*avec Mike Baker*)
19. Les ruptures de barrages dans le monde : un nouveau bilan de Potosi (1626, Bolivie) - 2002 (*avec Carlos Serrano et Ana Forenza*)
20. Résumé : The 'Warm Medieval Period' and the Rise of the Inca State - 2005 (*avec Alex Chepstow-Lusty, M. R. Frogley, M. J. Leng, M. B. Bush, A. B. Cundy, K. P. Boessenkool et B. S. Bauer*)
21. Ciencia antes que drama - 1997 (*avec Daniel Dory*)
22. Cardenas et les tubercules des Andes - 2000 (*avec Katia Humalla-Tasso*)
23. Résumé : Analyse et variabilité temporelle d'une longue série de pluies des Andes en relation avec l'Oscillation Australe - 2001/2004 (*avec Josyane Ronchail, Yann L'Hôte et Bernard Pouyaud*)
24. Alcide d'Orbigny, voyageur philosophe en Amérique - 2002 (*avec Jean-Claude Roux et Marie-Thérèse Vénec-Peyré*)
25. Luigi Balzan, les rivières et le climat de l'orient bolivien dans la presse de son temps (1890-1894) -2003 (*avec Ana Forenza*)

1. Crues et aménagements des lits depuis le XIX^e s. dans la plaine du Pô au Sud de Turin - 1986

Crués et aménagements des lits depuis le XIX^e siècle dans la plaine du Po au sud de Turin

Recherche menée au C.N.R. - I.R.P.I.

Alain GIODA

Hydrologie/U.R. B12 - ORSTOM

RESUME

L'héritage de l'aménagement est caractérisé par la faiblesse des travaux d'hydraulique. Cette faiblesse est nécessaire pour conserver le rôle d'écrêtement et de décantation des eaux attribué à la haute Plaine du Pô, lors des crues. Les limites actuelles de l'aménagement, en partie en voie de résolution, découlent de la valorisation croissante de la plaine d'inondation et de la sur-exploitation des matériaux des lits. S'y ajoutent des limites financières et des problèmes d'éparpillement des compétences administratives.

Le futur proche bénéficiera d'un système d'annonces de crue, en cours d'installation, que l'Auteur voudrait compléter par la prévision hydrométéorologique en temps réel.

ABSTRACT

Since 1801, there has been very little development of the river beds in the Upper Po Plain (south of Torino - Italy). This lack of development is an important factor for its use in the whole Po catchment. It is a natural retention and settling basin during floods.

Actual problems which are partly resolved come from flood-plain development and the over-exploitation of sand and gravel in the bed layers. Others problems are a limited budget and overlapping administrative responsibilities.

From 1978-88 a flood warning service will be set up. The Author proposes to extend this service by the addition of real-time hydrometeorological forecasting.

INTRODUCTION

La Plaine du Pô au sud de Turin est considérée depuis les années cinquante comme un vaste réservoir naturel d'écrêtement et de décantation des eaux lors des crues /5/ /21/. Deux raisons ont guidé ce choix :

- la faiblesse de la pente du fleuve entre Casalgrasso, la zone où se jettent dans le Pô tous les affluents issus des Alpes Cottiennes, et Meirano-Moncalieri, limite aval du terrain d'étude et porte de l'agglomération turinoise ($0,68\text{‰}$) (Fig. 1);

- celle des troubles à Meirano-Moncalieri où le bassin padan a une dégradation spécifique d'environ $70\text{ t/km}^2\text{/an}$.

Sur le premier thème, il suffit de constater qu'en 1956 le haut Pô, de sa sortie des Alpes jusqu'à Casalgrasso, a une pente longitudinale de $2,23\text{‰}$. A partir de Turin et sur 100 km jusqu'à Valenza, la pente est supérieure à celle du tronçon Casalgrasso-Meirano-Moncalieri dépassant presque partout 1‰ /19/. De plus de façon implicite, l'urbanisation et l'importance du tissu industriel à l'aval de Meirano-Moncalieri, imposent un contrôle hydraulique drastique. Le but est de protéger les agglomérations de Turin, Chivasso, Casale Montferrato, Valenza...

Au sujet des troubles, il faut savoir que le Pô, dans son tronçon terminal avant le delta, coulait au-dessus de la plaine riveraine jusque dans les années soixante. Tout apport des émissaires de l'Apennin d'Emilie-Romagne était particulièrement redouté du fait de leur charge parmi les plus élevées du monde. On a mesuré une dégradation spécifique de $4570\text{ t/km}^2\text{/an}$ sur le Marecchia, fleuve côtier de l'Adriatique, dont le bassin est contigu de celui du Pô /13/. Dans les Alpes, le Rhin, le Rhône, l'Isère, le

Drac et la Durance ont une dégradation comprise entre $600\text{ et }1200\text{ t/km}^2\text{/an}$ /18/. La faiblesse des troubles à Meirano-Moncalieri s'explique, en montagne, par la présence d'une bonne couverture herbacée et forestière, celle de lithotypes résistants dans le système morpho-climatique actuel et, en plaine, par la grande longueur du parcours du fleuve. Le Pô et ses affluents peuvent s'étaler largement dans des champs d'inondation de $16\ 800\text{ ha}$.

1. LE TERRAIN D'ETUDE

Le terrain d'étude fait partie de la haute Plaine du Pô, incluse dans le Piémont, la grande région du nord-ouest de l'Italie.

Les rivières qui drainent cette plaine très monotone constituent le réseau hydrographique du Pô en amont de Turin. Sont exclus les petits émissaires des premières pentes des Alpes et des Collines de Turin. Les six cours d'eau étudiés, tous issus des Alpes Cottiennes qui culminent au Mont Viso (3841 m), sont, du nord au sud, les suivants : le Cluson ou Chisone, affluent du Pellice ; le Pellice, affluent du Pô ; le Pô qui est appelé haut Pô en amont de la confluence avec le Pellice ; la Varaita et la Maïra ou Macra, affluents du Pô ; la Grana ou Mellea, affluent de la Maïra (cf. Fig. 1).

Les tronçons étudiés vont du débouché des Alpes jusqu'à la confluence avec le Pô ou l'un de ses affluents. Sur le fleuve, la station de contrôle de Meirano-Moncalieri (214 m) sert de limite en aval.

Plusieurs traits méritent d'être soulignés.

◊ Les régimes hydrologiques sont du type nival de transition à la sortie des Alpes et sont de type nivo-pluvial en plaine /1/ /18/.

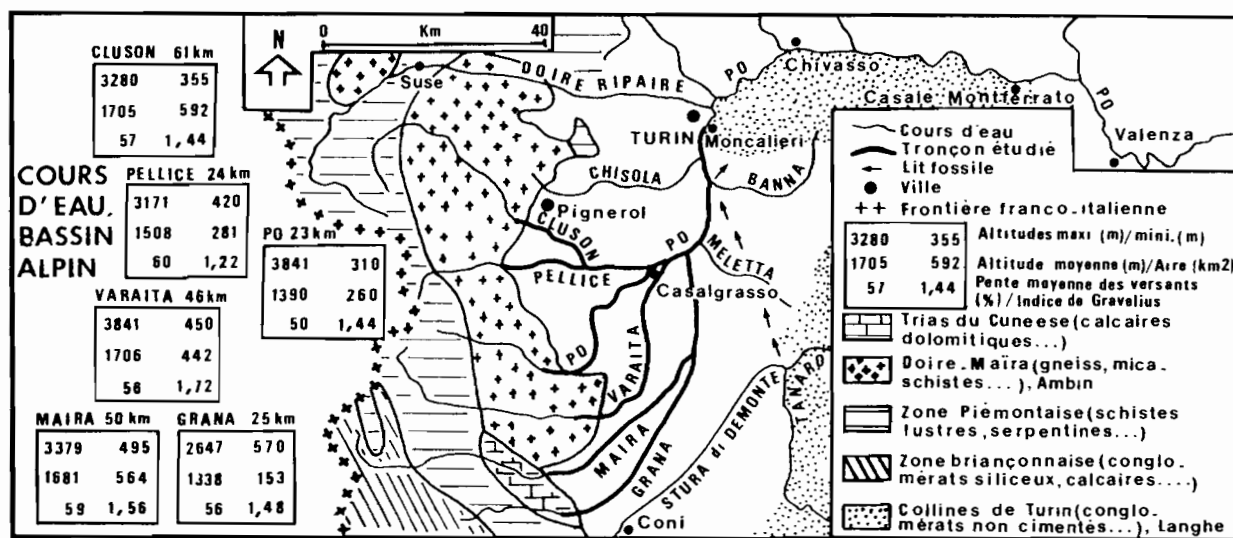


Fig 1. LOCALISATION DU TERRAIN D'ETUDE ET CARACTERISTIQUES DES BASSINS ALPINS.

RAPPORT IV.9

◊ Le module à San Martino, au débouché des Alpes, est de 13,8 m³/s pour un bassin de 580,8 km², celui du Pô à Meirano-Moncalieri est de 78,4 m³/s pour une aire de 4 885 km² /1/. La seule rivière qui tarit en période estivale est la Grana.

◊ La très faible incision des lits implique que la plaine d'inondation correspond à la définition du lit majeur. Seule, la Maïra est encaissée dans ses alluvions cimentées jusqu'à 5 km en aval de la sortie des Alpes /9/.

◊ En quelques 10 km, dans la région de Casalgrasso, se jettent dans le Pô tous ses affluents alpins importants ; le bassin du fleuve passe de 710 km² à 3 430 km². Une absence de hiérarchisation du réseau hydrographique en découle.

◊ Le lit fossile du Tanaro, issu de l'Apennin ligure, longe les Collines du Montferrat et de Turin. Cette rivière traversait les Collines de Turin jusqu'au Pléistocène supérieur sans se jeter dans le Pô actuel /8/.

◊ Dans la haute Plaine du Pô, l'absence de piedmont est la règle. Ici, pas de cordons morainiques comme à Ivree mais une plaine qui descend très régulièrement avec une pente de 4‰ de Coni à Turin /9/.

2. UN MINIMUM D'AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES

Le choix d'un aménagement minimal pour la haute Plaine du Pô, dans les années cinquante, entérine un état de fait. Dès le XIX^e siècle, il est implicite même si jamais formulé clairement par l'Etat ou jamais perçu par les associations de particuliers.

Dans la Savoie, le Royaume Piémont-Sardaigne est capable de diriger le plus considérable endiguement continu jusqu'en 1872. Les travaux, entrepris entre 1829 et 1854, se développent sur les 39 km du cours de l'Isère situés en amont de la frontière avec la France /6/.

2.1. Le temps des initiatives dispersées (XIX^e s.)

Le manque d'investissements de la part de l'Etat fait que particuliers et communautés locales réalisent des projets qui répondent à leurs seuls intérêts et dont l'ampleur dépend de leurs possibilités financières. Les principales réalisations sont passées en revue.

2.1.1. Le maintien de la couverture forestière dans les lits majeurs est une prévention naturelle contre les dommages des rives et des inondations. Le long des cours d'eau, au premier écran de la fûtaie-taillis de saules succède celui de la fûtaie de peupliers. A l'arrière, se trouvent les champs et les pâturages qui constituent le meilleur terroir de la plaine. Les peupleraies dont le bois sert à fabriquer des allumettes ne souffrent pas des inondations sauf lorsqu'elles sont très jeunes. Elles contribuent avec la fûtaie-taillis où sont contenues les érosions de rives à servir de peigne en retenant la plupart des débris et des alluvions lors des crues. L'efficacité du

maintien de la couverture forestière se mesure, le long du Pellice, à la quasi-concordance entre l'aire maximale des bois relevée en 1819 et celle des champs d'inondation de la crue de mai 1977 /10/.

2.1.2. Le fichage de pieux en bois sur une rive entraîne le rejet latéral du courant sur l'autre rive. Ceci est particulièrement grave quand il s'agit des rives concaves car les alluvions se déposent sur les plages convexes qui engraisent. Les gains de terrain sont effectués par les propriétaires installés sur la rive convexe aux dépens de ceux de la rive opposée. Ils sont une source continue de litiges encouragés par la législation qui reconnaît propriétaires des dépôts alluviaux ceux qui luttent contre les érosions de rive. Les particuliers bonifient les nouvelles terres qui sont inondables afin d'amortir les frais engagés pour la défense des rives. A l'inverse, pour ces raisons le tracé des limites des communes, le long des cours d'eau, est inchangé depuis la période 1750-1800 /7/.

2.1.3. La coupure des pédoncules de méandre est une pratique très ancienne. Dix-sept coupures faites par les hommes sur le Pô sont recensées dans les archives de Moncalieri entre 1314 et 1610. Le but est de protéger le long du fleuve les habitats groupés de faule, Pancalieri, Polonghera, Casalgrasso et Borgo Mercato de Moncalieri. Les dernières coupures connues sont faites à Casalgrasso entre 1840 et 1846. Ce type d'interventions tombe en désuétude car les trains de méandres se reforment rapidement dans la plaine sauf en cas d'endiguement continu /10/.

2.1.4. La construction de digues est limitée, jusqu'au début du XX^e siècle, aux zones les plus menacées du bassin padan sans qu'il existe une vision d'ensemble du problème des inondations /16/. Les 500 premiers km du cours en plaine du fleuve ne sont équipés que sur 40 km /6/. Dans la haute Plaine, on évalue sur d'importants tronçons des cours d'eau l'endiguement d'après les cartes de IGM datées de 1895. Le Pô, le plus aménagé, voit ses rives équipées sur 16,5 % de leur longueur tandis que la taille moyenne d'une digue est de 590 m. Le Pellice est dépourvu d'équipements de ce type sur les 12 derniers km de son cours /10/.

2.1.5. La construction et la protection des ponts routiers sont marquées par l'oeuvre de l'ingénieur NEGRETTI. Dès 1828 dans le Piémont, deux pignons insubmersibles, reliés aux levées d'accès des ouvrages par des digues coudées, sont installés en amont des ponts afin d'effectuer un effet de chasse d'eau rendant impossible toute migration latérale du courant /6/. Trois ouvrages sur le Pô sont de ce type qui contribuera à la disparition des ponts de barques devant être démontés avant chaque crue et impliquant une rupture de charge. Les treize ouvrages empruntés par les voies

ferrées sont construits entre 1848 et 1892. Adaptés à des charges lourdes, ils ont tous résisté sauf dans le cas de destruction volontaire /10/.

2.2. Le début de l'aménagement concerté (XX^e s.)

L'aménagement est marqué par l'intervention croissante de l'Etat italien.

2.2.1. Les "consorzi" deviennent efficaces grâce à la loi n° 774 du 13 juillet 1911. Il s'agit d'organismes émanant des collectivités locales riveraines. Les "consorzi" remplacent les particuliers lorsque ceux-ci sont incapables de résoudre individuellement les problèmes hydrauliques.

Depuis leur création par la loi n° 2248 du 20 mars 1865, l'action des "consorzi" avait été réduite ou inefficace. Les raisons d'échecs sont l'opposition d'un particulier ou d'une commune qui pouvait bloquer tout aménagement car les décisions devaient être prises à l'unanimité, la participation financière de l'Etat qui était de l'ordre de 2 % sur le terrain d'étude, encore n'était-elle pas obligatoire... /7/. La loi n° 774 rend obligatoire la participation des entités suivantes : Etat ; provinces, équivalents italiens des départements ; communes ; "consorzi". Elle fixe la part de l'Etat à 50 % des frais. Seules, les dépenses d'entretien restent à la charge des "consorzi" /10/.

2.2.2. "L'Ufficio Idrografico per il Po" est créé le 31 mars 1912 par décret. Ce bureau spécial du "Genio Civile" du Ministère des Travaux Publics, installé à Parme, est chargé des études hydrologiques sur l'ensemble du bassin du Pô (70091 km²). En 1930, le bassin est quadrillé par 1087 stations pluviométriques et 285 stations limnimétriques. Le compartiment de Turin, la plus occidentale des trois sous-divisions territoriales de "l'Ufficio", compte 68 stations où des mesures de débit sont faites entre 1925 et 1970 /1/. "L'Ufficio" est l'un des meilleurs services hydrologiques au monde jusqu'aux années soixante.

2.2.3. Les résultats de la nouvelle législation et du travail de "l'Ufficio" permettent l'individualisation des tronçons de rivière à haut risque et la mise en oeuvre rapide des travaux d'hydraulique (Fig.2).

Il est à noter que la relation entre les tronçons où le curage est nécessaire et ceux présentant des chenaux anastomosés est parfaite sauf dans le cas de la Varaita où ce type de lit ne se trouve pas au-delà de Lagnasco.

En aval de ces tronçons et pour tout le Pô, où les lits sont sinueux ou à méandres, le nettoyage des alluvions de crue est suffisant /10/.

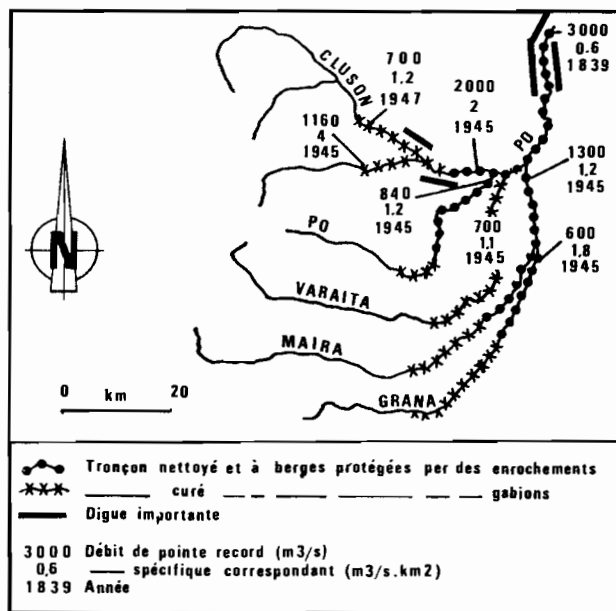


Fig.2. AMENAGEMENTS EN PLAINE ET DEBIT RECORDS.

3. LES LIMITES DE L'AMENAGEMENT

Quatre types de limites de l'aménagement se distinguent aujourd'hui.

3.1. La valorisation de la plaine d'inondation de 16 800 ha ne devrait plus permettre la divagation des eaux de crue.

La haute Plaine du Pô est une région agricole dynamique d'importance nationale. Elle est caractérisée par un habitat rural dense et des nombreux centres locaux. La zone étudiée est aussi parcourue par les grandes voies de communication reliant Turin au Midi français et à la Ligurie occidentale. La contribution de chaque cours d'eau à la plaine d'inondation est la suivante : pour le Cluson, 890 ha soit 5,3 % de la surface totale ; pour le Pellice, 2700 ha (16,1 %) ; pour le Haut Pô, 1160 ha (6,9 %) ; pour la Varaita, 4280 ha (25,5 %) ; pour la Maira, 600 ha (3,6 %) ; pour la Grana, 1070 ha (6,4 %) ; et pour le Pô, 6100 ha (36,2 %) /10/. L'individualisation des dommages se fait à partir des quinze grandes crues suivantes : octobre 1839 et 1896 ; septembre 1920 ; octobre-novembre 1945 ; septembre 1947 ; mai 1948 et 1949 ; novembre 1951 ; juin 1953 ; octobre 1953 ; juin 1957 ; mai 1959 ; décembre 1960 ; octobre 1966 ; et mai 1977.

Les dommages subis par les zones agricoles de chaque commune riveraine sont estimés selon le pourcentage que l'aire inondée, au moins à une reprise, occupe sur la surface totale (Fig. 3). Ils ne comprennent que les inondations causées par les cours d'eau étudiés /10/.

3.2. L'accentuation de l'érosion linéaire

des cours d'eau est datée du milieu des années cinquante à l'échelle du bassin du Pô /20/. La cause principale en est la sur-exploitation

RAPPORT IV.9

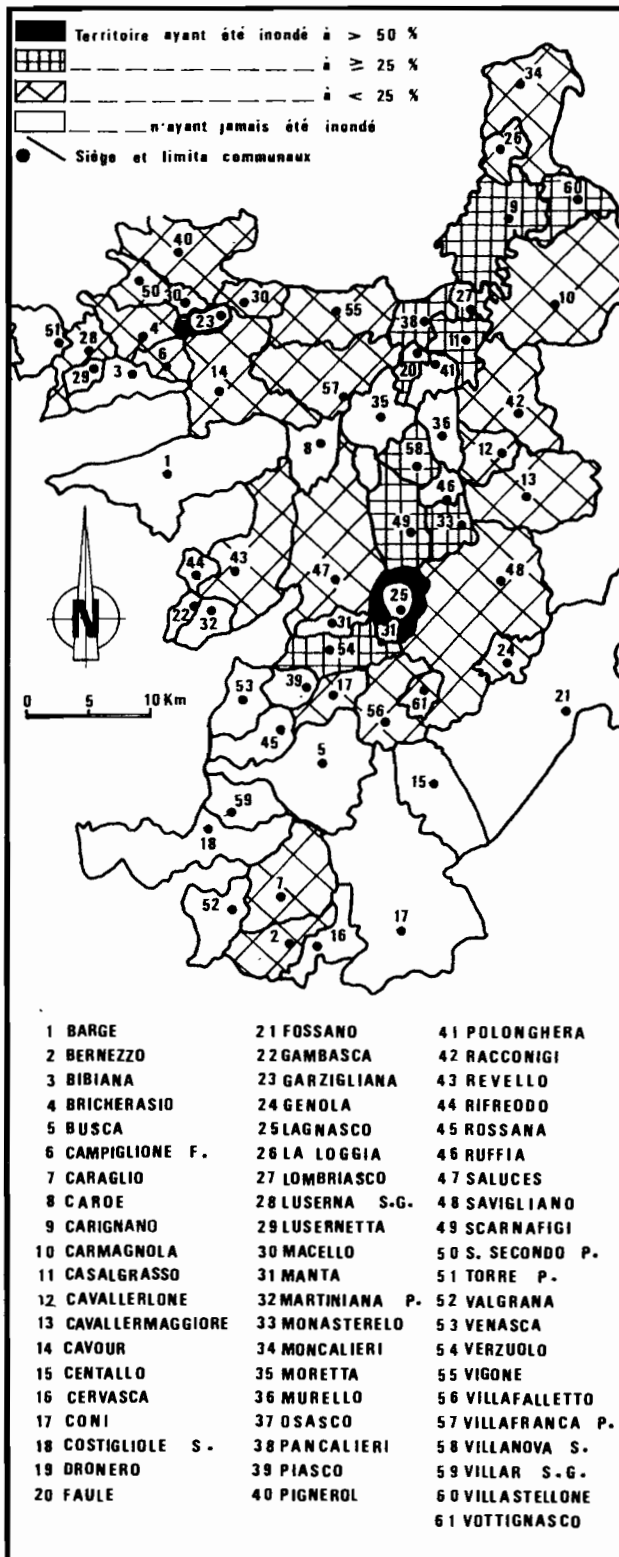


Fig 3. DEGATS SUBIS PAR LES COMMUNES
AGRICOLAS EN CAS D'INONDATION MAXIMALE

des sablières et gravières dans les lits /17/. Une cause annexe serait le changement du régime pluviométrique depuis 1945. Les hauteurs journalières maximales sont en hausse depuis cette date ainsi que les débits de pointe et les volumes ruisselés des crues /14/.

Dans la haute Plaine du Pô, on présente les exemples suivants :

◊ Sur le Pellice, la disparition du modèle de lits à chenaux anastomosés apparaît en comparant les photographies aériennes datées de 1954, 1962 et 1977. L'écoulement se concentre dans un seul chenal. Le dernier méandre du Pellice avant la confluence avec le Pô est coupé par les eaux de la crue mineure de mai 1974 /10/.

◊ Sur le Pô, en 1980 au droit de deux méandres abandonnés par le fleuve dans les années cinquante, le fond de l'ancien lit se trouve à 4,10 - 4,15 m au dessus du niveau des basses-eaux. A la station de Meirano-Moncalieri, un surcreusement de 1,65 m s'observe dans les années 1955-57 /10/. Le profil transversal du fleuve, à Carmagnola, soit 15 km en amont de la station de référence, montre un abaissement d'environ 1,50 m entre les levés de 1960 et 1966 /15/. Sous deux ponts situés dans la même zone, l'abaissement s'établit en moyenne à 3,70 m entre 1957 et 1980 /10/. La conséquence en est la disparition de lits à méandres et de la diminution de l'indice de sinuosité du fleuve.

Canalisé entre des rives de plus en plus rectilignes, le Pô, en cas de crue, ne dispose que d'une longueur moindre de rives à affouiller. Il en résulte une baisse de la turbidité moyenne, à Meirano-Moncalieri, qui passe de 180 g/m³ à 65 g/m³ au delà de 1960 /20/.

Les conséquences de l'accentuation de l'érosion linéaire pour l'aménagement sont graves. Les gabions, les enrochements et les digues sont affouillés à la base. Sous les ponts du Pô, en 1980, la mise à jour des fondations sur 3,50 m est courante. L'ouvrage sur la Grana, emprunté par la Route Nationale n° 22 sur la commune de Caraglio, s'effondre lors de la crue mineure de mai 1973. Des gradins sont mis en place en aval de nombreux ponts donnant au surcreusement des lits de nombreuses irrégularités qui permettent encore l'extension de vastes champs d'inondation, comme lors de la crue de mai 1977.

3.3. Les limites financières imposent bien souvent leurs contraintes aux multiples plans d'aménagement depuis celui de l'ingénieur BRUNATI de 1847 à celui du "Magistrato per il Po" et de la SIMO de 1984. De nombreuses commissions interministérielles se sont penchées sur l'aménagement hydraulique. La plus connue est la "Commission DE MARCHI" qui a rendu ses conclusions en 1970. Après avoir rédigé trois plans successifs de financement entre 1976 et 1978, le Ministère des Travaux Publics n'obtient, en 1978, que 40 milliards sur les 400 demandés. Le plus souvent, les financements ne sont débloqués qu'après une crue catastrophique

comme celle de juin 1957. Ils le sont par des lois spéciales, dans ce cas celle n° 554 de cette même année /10/.

La conséquence est une orientation des crédits vers des ouvrages de type défense passive et non vers la prévision des risques naturels /3/. Ainsi, les débits de pointe ne sont pas jaugés lors de la crue de mai 1977.

3.4. Les limites administratives sont la conséquence du chevauchement des compétences entre différents services nationaux et régionaux.

Dès les années cinquante, le même Ministère, celui des Travaux Publics, coiffe deux services dont l'un, l'"Ufficio Genio Civile" de Turin, veut maintenir de vastes plaines d'inondation tandis que l'autre, le "Magistrato per il Po", autorise les prélèvements des matériaux des lits qui entraînent le surcreusement de ceux-ci. A 50 m du lit mineur, l'autorisation d'exploitation passe à l'"Ufficio Minerale". Afin de décentraliser les compétences, à partir de 1975, l'Etat cède une part de son autorité aux Régions. Ainsi, l'"Ufficio Genio Civile" passe sous la tutelle régionale en 1976. La Région Piémont institutionnalise, par la Loi Régionale n° 41 de juin 1975, quinze "com-prensorio" qui sont les organismes de base de la planification et des forces de propositions. Elle crée un service géologique régional en 1978 et commence l'élaboration d'une carte des risques naturels en signant une convention avec le CNR-IRPI. Ce dernier est l'un des trois laboratoires du Ministère de la Recherche Scientifique créés en 1973 pour étudier les causes et effets des calamités naturelles. On aboutit assez vite à la perte de la notion d'intérêt public. Les intérêts d'un "com-prensorio" ou d'une Région peuvent être antagonistes et leurs possibilités de financement très variables. Pour lutter contre les tendances centrifuges, le "Comitato di Bacino per il Po", embryon d'une Agence de Bassin, est mis en place le 28 novembre 1983. Il a une structure de décision restreinte associant représentants de l'Etat et des Régions. Il est dirigé par le directeur du "Magistrato per il Po" /2/.

4. PROSPECTIVES

A court terme, des réalisations en cours doivent être amplifiées en se servant des services et des outils existants. Il est exclu de changer la vocation de la haute Plaine. Elle doit rester un vaste champ d'inondation et de décantation, lors des crues, même si quelques initiatives ont altéré ce rôle. D'ailleurs, le dernier projet d'aménagement maximal du Pô, daté de 1984, ne prévoit aucune intervention notable dans cette zone. /17/.

4.1. La protection des zones les plus fréquemment touchées par les eaux, lors des crues, doit être néanmoins effectuée. Une méthodologie adaptée aux risques naturels existe en Italie, adaptée à la fois à la dynamique des

versants, aux laves torrentielles et aux crues /12/.

Un exemple d'application dans la haute Plaine de cette méthodologie est illustré (Fig. 4).

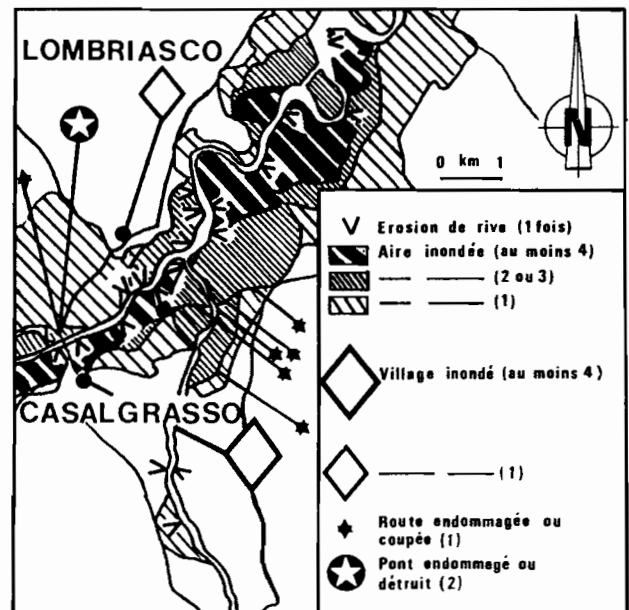


Fig 4. EXEMPLE DE CARTE DU RISQUE DANS LA ZONE DE LA CONFLUENCE MAIRA - PO.

L'échelle de travail est le 1/25000e avant réduction éventuelle. Les documents consultés pour dresser les cartes de risques sont de forme et d'origine très variées : documents météorologiques, données hydro-pluviométriques de "l'Ufficio Idrografico per il Po", comptes rendus inédits de "l'Ufficio Genio Civile", des communes, des "consorzi", du "Magistrato per il Po"... coupures de presse, publications scientifiques, photographies aériennes, images de satellite, levés topographiques et autres travaux de terrains. Le recoupement de ces documents autorise une critique serrée des données.

Etudiant la dynamique fluviale, on distingue les cinq types d'effets géomorphologiques suivants : "suralluvionnements" ; érosions de rive ; coupures naturelles de pédoncule de méandre auxquelles sont assimilées les captures du tronçon terminal d'une rivière par une autre ; champs d'inondation ; dépôts de limons de débordement. Le terme "suralluvionnement" est un italianisme utilisé pour définir le phénomène suivant : la charge solide en graviers, dans la haute Plaine lors d'une crue, est tellement forte que le lit, après celle-ci, domine la campagne riveraine.

Les implications sur le milieu riverain distinguent : les dégâts subis par les zones agricoles avec l'inondation de champs et de pâturages et la destruction des prises des canaux d'irrigation ; ceux touchant les aires

RAPPORT IV.9

bâties avec la submersion de fermes, hameaux, villages et villes ; et ceux causés aux ponts et aux voies de communications.

L'originalité de la démarche consiste à partir des conséquences des crues /10/ /11/ et non de la cause comme dans une étude hydro-météorologique /22/. L'individualisation des crues qui résulte des deux approches est le plus souvent identique. Toutefois, la démarche adoptée permet de connaître les petites crues dont les dégâts sont importants du fait de l'anthropisation croissante et de l'aménagement anarchique du milieu riverain.

4.2. Le système d'annonces de crue s'appuiera sur un nouveau réseau de limnigraphes, en cours d'installation depuis 1982, sur les hauts bassins des affluents du Pô /4/. Le réseau utilise la transmission par radio des données. Il complètera le réseau de 21 stations installées entre 1982 et 1984 sur le Pô et les tronçons terminaux de ses principaux affluents. Le nouveau réseau comptera au total 30 stations en 1987-88. Ainsi seront équipés tous les cours d'eau de la haute Plaine à l'exception de la Grana. La localisation des stations retenues est la suivante : Perosa, à l'ouest de Pignerol sur le Cluson (cf. Fig. 3) ; Torre P. sur le Pellice ; Revello sur le haut Pô ; Venasca sur la Varaita ; Dronero sur la Maira. Meirano-Moncalieri sur le Pô fait partie de la première tranche du réseau installée entre 1982 et 1984.

A Parme où se fait la réception des hauteurs limnimétriques, le "Magistrato per il Po" dispose d'un service télex pour annoncer les crues aux riverains et d'un centre de traitement des données. Le coût total des 51 stations et des infrastructures de Parme est estimé en 1984 à 600 millions de lires dont 450 déjà investis /4/. Depuis 1985, la partie installée du nouveau réseau voit, de façon expérimentale, ses données intégrées à celles des 21 stations existantes sur le Pô et les tronçons terminaux de ses principaux affluents.

4.3. La prévision de crues peut être faite par l'application de la méthode hydro-météorologique. Le système d'annonces projeté ne permettra pas la protection des zones immédiate situées en aval du débouché des Alpes du fait de la vitesse de propagation des crues. Les six bassins montagneux des Alpes Cottiennes disposent d'un réseau pluviographique peu dense (16 appareils pour plus de 2300 km²), situé à basse altitude pour des raisons de commodité d'accès /10/. Malgré ces handicaps, d'après les relevés fournis par les pluviographes complétés par ceux des pluviomètres, les quinze crues examinées (cf. § 3.1), à l'exception de celle de décembre 1960, ont leur genèse dans les parties alpines internes. Dans la haute Plaine du Pô, les grandes crues sont provoquées par des pluies prolongées, durant plusieurs jours, et très étendues spatialement. Les intensités horaires maximales (89 mm en 1 heure à Verzuolo et cinq autres cas égaux ou su-

périeurs à 50 mm en 1 heure) sont enregistrées, entre 1940 et 1970, au contact Alpes - haute Plaine ou dans les basses et moyennes vallées. Elles sont liées à des orages de type "cloud-burst", très localisés, et n'engendrent pas sur les cours principaux de crues notables. Les grands épisodes pluvieux des Alpes Cottiennes sont, de plus, concentrés en quelques mois. Sur un échantillon très complet de 60 crues allant de 1810 à 1977 et datées avec précision, cinq mois concentrent 80 % des crues /10/. Ce sont les suivants : mai, juin, septembre, octobre et novembre. Sur aucun cours d'eau étudié, ce pourcentage n'est inférieur à 78 %. Les crues de la période froide, de décembre à mars, n'ont jamais causé de gros dégâts à l'image de celle, très forte, de décembre 1960. Aucune crue notable n'est datée de juillet sur l'un des cours d'eau étudiés.

Il faut souligner qu'entre 1801 et 1974 le nombre des crues par année dans le Piémont et la Vallée d'Aoste n'est pas en augmentation. Les décennies où le nombre de crues est le plus grand sont les suivantes : 1821-30 et 1851-60 /11/.

La prévision des crues, en temps réel, ne se ferait que cinq mois par an. On n'équiperait, pour la télétransmission des données, que les pluviographes où la corrélation entre les crues à dommages graves et la lame précipitée est satisfaisante. Des seuils pluviométriques pour les durées de 3 et 6 heures de pluie sont prédéterminés pour 7 appareils installés dans les Alpes. Quatre nouveaux pluviographes implantés dans les hautes vallées seraient nécessaires pour mieux connaître la genèse des crues. Ils remplaceraient d'anciens pluviomètres. Au total, le réseau compterait 11 appareils contre les 16, actuellement installés (Fig. 5).

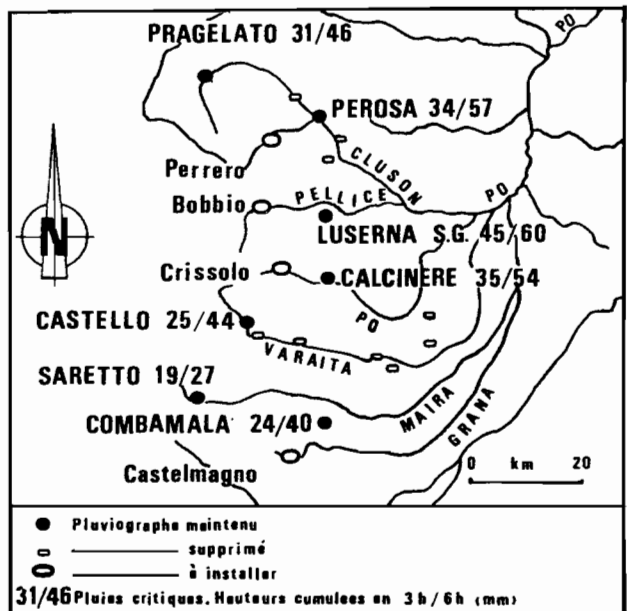


Fig.5. PROJET DE REDEPLOIEMENT DU RESEAU PLUVIOMETRIQUE.

CONCLUSION

Le rôle d'écrêtement et de décantation, en cas de crues, joué par la haute Plaine du Pô, sera conservé malgré la protection des quelques zones les plus fréquemment touchées par les conséquences des hautes eaux. La réglementation du prélèvement des alluvions dans les lits est une mesure concrète prise pour conserver ce rôle.

La mise en place d'un système d'annonces de crue et le projet défendu par l'Auteur d'une prévision hydro-pluviométrique en temps réel assureront une bonne protection des populations en cas d'inondations. Plus ardu, sera de lutter contre la valorisation sauvage de la plaine d'inondation connaissant, en Italie, la difficulté d'accords durables entre particuliers, élus, et représentants de l'autorité étatique ou régionale.

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ ANSELMO V., CARONI E., GIODA A. (1981). "Aspects hydrologiques du bassin occidental du Pô (Italie). Limites des données et problèmes d'application des connaissances", Convegno Intern. su : Problemi Idraulici nell'Assetto Territoriale della Montagna, Milano, maggio, B, 1-15.
- /2/ CAMMARATA G.D. (1984). "Prefazione Atti del Convegno : Per il Po ed i suoi affluenti", 2° Convegno di Idraulica Padana, Parma, 11-18.
- /3/ CATI L. (1981). "Idrografia e idrologia del Po", Ufficio Idrografico del Po, n. 19, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 310 p.
- /4/ CIARMATORI L. (1984). "Il sistema tele-idrometrico del bacino del Po : stato attuale e sviluppi", 2° Convegno di Idraulica Padana, Parma, 1, 377-382.
- /5/ CIRCOLO SUPERIORE DI ISPEZIONE PER IL PO (1950). "Opere idrauliche di terza categoria per la sistemazione del F. Po fra il ponte di Faule ed il ponte di Carignano in sponda destra la Cascina Belvedere del Comune di La Loggia in sponda sinistra", Parma, inédit.
- /6/ DAUSSE M. (1872). "Etudes relatives aux inondations et à l'endiguement des rivières", Imprimerie Nationale, Paris, 220 p.
- /7/ DEMORRA V. (1883). "Cenni monografici sul Fiume Po tra Villafranca e Moncalieri. Proposte di sistemazione", Ed. Vincenzo Bona, Torino, 60 p.
- /8/ FORNO M.G. (1982). "Studio geologico dell'Altopiano di Poirino", Riv. Geogr. Fis. e Dinamica Quat., Vol. 5, n. 1, 129-162.
- /9/ GABERT P. (1962). "Les Plaines occidentales du Pô et leurs piedmonts. Etude géomorphologique", Thèse d'Etat, Louis-Jean, Gap, 531 p.
- /10/ GIODA A. (1981). "Effets géomorphologiques des crues dans la Plaine sud-occidentale du Pô (Piémont). Incidences sur le milieu riverain", Thèse 3è cycle, Univ. de Nice, 366 p.
- /11/ GOVI M. (1975). "Cartographie, documentation et interprétation des crues et coulées de boue dans les Alpes italiennes", Intern. Symposium "Interpraevent 1975", Innsbruck, 2, 209-223.
- /12/ GOVI M. (1984). "Les phénomènes catastrophiques d'origine exogène - Le risque lié aux phénomènes exogènes", 25è Congrès Intern. de Géographie : Les Alpes - The Alps - Die Alpen - Le Alpi, Paris, 31-39.
- /13/ GREGORY K.J., WALLING D.E. (1973). "Drainage basin, form and process : a geomorphological approach", Edward Arnold, London, 456 p.
- /14/ MARAGA F. (1983). "Morphologie fluviale et migration des cours d'eau dans la haute Plaine du Pô (Italie, Partie nord-ouest)", Geol. Jb., Hannover, A 71, 219-236.
- /15/ MARAGA F., MORTARA G. (1981). "Le cave per inerti lungo i corsi d'acqua : rapporti con la dinamica fluviale", Bollettino della Associazione Mineraria Subalpina, Anno XVIII, n. 3-4, 385-395.
- /16/ MIN. LAVORI PUBBLICI (1907). "Relazione sui servizi dipendenti della Direzione Generale delle Opere Idrauliche (1° luglio 1890-30 giugno 1906)", Ed. Manuzio, Roma, Parte II, V, 256 p.
- /17/ MIN. LAVORI PUBBLICI (1984). "Studio e progettazione di massima delle sistemazioni idrauliche dell'asta principale del Po dalle sorgenti alla foce", Magistrato per il Po e SIMO, Ed. Campitalia, Roma, 138 p.
- /18/ PARDE M. (1952). "Quelques indications sur le régime des rivières alpestres piémontaises", Revue de Géog. Alpine, Tome XL, 383-420.
- /19/ ROMITI G. (1959). "La sistemazione del bacino idrografico del Po nella regione piemontese", Ed. Panelli, Torino, 124 p.
- /20/ ROSSETTI M. (1970). "La decadenza morfologica dei corsi d'acqua della regione padana", Il Frantoio, n. 4, aprile, 4-17.
- /21/ UFFICIO GENIO CIVILE TORINO (1957). "Piano regolatore del F. Po. Tronchi : XIX/XX/XXI/XXII/XXIII/XXIV/XXV", Torino, inédit.
- /22/ VIVIAN H. (1977). "Averses extensives et crues concomitantes dans l'Arc alpin. Etude hydrométéorologique", Thèse d'Etat, Ed. Honoré Champion, Paris, 2 tomes, 1309 p.

2. Extension des surfaces agricoles et modifications de l'écoulement. Analyse sur deux bassins de la savane africaine - 1986 (avec Jean Albergel)

Extension des surfaces agricoles et modification de l'écoulement Analyse sur deux bassins de la savane africaine

Jean ALBERGEL, Alain GIODA

Hydrologie/U.R.B. 12 - Orstom, Montpellier

RESUME

Les modifications des états de surface et des paramètres de l'écoulement sous l'impact de l'accroissement de l'emprise anthropique sont étudiées à partir de 1960. A chaque stade du travail, les acquis de la simulation de pluie sur parcelles sont utilisés. Des résultats divergents sont obtenus : diminution de la lame de base et de celle ruisselée à Korhogo-Waraniéné et augmentation très forte de la lame ruisselée à Kogneré-Boulsa. Le rôle des pratiques culturales très différentes est avancé pour expliquer ces divergences à l'échelle des bassins. L'agriculture très intensive, avec billonnage manuel, de Korhogo-Waraniéné favorise l'infiltration à l'inverse des semis de mil très espacés de Kogneré-Boulsa où la dégradation structurale est favorisée.

ABSTRACT

Soil surfaces and flow modifications have been studied since 1960 on two dry savannah small watersheds. These last are both characterised by an important increase of cultivated areas. All the study stages use the simulated rainfall data collected on 19 plots (1m²) in the 80's. In Korhogo-Waraniéné (Ivory Coast), surface runoffs and base flows decreased between 1962-67 and 1968-72. During the 80's, this trend is not reversed. In Kogneré-Boulsa (Burkina Faso, previously Upper-Volta), the surface runoffs were multiplied by two between the 60's and the 80's while the annual rainfall decreased. The part played by agricultural techniques is set up to explain these different results. Intensive mixed farming is done in Korhogo-Waraniéné by traditional methods. Contiguous heads rows are cut off by deep and irregular furrows. Upkeep never stops all year long preserving a good surfacial soil porosity. After a quick weeding, an extensive millet crop is sowed in Kogneré-Boulsa. Between the heads, bare soil surfaces are susceptible to erosion. In some areas, the landscape becomes a Sahelian thorny scrub.

INTRODUCTION

Entre 1951 et 1969, des observations hydro-pluviométriques ont été faites par l'ORSTOM sur 91 bassins représentatifs de l'Afrique centrale et occidentale /12/. Les buts essentiels sont d'établir les relations pluie-débit de différentes fréquences et de fixer les coefficients d'écoulement et de tarissement sur des petits bassins de pays où le manque de données fiables est un handicap à tout développement.

Le programme de simulation de pluie sur parcelles, installées sur les bassins représentatifs /1/ /7/ /15/, utilise aussi les observations hydro-pluviométriques antérieures /12/. Son objectif est la reconstitution des crues observées à l'échelle du bassin à partir des données recueillies sur parcelles. Des pluies simulées ont été faites sur 30 bassins jusqu'en 1985. La bonne marche du programme a nécessité la reprise des observations hydro-pluviométriques dès 1982 sur 7 bassins du Burkina Faso et de la République de Côte d'Ivoire. Entre les deux périodes de mesures, l'anthropisation croissante des bassins entraîne des modifications des états de surface, terme qui recouvre le couvert végétal et les organisations pelliculaires superficielles /10/ /11/. Elle conduit à la modification du rapport pluie-débit.

Les premiers résultats obtenus sur les bassins de Korhogo-Waraniéné et de Kogneré-Boulsa sont présentés ici en y intégrant ceux recueillis sur parcelles.

1. LES TERRAINS D'ETUDE

Les deux bassins étudiés sont situés dans la savane sèche définie, non seulement, par des critères pluviométriques mais aussi par un ensemble de caractères associant couvert végétal, importance des organisations pelliculaires superficielles et organisations internes des sols /18/. Les bassins de Korhogo-Waraniéné et de Kogneré-Boulsa sont situés, respectivement, aux marges méridionales et septentrionales de la savane sèche.

◊ Le bassin de Korhogo est situé à 5 km au sud-ouest de la ville homonyme, la grande cité du nord de la République de Côte d'Ivoire. Le bassin étudié en 1983 et 1984 /13/ est plus petit que celui observé entre 1962 et 1972 /5/. Une nouvelle route et des aménagements rizicoles ont amené le déplacement en amont de la station de contrôle. Le sous-bassin est dit de Waraniéné.

◊ Le bassin de Kogneré-Boulsa se trouve à 6 km au nord-ouest de Boulsa, préfecture du Burkina Faso (ex - Haute-Volta). Il est situé sur le plateau Mossi et à 110 km au nord-est de Ouagadougou. En 1984, lors de la simulation de pluie et de la reprise des obser-

vations hydro-pluviométriques, le bassin présente de nombreux traits sahéliens /3/. Ces derniers obligent à distinguer cette nouvelle période de celle de 1960-1962 /17/.

◊ Les principales caractéristiques morphométriques des bassins étudiés sont présentées dans le tableau suivant.

Bassin	KORHOGO	WARANIENE	KOGNERE BOULSA
Coordonnées N	9°25'-26'		12°41'-4
géographiques W	5°39'-40'		0°34'-3
Superficie (km ²).....	3,63	2,31	19,8
Indice de compacité	1,13	1,11	1,07
Longueur du rectangle équivalent (km)	2,15	1,52	4,7
Indice de pente global (m.km ⁻¹)	15,4	21	4,26
Altitudes (m)	390	400	325
Classe de relief	R3	R3	R3 (R

2. METHODES ET MOYENS

◊ Sur les bassins, l'analyse hydrologique est faite à partir de données recueillies avec les appareils habituels (pluviomètres, pluviographes, échelles limnimétriques, limnigraphes, moulinets pour les jaugeages).

◊ Les méthodes employées pour reconstituer les crues sur les bassins à partir des données des parcelles, par l'application du modèle "SIMULATEUR" sont codifiées /1/ /6/. Cinq étapes peuvent se distinguer.

2.1. La cartographie des états de surface est nécessaire pour fixer le poids de chaque parcelle dans le modèle.

Sur le bassin de Korhogo-Waraniéné, les cartes d'occupation du sol dressées en 1962, 1964 et 1969 ont servi de documents de base. Déjà, pendant la première période d'observations hydro-pluviométriques (1962-1972), l'influence de la mise en culture croissante du bassin et donc des modifications des états de surface avait obligé à séparer les périodes 1962-1967 et 1968-1971 dans l'analyse hydrologique /5/. Pendant la saison sèche 1982-1983, un levé au topofil a été fait, définissant des mailles de 100 m x 100 m, pour mettre à jour la cartographie /13/ /18/.

Sur le bassin de Kogneré-Boulsa, l'interprétation des photographies aériennes de 1956 et 1980 a été faite pour comparer les périodes de suivi hydrologique 1960-1962 et 1984 /3/.

RAPPORT I.9

2.2. Le choix des sites d'implantation des parcelles suit la cartographie. Les parcelles choisies, de 1m² de surface, doivent représenter les principaux états de surface rencontrés sur le bassin. Le nombre de parcelles testées ne dépasse pas la douzaine par bassin.

2.3. Le protocole des pluies simulées reproduit les précipitations de fréquence annuelle et décennale humide. La succession des pluies simulées est faite de manière à avoir des indices des pluies antérieures différents avant chaque expérimentation /9/. Avec 7 pluies au maximum, une large gamme de valeurs d'indices est balayée. Le protocole est identique pour toutes les parcelles d'un même bassin. Il varie en fonction de critères pluviométriques selon la région étudiée.

2.4. La campagne de pluies simulées a lieu en saison sèche afin d'avoir avant la première précipitation un état d'humectation du sol minimum.

Les mini-simulateurs de pluie utilisés à Korhogo-Waraniéné et à Kogneré-Boulsa sont identiques et dérivent d'un prototype mis au point en 1977 en République de Côte d'Ivoire /4/.

L'état d'humectation des sols est connu par des mesures d'humidité pondérale. Des échantillons sont prélevés, avant chaque pluie simulée, dans l'anneau de garde de chacune des parcelles. Ces mesures assurent un contrôle des valeurs des indices des pluies antérieures.

Le dépouillement et l'interprétation de l'ensemble des données recueillies sont codifiés /2/ /6/ /14/.

2.5. La fonction de calage du modèle "SIMULATEUR" est la corrélation entre les crues reconstituées à partir des mesures sous pluies simulées et celles réellement observées sur le terrain.

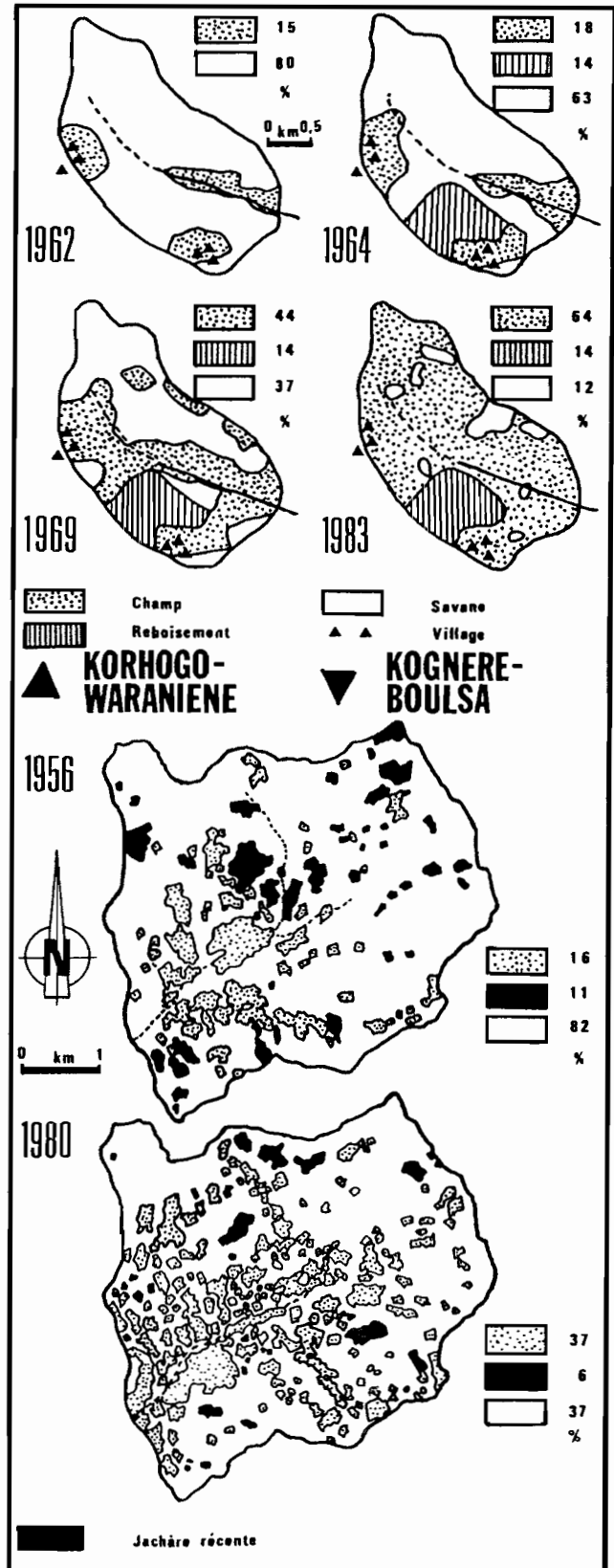
3. RESULTATS

Les modifications des états de surface et des paramètres de l'écoulement avec la mise en cultures croissante des bassins sont successivement examinées en bénéficiant des acquis de la simulation de pluie.

3.1. L'évolution des états de surface est une conséquence directe de celle de l'occupation des sols illustrée par les figures 1. Les pourcentages de la surface totale du bassin qu'occupent les champs, les jachères récentes, les reboisements et la savane arbustive du climax sont présentés à droite des figures.

◊ Sur le bassin de Korhogo, les principales cultures sont les suivantes : mil, maïs, riz, igname, arachide. Les jachères, non cartographiées dans les années soixante, sont en 1983 rares et durent quelques années au maximum.

Fig 1. EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCUPATION DU SOL.



Les tecks constituent l'essentiel de la zone reboisée avec 80 % de la surface totale. Le reste est occupé par des anacardiés.

◊ Sur le bassin de Kogneré-Boulsa, le mil est quasiment la seule culture. Entre 1956 et 1980, les jachères récentes voient leurs surfaces diminuées environ par 2 tandis que les zones érodées, impropres à l'agriculture, sont presque multipliées par 20 ! Elles passent de 1,2 %, avec une distribution spatiale ponctuelle, à 20,4 % (Fig. 2).

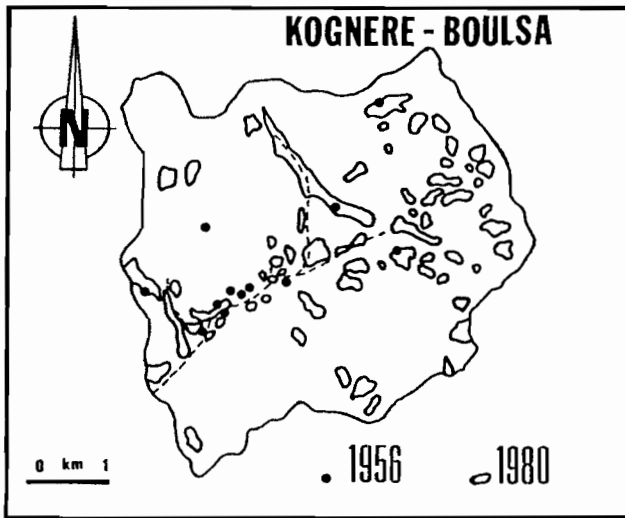


Fig2. EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES ZONES ÉRODÉES

Les résultats de la simulation de pluie, effectuée sur 8 parcelles à Korhogo-Waraniéné et sur 11 à Kogneré-Boulsa, montrent l'importance sur le ruissellement du facteur états de surface. Ce terme recouvre le couvert végétal et les organisations superficielles du sol [2]. Seule, la forme de la présentation des résultats est différente car les protocoles adoptés sur les deux bassins ne sont pas identiques.

◊ Sur le bassin de Korhogo-Waraniéné, la somme des lames précipitées (ΣP) et celle des lames ruisselées (ΣLr) sont confrontées dans le tableau suivant. La gamme des valeurs de l'indice des pluies antérieures adopté (IK) [6/9] est fournie. L'aptitude au ruissellement est donnée par le coefficient de ruissellement moyen (Krm) à savoir :

$$Krm = (\Sigma Lr / \Sigma P) \cdot 100 \quad (1)$$

Année hydrologique	1962	1963	1964	1965	1966
	-	-	-	-	-
	1963	1964	1965	1966	1967
$k \cdot 10^{-3}$	(8,5)	8,96	(8,5)	9,97	9,40
Année hydrologique	1967	1968	1969	1970	1971
	-	-	-	-	-
	1968	1969	1970	1971	1972
$k \cdot 10^{-3}$	9,73	9,74	10,5	11,1	10,6

◊ Sur le bassin de Kogneré-Boulsa, la relation linéaire entre les termes P et Lr est tracée pour les différentes parcelles (Fig. 3). Cette relation s'observe quand un régime permanent de ruissellement s'établit à partir d'un certain seuil de hauteur de pluie [14]. L'aptitude au ruissellement est jugée sur la première pluie simulée de fréquence décennale (96,7 mm).

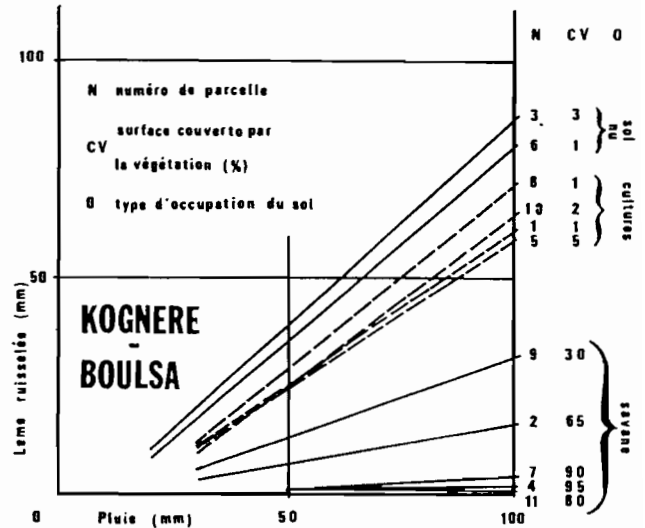


Fig3. LAME RUISSÉEE EN FONCTION DE LA LAME PRÉCIPITÉE POUR LA PREMIÈRE PLUIE SIMULÉE

3.2. L'évolution de l'écoulement, à l'échelle des bassins, distingue la lame de base (Lb) de la lame ruisselée (Lr).

◊ Sur le bassin de Korhogo (3,63 km²), cette évolution est d'abord présentée entre 1962 et 1972. La reprise des observations hydropluviométriques sur le sous-bassin de Waraniéné en 1983 et 1984 ne permet plus de comparer les écoulements de base avec ceux de la période de suivi antérieure. Il n'y a plus de concordance entre le bassin topographique (2,31 km²) et le bassin hydrogéologique (env. 3,5 km²). Entre les bassins de Korhogo et de Waraniéné, seules les lames ruisselées spécifiques sont comparables.

* L'évolution de lame de base est appréhendée par le biais du coefficient de tarissement (k) présenté dans le tableau suivant.

PARCELLE	3	4	5	6	7	8	9	10
ΣP	500	503	530	492	498	499	594	555
ΣLr	232	210	38	218	336	283	291	253
Krm	46	42	7	44	67	57	49	46
IK	0/86	0/87	0/91	0/91	0/86	0/82	0/87	0/80
OCCUPATION DU SOL	cultures		friche	friche	sol	nu	friche	

RAPPORT I.9

L'accroissement assez régulier du coefficient k correspond à une accélération du déstockage de la nappe sous l'impact de l'augmentation des zones cultivées /5/.

* L'évolution de la lame ruisselée montre une diminution variant entre 12 et 14 % pour les crues de récurrence 2, 10, 20, 50 et 100 ans. La lame décennale, pour une pluie de 104 mm, est estimée à 33 mm (1962-1967) et à 29 mm (1968-1971) /5/.

Afin de passer des lames relevées à Korhogo à celles de Waraniéné, une homogénéisation des données est nécessaire pour les raisons suivantes :

- différence de superficie entre les deux bassins ;
- évolution de la répartition spatiale et temporelle des états de surface sur les deux bassins.

La méthode RODIER-AUVRAY pour le calcul des lames décennales /15/, datée de 1965, est actualisée /16/. Le coefficient de ruissellement (K_r) pour une averse de 100 mm, proche de celle de récurrence décennale à Korhogo (104 mm), varie peu sur les bassins dont la surface est d'environ 3 km². Ces derniers sont de mêmes classes de pente et de perméabilité. Adopter une valeur maximale de 32 % pour K_r est conseillé sur les deux bassins /J.A. RODIER, comm. écrite /. Rappelons que tout abattement spatial des précipitations avait été écarté entre la station de référence, Korhogo-Aéroport (ASECNA-ANAM), et le bassin de Korhogo (3,63 km²) /5/. Sur le bassin de Waraniéné, encore de plus petite taille, nous écartons aussi cet abattement.

L'apport du modèle "SIMULATEUR" (cf. § 2.), est utilisé pour résoudre le problème de l'évolution des états de surface.

◊ Sur le bassin de Waraniéné, nous avons cherché, comme à la Mare d'Oursi /8/, la simultanéité des mesures hydrologiques et de la cartographie des états de surface faites en 1983 et 1984 /13/. La lame décennale calculée (L_{rc}) sur le bassin de Waraniéné (41 mm) a une valeur très proche de celle équivalente à Korhogo (40,6 mm). Dans les deux cas, la hauteur de pluie et la valeur de l'indice des précipitations antérieures entrées dans le modèle sont identiques. Les principaux états de surface du bassin de Korhogo se rencontrent sur celui de Waraniéné /13/.

Selon le modèle "SIMULATEUR", bien que la superficie du bassin de Waraniéné ne représente que les deux-tiers de celui de Korhogo, la lame ruisselée décennale n'augmente pas de façon significative.

◊ Sur le bassin de Kogneré-Boulsa, le coefficient de ruissellement (K_r) de chaque crue est ramené à un indice des précipitations antérieures /17/. En ramenant cet indice à la valeur médiane de 35, observée en 1960-1962,

les coefficients de 1984 sont environ 2 fois inférieurs à ceux de la période de suivi antérieure /3/ (Fig. 4). Il est à noter que l'indice des pluies antérieures de 1984 n'atteint que la valeur médiane de 17.

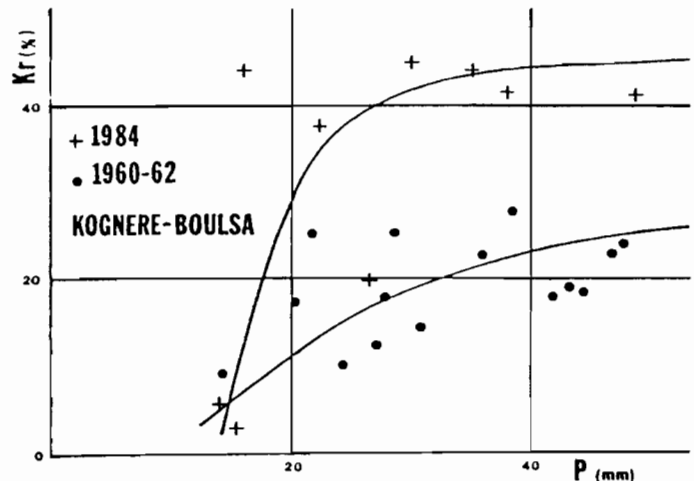


Fig. 4. COEFFICIENTS DE RUISSÈLEMENT RAMENÉS À UN INDICE D'HUMIDITÉ IH=35 EN FONCTION DE LA PLUIE MOYENNE.

4. DISCUSSION

◊ Sur le bassin de Korhogo-Waraniéné, les paramètres de l'écoulement sont marqués par une diminution assez faible entre 1962 et 1972, voire, par une stabilisation ces dernières années.

L'agriculture pratiquée par les Sénoufos est l'une des plus intensives de l'Afrique de l'ouest. Les billons, faits à la "daba" (grande houe mesurant jusqu'à 40 cm de large) peuvent atteindre près de 1 m de hauteur. Ces dimensions maximales s'observent dans les champs d'igname et de riz qui sont parmi les cultures les plus répandues. Les billons ne sont toutefois pas parfaitement alignés et les lignes inter-billons présentent un micro-relief accusé provoqué par le caractère manuel de leur creusement. Le sarclage, poursuivi même en saison des pluies, détruit les pellicules de battance qui se développent entre les pieds. Le couvert dense existant entre ces derniers favorise, d'autre part, l'interception des gouttes de pluie par le feuillage et constitue donc un obstacle à la grande extension spatiale des pellicules de battance.

◊ Sur le bassin de Kogneré-Boulsa, la lame ruisselée double entre les deux périodes de suivi hydrologique.

L'augmentation démographique très forte (2,6 % par an) et une pluviométrie régionale déficitaire depuis 1972-73 poussent les Mossis à adapter leur stratégie. Les paysans étendent les zones cultivées pour lutter contre la faiblesse des rendements. Des zones érodées, impropres à toute agriculture, apparaissent

surtout dans les régions du raccord versants-marigot (chanfreins). Les sols de ces zones voient un décapage de leur horizon humifère, une mise à nu de l'horizon minéral B qui s'indure et se couvre de pellicules. La zone la plus cultivée, caractérisée par des surfaces pelliculaires sans sables grossiers ni gravillons, est plus résistante à l'érosion hydrique. Les cultures y deviennent encore plus extensives favorisant le développement de grandes zones dénudées à pellicules de battance entre les pieds de mil. Après sarclage, un simple travail superficiel de type binage est effectué avant les semis. L'augmentation du ruissellement des zones cultivées du plateau se combine à une érosion laminaire remontante du bas-fond, visible sur les clichés de 1980.

Dans les zones de vieilles jachères, la végétation de la savane arbustive ne se reconstitue pas. Ces jachères présentent de vastes zones nues pelliculaires, semblables aux surfaces sahéliennes, où le recrû ne paraît constitué que d'épineux (*Balanites aegyptiaca* sp.). L'érosion en nappes y est marquée, formant des micro-dénivelées en forme de marches /3/.

CONCLUSION

Les études antérieures au programme de simulation de pluie considèrent généralement les relations précipitation-débit comme immuables sur chacun des bassins de la savane africaine et du Sahel. Ceci s'observe si les conditions d'humectation du sol sont "moyennes", au sens de caractéristiques du milieu de la saison des pluies.

Les bouleversements provoqués par l'explosion démographique en milieu rural et des déficits pluviométriques prolongés dans certaines régions, obligent à reprendre l'étude d'anciens bassins représentatifs ; il n'est pas possible d'affirmer a priori que la mise en culture entraîne une diminution ou une augmentation des paramètres de l'écoulement et de se contenter d'appliquer un coefficient correcteur systématique aux relations pluie-débit.

L'utilisation du mini-simulateur de pluie permettra d'étendre aux zones non observées par les appareils hydrologiques classiques les données actualisées recueillies sur les bassins versants représentatifs.

BIBLIOGRAPHIE

J.H.M. : Abréviation utilisée pour les Journées Hydrologiques de Montpellier, Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris, septembre, sous presse.

/1/ ALBERGEL J., CASENAVE A., VALENTIN C. (1985). "Modélisation du ruissellement en zone soudano-sahélienne. Simulation de pluie et cartographie des états de surface", J.H.M.

/2/ ALBERGEL J., RIBSTEIN P., VALENTIN C. (1985). "L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso", J.H.M.

/3/ ALBERGEL J., VALENTIN C. (1986). "Sahélisation d'un

petit bassin versant soudanien : Kogneré-Boulsa au Burkina Faso", Colloque : Nordeste-Sahel, Institut des Hautes Etudes de l'Amérique Latine, Paris, janvier, sous presse.

/4/ ASSELINE J., VALENTIN C. (1978). "Construction et mise au point d'un iniltromètre à aspersion", Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, XV, n° 4, 321-349.

/5/ CAMUS H., CHAPERON P., GIRARD G., MOLINIER M. (1976).

"Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972", Travaux et Documents n° 52, ORSTOM, Paris, 81 p.

/6/ CASENAVE A. (1982). "Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures", Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., XIX, n°4, 207-227.

/7/ CASENAVE A., GUIQUEN N., SIMON J.M. (1982). "Etudes des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale", Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., XIX, n° 4, 229-252.

/8/ CHEVALLIER P. (1982). "Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute-Volta)", Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., XIX, n°4, 253-297.

/9/ CHEVALLIER P. (1983). "L'indice des précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs", Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. XX, n°3-4, 179-189.

/10/ COLLINET J., LAFFORQUE A. (1978). "Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sol de Haute-Volta", ORSTOM, Abidjan, 2 Vol., 129 + 123 p.

/11/ COLLINET J., VALENTIN C. (1979). "Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques", Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., XVII, n°4, 283-328.

/12/ DUBREUIL P., CHAPERON P., GUISSAFARE J., HERBAUD J. (1972). "Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951-1969", ORSTOM, Paris, 916 p.

/13/ GIOUDA A., SIMON J.M., ETIENNE J. (1985). "Comparaison entre les relations précipitations-débits déduites de la simulation de pluies sur parcelles (1983) et celles observées à l'échelle du bassin (1968-71 et 1983-84). Waraniéné-Korhogo - Côte d'Ivoire", ORSTOM, Abidjan, 68 p.

/14/ LAFFORQUE A., CASENAVE A. (1980). "Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transferts pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie", La Houille Blanche, n°4-5, 243-249.

/15/ RODIER J., MEUNIER M., PUECH C. (1984) "Le point sur les méthodes de calcul des débits de crues décennales en Afrique de l'ouest et Afrique centrale", Bulletin de liaison du CIEH, Ouagadougou, n°58, octobre, 2-9.

/16/ RODIER J.A. (1985). "Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel", Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., XXI, 1984-85, n°2, sous presse.

/17/ SIRCOULON J., KLEIN J.C. (1964). "Etude hydrologique des bassins expérimentaux de l'Est-Volta", ORSTOM, Paris, 77 p.

/18/ VALENTIN C. (1985). "Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques.", J.H.M.

3. Recherche d'un protocole standard d'épandage d'insecticide dans les rivières traitées par le programme de lutte con l'onchocercose - 1988 (avec *Luc Le Barbé*)

Recherche d'un protocole standard d'épandage d'insecticide dans les rivières traitées par le programme de lutte contre l'onchocercose

(Programme de lutte contre l'onchocercose
en Afrique de l'Ouest)

Luc LE BARBÉ (1) et Alain GIODA (2)

RÉSUMÉ

Pour contrôler l'onchocercose en Afrique de l'Ouest, un programme de l'OMS, l'OCP (Onchocerciasis Control Programme), mène depuis plus de quinze ans une lutte antivectorielle en procédant à des épandages aériens d'insecticides sur les gîtes larvaires du vecteur, localisés dans les zones à courant relativement rapide des rivières.

A partir de neuf traçages effectués dans des rivières très diverses de la zone du programme, les auteurs proposent un protocole standard de traitement, établi à partir du modèle monodimensionnel de la diffusion et qui ne nécessite que la connaissance de paramètres simples à collecter soit à partir de jaugeages soit à partir de cartes topographiques.

Les auteurs précisent les incertitudes des résultats obtenus pour en déduire des coefficients de sécurité à appliquer et définir les limites d'application du protocole. En dernier lieu les auteurs proposent un mode d'essai *in situ* des insecticides.

MOTS CLÉS : Protocole standard de traitement — Epandage aérien d'insecticide — Onchocercose — Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

TOWARDS A STANDARD INSECTICIDE SPRAYING CONTROL IN RIVERS TREATED BY ONCHOCERCIASIS CONTROL PROGRAMME

The aim of the OCP (WHO'S Onchocerciasis Control Programme) is to control the onchocerciasis or river blindness (a tropical parasitosis) in Western Africa. This programme has been carrying out for more than fifteen years a drive using aerial insecticide spraying on vector larvae zones located in the river reaches characterized by a relatively fast flow.

The data are collected from nine tracing carried out in very diverse rivers of the study field. The authors propose a standard treatment procedure derived from a one dimensional diffusion model which only requires simple parameters to be collected either from gaugings or from topographic maps.

The authors specify result uncertainties in order to deduce security coefficients to apply and define limits of treatment procedure. Finally, directions for insecticide experiments "in situ" are proposed.

KEY WORDS: Treatment procedure — Insecticide spraying — Onchocerciasis — West Africa.

INTRODUCTION

L'onchocercose est une maladie débilitante due à la prolifération dans le corps humain de microfilaires qui peuvent envahir le globe oculaire et ainsi provoquer la cécité. Le vecteur de cette maladie est une petite mouche « *Simulium damnosum* » qui à l'état larvaire se développe dans les zones à courant relativement rapide des rivières. Des foyers très importants de cette maladie existent donc le long de certains cours d'eau d'où le nom qui lui est parfois donné de « cécité des rivières ».

(1) Hydrologue ORSTOM, BP 11416, Niamey (Rép. du Niger).

(2) Hydrologue ORSTOM, Centre ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex.

L'onchocercose est très répandue en Afrique de l'Ouest et outre son aspect dramatique sur le plan humain, elle est un frein au développement et à la mise en valeur des terres fertiles bordant les fleuves.

Aussi depuis plus de quinze ans, un programme de l'OMS, l'OCP (Onchocerciasis Control Programme), a été mis en place pour éradiquer cette maladie en s'attaquant au vecteur par des épandages aériens d'insecticide sur les gîtes larvaires qui sont facilement localisables. Afin d'optimiser ses procédures d'épandage, l'OCP a demandé à l'ORSTOM de réaliser une étude expérimentale de la propagation de l'insecticide dans les rivières et d'en tirer des procédures opérationnelles de traitement.

1. LE CADRE

1.1. LES OBJECTIFS

Avant d'être utilisés par l'OCP, les insecticides subissent une série de tests, en laboratoire et dans les conditions naturelles. L'efficacité du produit est évaluée directement par le taux de mortalité qu'il entraîne sur une population larvaire soumise à diverses concentrations durant des temps également variables.

Pour les deux principaux insecticides utilisés par l'OCP, le B.t. (insecticide biologique) et l'abate ou téméphos (organophosphoré), ces essais ont montré que le taux de mortalité était lié à la dose (produit de la concentration par le temps de passage) et à la température par des fonctions de type :

$$y = a \log (D_0) + b T_e + c \text{ (Université du Québec, 1985),}$$

où : a, b et c sont des constantes,
y le probit du taux de mortalité,
D₀ la dose = $\int c(t) dt$,
T_e la température.

Le premier objectif de l'étude était donc de trouver les moyens de pouvoir prédire pour chaque épandage quelle sera la dose à différentes distances du point d'injection et d'en déduire un protocole standard de traitement.

On peut concevoir pour d'autres produits des modes d'action différents. Il nous est donc apparu nécessaire de pouvoir prédire, outre la dose, la concentration maximale et l'écart type de la courbe concentration-temps, qui est un bon estimateur du temps de passage. Enfin il fallait également proposer à l'OCP un moyen d'essai *in situ* des insecticides dont l'efficacité est liée à la dose.

1.2. LES CONTRAINTES

Sachant que l'OCP traite chaque semaine, entre 3 000 et 15 000 km d'un réseau de 50 000 km de rivières, il était difficile, dans un souci d'application des résultats, d'employer un modèle de propagation qui ne soit pas monodimensionnel. De même, les paramètres de ce modèle devaient être facilement obtenus par le biais de données accessibles à partir des jaugeages (débits, vitesse, largeur) et des cartes topographiques éditées (pente du fond du lit des rivières). De telles simplifications se traduisent obligatoirement par des incertitudes dans les prédictions. Il fallait donc les préciser pour en déduire des valeurs de coefficients de sécurité et les limites du protocole qui pourrait être proposé.

1.3. LA MÉTHODE

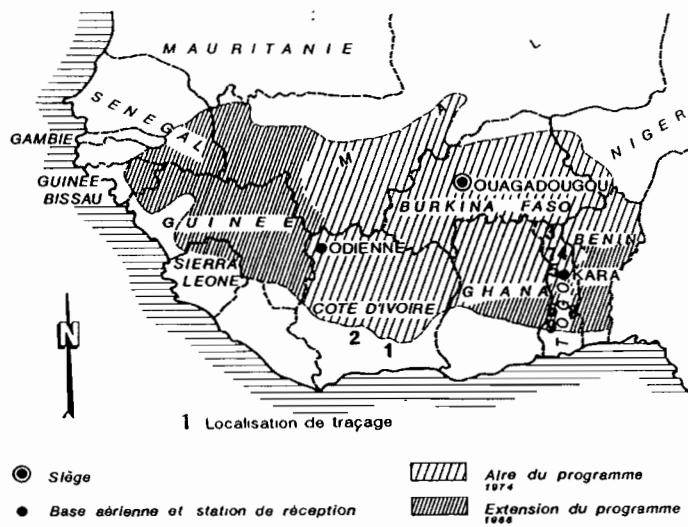
L'idéal aurait été de pouvoir suivre sur différents biefs représentatifs, la propagation de la vague d'insecticide par prélèvements successifs en différentes sections à l'aval du point d'injection. Une telle méthode n'a pas été retenue, le dosage des insecticides utilisés étant à la fois délicat et onéreux. On a donc, sur l'échantillon de biefs présenté dans le tableau I, suivi la propagation d'un traceur, la Rhodamine B, injecté de la même façon que les insecticides. A partir de ces traçages, il fallait donc essayer de trouver les moyens de déterminer les relations liant les paramètres du modèle choisi aux caractéristiques de l'écoulement et du produit utilisé.

TABLEAU I
Principales caractéristiques des biefs étudiés

Localisation	Date	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	La (m)	Lo (m)	Pente %	Nb
BANDAMA à BAFECAO-MBRIMBO	01-11-84	74	0,203	365	7520*	0,8	7
BANDAMA à BAFECAO-MBRIMBO	31-01-85	43	0,132	365	7520*	0,8	7
SASSANDRA à BUYO-SOUBRE	04-04-85	270	0,460	225	6850	0,03	3
OTI à SANSANNE-MANGO	04-10-85	277	0,700	90	3150	0,01	3
KERAN à TITIRA	07-10-85	46,3	0,470	49	5975	0,154	5
KAMA à BASSAR	18-10-85	0,6	0,094	9,63	2740	0,133	4
GBAN-HOU à BROUFFOU	25-10-85	1,23	0,170	12,9	2700	0,49	5
KPELOU à KPESSIDE	11-10-85	6	0,250	27,5	2146	0,8	3
MONO à N'GAMBOTO(1)	14-11-85	7,1	0,103	55	2950	0,026	4
MONO à N'GAMBOTO(2)	20-11-85	2,73	0,059	48	3250	0,026	2
WAWA à KESSIBO-WAWA	14-02-86	0,75	0,130	29	3180	0,38	3

* Valeur très approximative incluant la longueur d'une ramification

- Q = débit
- V = vitesse d'écoulement
- La = largeur moyenne du bief étudié
- Lo = longueur du bief étudié
- Nb = nombre de sections de prélèvements.



- 1. Bandama à Bafécao (2 traçages); 2. Sassandra à Soubré; 3. Oti à Sansanné-Mango; 4. Kéran à Tirira; 5. Kama à Bassar;
- 6. Gban-Hou à Brouffou; 7. Kpélou à Kpéssidé; 8. Mono à N'Gamboto (2 traçages); 9. Wawa à Kessibo-Wawa.

FIG. 1. — Carte de localisation. Traçage à la Rhodamine B.

2. LES TRAÇAGES

2.1. LES RÉSULTATS DES TRAÇAGES

Sur les différentes courbes concentration-temps observées, nous avons calé de façon satisfaisante l'équation de diffusion dans un modèle monodimensionnel,

$$C(x,t) = \frac{M}{Q} \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot D \cdot t}} \frac{x}{t} \exp\left(\frac{V \cdot x}{2D}\right) \exp\left(\frac{-x^2 - t^2 W^2}{4 \cdot D \cdot t}\right) \quad (1)$$

x = distance au point d'injection

t = temps écoulé depuis l'injection

V = vitesse de propagation

D = coefficient de diffusion

W = $\sqrt{V^2 + 4RD}$ = vitesse apparente de la propagation

R = coefficient de disparition de l'insecticide

M = masse injectée

Q = débit

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II. Dans tous les cas, au fur et à mesure que les prélèvements sont faits à une plus grande distance du point d'injection, il est constaté :

- une croissance du coefficient de diffusion (D) ;
- une décroissance du coefficient de disparition (R).

TABLEAU II
Résultats du calage du modèle monodimensionnel (Méthode MARQUARDT)

Localisation	x (m)	V (m s ⁻¹)	D (m ² s ⁻¹)	R (10 ⁻⁵ s ⁻¹)
MONO à N'GAMBOTO (2)	3250	0,056	7,3	1,8
MONO à N'GAMBOTO (1)	181	0,19	0,39	43,0
	2950	0,093	8,7	7,6
KERAN à TITIRA	1000	0,50	12,8	37,0
	1725	0,49	8,7	25,0
	3225	0,54	21,5	21,0
	3725	0,53	19,1	11,3
	5975	0,47	27,8	6,9
KPELOU à KPESSIDE	371	0,17	4,0	15,0
	746	0,24	6,66	6,2
	2146	0,25	7,85	6,0
WAWA à KESSIBO-WAWA	290	0,24	1,22	84
	3180*	(0,12)	(4,6)	(5,2)
GBAN-HOU à BROUFFOU	675	0,24	1,91	4,7
	1072	0,21	2,97	2,7
	1365	0,16	4,60	2,4
	1662	0,17	6,10	1,4
	2700	0,17	5,40	2,2
OTI à SANSANNE-MANGO	3150	0,65	37,3	27,0
	4750	0,67	52,2	18,0
KAMA à BASSAR	480	0,084	1,23	1,3
	1000	0,097	1,42	2,3
	2000	0,100	2,28	1,4
	2740	0,094	2,51	1,3

* relevés incomplets

x = distance à la section d'injection
V = vitesse de propagation

D = coefficient de diffusion
R = coefficient de disparition

2.2. L'INTERPRÉTATION DES TRAÇAGES

D'après FISCHER (1967), admettre un processus de diffusion pour décrire la dispersion revient à poser :

$$D = \overline{u'^2} \int_0^t \Psi(\tau) d(\tau) \tag{2}$$

$\Psi(\tau)$ = fonction d'autocorrélation des vitesses instantanées, quantifiant le brassage.

$$\Psi(\tau) = \frac{\overline{u'(t) u'(t+\tau)}}{\overline{u'(t)^2}}$$

u' = vitesse relative instantanée d'une particule.

Les barres surmontant les diverses expressions indiquent des moyennes faites sur un grand nombre de particules.

Le processus de diffusion ne peut donc être décrit par l'équation de la diffusion que lorsque l'intégrale de l'équation (2) converge et pour des temps t tels que :

$$\int_0^t \Psi(\tau) d(\tau) \approx \int_0^\infty \Psi(\tau) dt$$

$\Psi(\tau)$ variant de 1 pour ($\tau = 0$) à 0 pour ($\tau = \infty$).

Dans ce cas, une échelle de temps pour la diffusion (TDIF) peut être définie :

$$TDIF = \int_0^\infty \Psi(\tau) d\tau$$

Une échelle de longueur pour la diffusion (LDIF) peut être également définie :

$$LDIF = V.TDIF$$

L'échelle de temps (TDIF) peut être évaluée, sur les rivières, par une expression de la forme :

$$TDIF = k \frac{La^2}{Rh.U^*} = k.T1$$

k = constante

La = largeur de la rivière

Rh = rayon hydraulique $\frac{1}{2}$

U^* = vitesse de frottement = $(g.Rh.l)^{\frac{1}{2}}$

g = accélération de la pesanteur : $9,81 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

l = pente d'énergie \neq pente du lit de la rivière.

Rh correspond approximativement au tirant d'eau. Il est donc possible de poser :

$$Rh = \frac{Q}{V.La}$$

soit :

$$TDIF = k.T1$$

avec :

$$T1 = \left(\frac{La^7.V^3}{9,81.Q^3.I} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$LDIF = k.L1 \text{ avec } L1 = \left(\frac{La^7.V^5}{9,81.Q^3.I} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

Les valeurs de la longueur de diffusion sont quelquefois plus grandes que la longueur des biefs à traiter. L'utilisation de l'équation de la diffusion ne sera donc dans ces cas qu'une approximation. Les valeurs des coefficients de diffusion (D) sont variables. Elles sont également croissantes dans le temps.

Le coefficient de disparition (R) est décroissant dans le temps. Cette décroissance est plus difficile à justifier que l'accroissement du coefficient de diffusion. L'hypothèse suivante peut être avancée :

Sur une partie du bief, l'écoulement serait très calme et donc toutes les particules du produit ne participeraient pas immédiatement au phénomène de diffusion. Ceci explique l'importance des « traînes » observées sur les courbes concentration-temps. Ces « traînes » sont d'autant plus importantes que les prélèvements sont effectués près des points d'injection. Ce phénomène a été longuement discuté et analysé notamment par VALENTINE et WOOD (1977) et SABOL et NORDIN (1978). L'ajustement d'une équation de diffusion exclut les traînes ce qui explique les valeurs fortes de R près des points d'injection (cf. fig. 2).

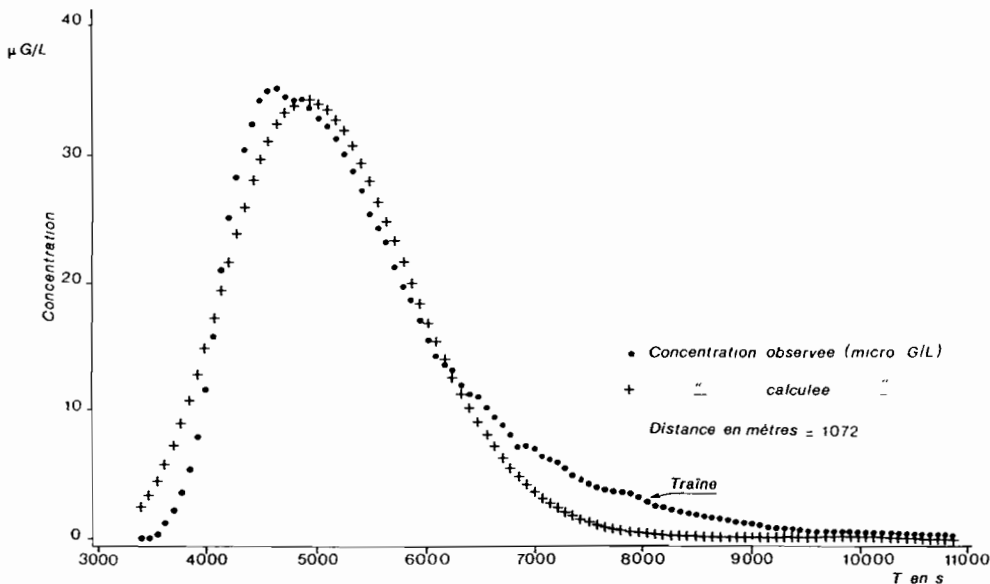


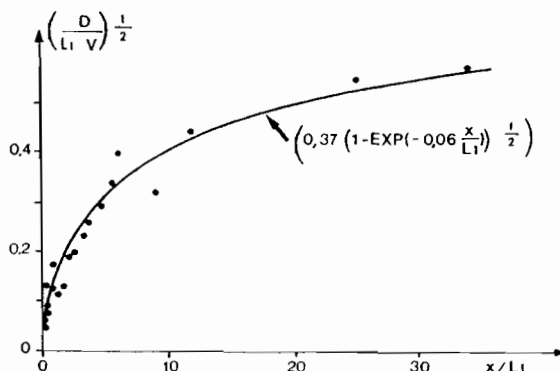
FIG. 2. — Gban-Hou à Brouffou — Traîne sur la courbe concentration/temps observé.

Relier les coefficients de diffusion et de disparition au rapport x/L_1 , c'est-à-dire la distance séparant la section de prélèvement au point d'injection normée par la longueur de diffusion, semble logique.

Pour le coefficient de diffusion, l'expression suivante a été ajustée de façon satisfaisante (fig. 3) :

$$D = b.L_1.V \left(1 - \exp \left(-d \cdot \frac{x}{L_1} \right) \right) \tag{4}$$

b et d, constantes positives (b = 0,37 et d = 0,06).



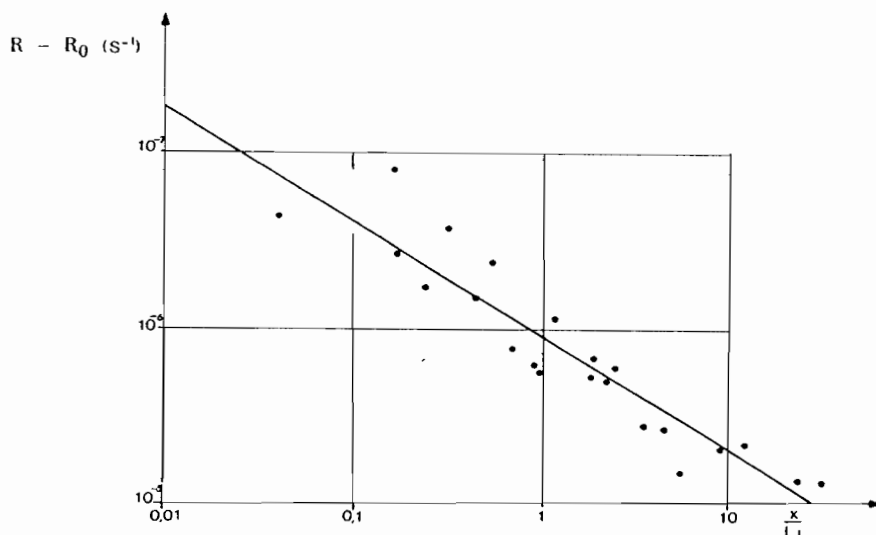
L_1 = longueur de diffusion ; x = distance au point d'injection ; D = coefficient de diffusion ; v = vitesse de propagation.

FIG. 3. — Estimation de D.

Pour le coefficient de disparition et pour $x > 0,01 L_1$, l'expression suivante a été ajustée (fig. 4) :

$$R = R_0 + a \left(\frac{x}{L_1} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad a \text{ étant une constante positive} \quad (5)$$

Dans l'équation (5), R_0 représente le coefficient de disparition de l'insecticide résultant en fait de différents phénomènes : biodégradation, absorption, hydrolyse, etc.



x = distance au point d'injection ; L_1 = longueur de diffusion.

FIG. 4. — Coefficient de disparition en fonction de x/L_1 .

En conclusion il peut être admis que :

— l'expression (4) n'est fonction que des caractéristiques de l'écoulement.

Les coefficients R_0 et a de l'expression (5) sont davantage des caractéristiques du produit. Ce sont donc ces paramètres qu'il faut pouvoir déterminer au cours d'essai *in situ* des insecticides.

Pour estimer la qualité des ajustements faits sur D et R , il est précisé les distributions des erreurs relatives commises sur les trois paramètres des courbes concentration-temps expliquant leur efficacité : la dose, le temps de passage et la concentration maximale (tab. III).

TABLEAU III
Distribution des erreurs relatives

	Effectifs des classes d'erreurs relatives en %							
	-70%	-50%	-30%	-10%	+10%	+30%	+50%	+70%
Doses	5	10	16	48	16	5	0	
Concentrations maximales	0	10	21	38	21	5	5	
Temps de Passage	10	10	21	33	16	10	0	

Les méthodes proposées permettent, dans 80 % des cas, une estimation à ± 30 % de la dose et de la concentration maximale. L'incertitude est plus forte pour les temps de passage : la précision à ± 30 % n'est, en effet, atteinte que dans 70 % des cas.

3. UN PROTOCOLE STANDARD DE TRAITEMENT

3.1. LES PARAMÈTRES

3.1.1. Portée

L'intégration sur le temps de l'équation (1) nous permet de définir la dose, $Do(x)$, passant à une distance x du point d'injection.

$$Do(x) = Du \exp \left(- \frac{2x.R}{V + W} \right) \quad (6)$$

Le produit $(4.R.D)$ étant toujours faible devant V^2 , on peut admettre que W est très peu différent de V , nous avons alors :

$$Do(x) = Du \exp \left(- \frac{x.R}{V} \right) \quad (7)$$

La portée $P(Du)$ liée à la dose unitaire est donc telle que :

$$Df = Du \exp \left(\frac{-P(Du).R}{V} \right)$$

Df : dose efficace caractéristique de l'insecticide.

Soit en remplaçant R par l'expression (5) :

$$Df = Du \exp \left(- \frac{P}{V} \left(R_0 + a \left(\frac{P}{L_1} \right)^{-\frac{2}{3}} \right) \right) \quad \text{soit} \quad \ln \frac{Du}{Df} = \frac{P}{V} R_0 + a \left(\frac{P}{L_1} \right)^{\frac{1}{3}}$$

qui peut s'écrire en posant :

$$P_1^* = \frac{1}{L_1} \cdot \frac{V}{R_0} \cdot \ln \frac{Du}{Df} \quad (8)$$

et

$$P_0^* = \frac{V}{R_0 \cdot L_1}; \quad P^* = \frac{P}{L_1}$$

$$P^* + P^{*1/3} \cdot \frac{a}{P_0^*} - P_1^* = 0$$

dont la solution est, si :

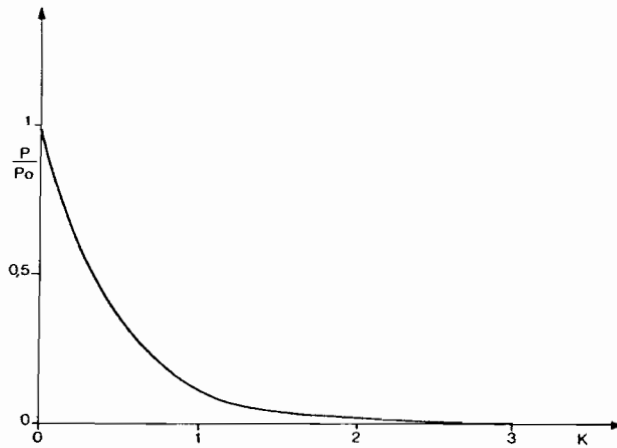
$$K = \left(\frac{a}{3P_0^*} \right) \cdot \left(\frac{2}{P_1^*} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$P^* = P_1^* (1 - f(K))$$

avec

$$f(K) = \frac{3}{2} K \left(\left(1 + \sqrt{1 + K^3} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 + K^3} \right)^{1/3} \right) \quad (9)$$

La fonction $(1 - f(K))$ est représentée sur la figure 5. Les expressions (9) permettent de définir la portée pour une longueur de diffusion et une dose unitaire données.



Avec P = portée ; $P_0 = \frac{V}{R_0} \ln \frac{Du}{Df}$; Du = dose unitaire ; Df = dose efficace ; V = vitesse de propagation ;

$$R_0 = \text{coefficient de biodégradation du produit ; } K = \left(\frac{a}{3R_0} \right) \left(\frac{2.L_1}{P_0} \right)^{\frac{2}{3}} ;$$

L = longueur de diffusion ; a = coefficient de décroissance de R en fonction de $\left(\frac{x}{L_1} \right)^{-\frac{2}{3}}$, $a = 9.10^{-5}$

FIG. 5. — Détermination de la portée en fonction de K .

3.1.2. Maximum de concentration

Le maximum de concentration, C_x , intervient au temps T_x .

$$T_x = \frac{3.D}{W^2} \left(\sqrt{1 + \frac{W^2 x^2}{9.D^2}} - 1 \right) \tag{10}$$

dès que : $\frac{W^2 . x^2}{9.D^2} \gg 1$ et en posant $V \approx W$

en appelant, coefficient d'étalement, le terme $Ke = \left(\frac{D}{V^3} \right)^{\frac{1}{2}}$

on a :

$$C_x = \frac{1}{\sqrt{4n}} Du \exp \left(\frac{-R.x}{V} \right) \frac{1}{Ke.\sqrt{x}} \tag{11}$$

3.1.3. Temps de passage

Nous avons pris, comme estimateur du temps de passage TT , la valeur de quatre fois l'écart type, ET , de la courbe concentration-temps avec :

$$ET = \left[\frac{1}{Du} \int_0^\infty (t-\bar{t})^2 C(x,t) dt \right]^{1/2}$$

avec :

$$\bar{t} = \frac{1}{Du} \int_0^{\infty} t.C(x,t) dt$$

on a alors :

$$ET = \left[2x \frac{D}{V^3} \right]^{1/2}$$

soit :

$$TT = 4 (\sqrt{2x} \cdot Ke) \tag{12}$$

3.1.4. Portées et dosages optimaux

Les dosages unitaires optimaux sont ceux qui permettront pour traiter un bief d'utiliser le moins d'insecticide possible.

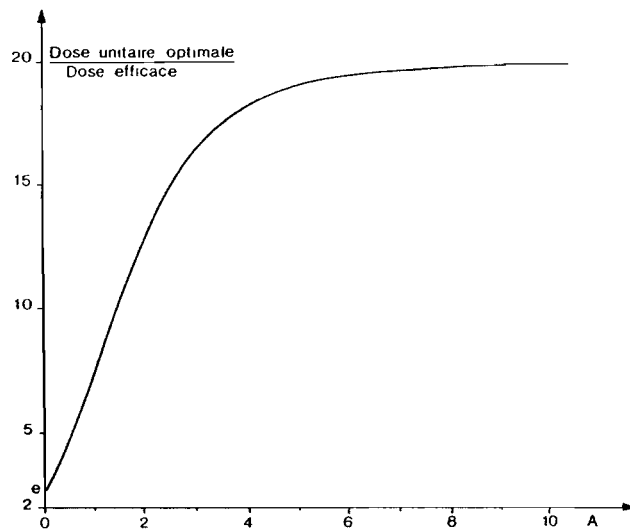
Il est supposé dans un premier temps que l'efficacité d'un épandage est indépendante de ceux faits précédemment en amont. Il faut pour déterminer la dose optimale, minimiser le rapport $Du/P(Du)$. A l'aide de l'expression (10), on peut exprimer la dérivée de ce rapport :

$$\left(\frac{Du}{P(Du)} \right)' = \left(1 - f(K) \left(\ln \frac{Du}{Df} - 1 \right) \right) - \frac{2}{3} f(K) + \frac{K^2}{2\sqrt{1+K^3}} \left((1 + \sqrt{1+K^3})^{2/3} - (1 - \sqrt{1+K^3})^{2/3} \right) \tag{13}$$

La résolution de l'équation $\left(\frac{Du}{P(Du)} \right)' = 0$ a été faite numériquement pour différentes valeurs du paramètre suivant :

$$A = \left(\frac{a}{3R_0} \right) \left(\frac{V}{2R_0.L_1} \right)^{-\frac{2}{3}}$$

La courbe $Dx/Df = g(A)$ est représentée sur la figure 6, Dx étant la dose unitaire optimale et Df la dose efficace.



Avec R_0 = coefficient de biodégradation du produit ; V = vitesse de propagation . L_1 = longueur de diffusion ;

FIG. 6. — Détermination de la dose unitaire optimale en fonction de $A = \left(\frac{a}{3R_0} \right) \left(\frac{V}{2 R_0.L_1} \right)^{-\frac{2}{3}}$.

Pour $A = 0$, c'est-à-dire s'il n'y a pas lieu de tenir compte de la décroissance de R en fonction de \sqrt{L} , on obtient :

$$D(x) (0) = e \cdot Df \quad (e = 2,718)$$

et la portée optimale correspondante $P_x(0) : P_x(0) = \frac{V}{R_0}$.

Pour $A = \infty$, c'est-à-dire si R_0 est nul (produit sans biodégradation) :

$$D_x(\infty) = 20 \cdot Df$$

et la portée optimale correspondante :

$$P_x(\infty) = \left(3 \frac{V}{a} \cdot L^{-\frac{2}{3}} \right)^3$$

Pour un A donné, les rapports D_x/Df et $P_x(A) / P_x(0)$ sont fournis dans le tableau IV.

TABLEAU IV
Dosages et portées optimaux dans le cas d'une injection isolée

A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_x/Df	2,72	7,39	12,7	16,3	18,1	18,9	19,4	19,6	19,8	19,9	19,9
$P_x(A)/P_x(0)$	1,00	0,50	0,22	0,106	0,053	0,029	0,018	0,011	0,008	0,005	0,004

Il n'est cependant pas très réaliste de négliger les épandages faits en amont. Pour en tenir compte, nous avons admis que la portée tend vers une limite après un certain nombre d'injections. La somme des doses (D_n), faites en amont immédiat du même point d'injection, tend vers la valeur :

$$D_n = D_x \frac{1}{\exp\left(\frac{x \cdot R}{V}\right) - 1}$$

La portée P_{xs} , en cas d'injections successives, est donc telle que :

$$\frac{R \cdot P_{xs}}{V} = \ln \left(\frac{D_x}{D_n} + 1 \right)$$

Les valeurs du rapport $P_{xs}(A) / P_x(A)$ sont fournies dans le tableau V pour différentes valeurs de A (cf. fig. 7).

TABLEAU V
Portées optimales dans le cas d'injections successives

A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{xs}(A)/P_x(A)$	1,310	1,130	1,08	1,06	1,055	1,052	1,051	1,050	1,050	1,050	1,050

P_{xs} = portée optimale en cas d'injections successives
 P_x = portée optimale théorique

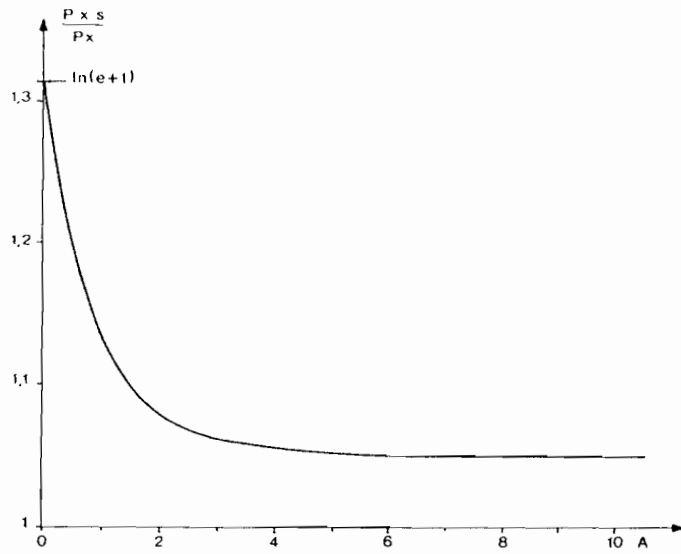
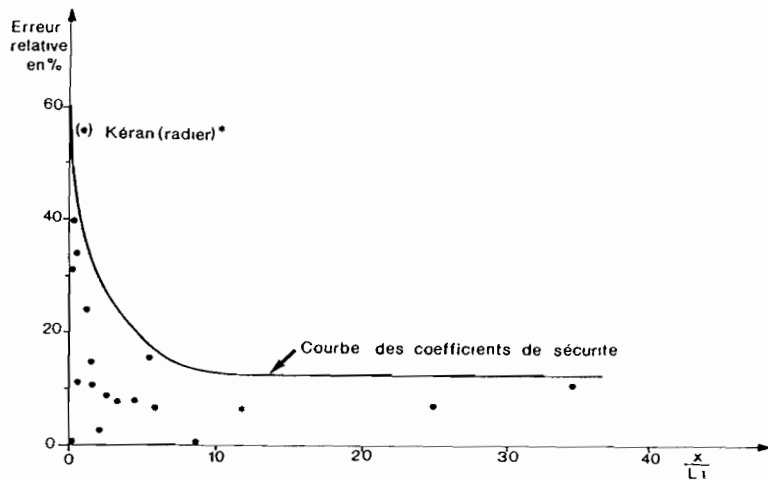


FIG 7. — Rapport entre la portée optimale en cas d'injections successives et la portée optimale en cas d'injection isolée.

3.1.5. Coefficients de sécurité

Le problème de la détermination des coefficients de sécurité peut se poser dans les termes suivants : connaissant l'incertitude sur la dose pour différentes distances du point d'injection, par quelle valeur faut-il multiplier la dose unitaire pour être sûr de traiter correctement le bief ? On peut admettre que si pour la portée théorique la dose est suffisante elle l'est aussi pour les sections situées en amont. Le coefficient de sécurité à utiliser sera donc celui qui permettra de traiter à coup sûr la section correspondant à la portée. Il faut donc préciser la courbe enveloppe des erreurs relatives en fonction de la distance au point d'injection.

En prenant pour unité de portées la longueur de diffusion, les traçages effectués ont permis de dessiner la courbe enveloppe des erreurs relatives représentée sur la figure 8 et dont nous avons déduit les valeurs des coefficients de sécurité (voir tableau VI).



x = distance au lieu d'injection ; L = longueur de diffusion ; (*) = pour cette section les prélèvements n'ont pas été faits à toutes les buses du radier d'où une incertitude importante sur les valeurs moyennes des concentrations.

FIG. 8. — Erreurs relatives sur les doses en fonction de la distance au lieu d'injection.

TABLEAU VI

Portée (Unité longueur de diffusion)	Coefficient de sécurité à appliquer à la dose unitaire
$P < 0,1$	(1,60)
$0,1 < P < 0,5$	1,50
$0,5 < P < 1,4$	1,40
$1,4 < P < 3$	1,30
$3 < P < 6$	1,20
$P > 6$	1,15

Le protocole standard est très incertain quand les portées sont inférieures au dixième de la longueur de diffusion. Dans les autres cas, les résultats sont satisfaisants.

Les mêmes valeurs des coefficients de sécurité peuvent s'appliquer aux doses unitaires et aux portées.

3.1.6. Les distances de bon mélange

Il ne s'agit plus exactement d'estimer l'un des paramètres du modèle mais de répondre au problème suivant :

A quelle distance d'un gîte isolé faut-il injecter l'insecticide afin que celui-ci ait une action larvicide sur la totalité de la section ?

Pour les insecticides dont l'efficacité est directement liée à la dose, la distance de bon mélange sera celle au-delà de laquelle les intégrales des courbes concentration-temps, sur une section, seront identiques. Il a été défini pour chaque traçage une fourchette pour l'estimation de la distance de bon mélange. Elle est définie, en amont, par la distance de la dernière section où le bon mélange n'est pas atteint, et à l'aval, par celle où ce dernier est observé.

Les résultats sont présentés dans le tableau VII en prenant comme unité la longueur de diffusion.

TABLEAU VII

STATION	Distance de bon mélange (unité L1)	
	Limite inf.	Limite sup.
MANGO	0,25	-
TITIRA	0,25	0,57
KPELOU	-	0,45
BROUFFOU	-	0,90
BASSAR	-	10
N'GAMBOTO (1)	0,65	-
N'GAMBOTO (2)	-	1,10

Vu le nombre très limité de valeurs observées, il est difficile de fixer une valeur pour cette distance de bon mélange. Elle serait de l'ordre de la moitié de la longueur de diffusion.

Si cette distance de bon mélange est très inférieure à la portée, on pourra admettre que le traitement sera efficace et, par sécurité, on effectuera l'injection à cette distance du premier gîte à traiter.

Si, au contraire, elle est du même ordre de grandeur que la portée, la probabilité d'échec devient importante. Cela permet de préciser les limites du protocole standard de traitement qu'on pourrait définir. Les limites seraient atteintes à Mango où la distance de bon mélange serait de 10 km, et sur le Sassandra où elle serait de plus de 50 km.

3.2. LE PROTOCOLE

Le protocole standard de traitement se déduit de ce qui précède puisqu'on peut pour chaque bief contrôlé par une station hydrométrique, fournir aux responsables des traitements, outre une courbe d'étalonnage ;

- une courbe « distance de bon mélange »/débit ;
- une courbe reliant le débit à la dose unitaire optimale à utiliser ;

- une courbe reliant le débit à la portée correspondant au dosage optimal pour des injections isolées ou successives ;
- un abaque permettant de définir pour chaque débit, la dose unitaire à utiliser en fonction de la longueur à traiter si celle-ci est inférieure à la portée optimale.

Toutes ces courbes peuvent être fournies en tenant compte des coefficients de sécurité.

Pour établir cet ensemble de courbes, il faut connaître :

- les caractéristiques de l'insecticide ;
- pour chaque bief, les relations largeur/débit et vitesse de propagation/débit ;
- la pente du lit de la rivière estimée à partir d'une carte topographique.

La détermination des caractéristiques des insecticides sera traitée ci-dessous.

Pour définir les relations largeur/débit, il suffit au cours des jaugeages qui sont indispensables pour établir la courbe d'étalonnage du bief, de mesurer les largeurs des différentes sections représentatives du bief.

Pour définir les relations vitesses de propagation/débit, il sera indispensable pour les basses eaux de faire des traçages sur quelques kilomètres. Pour les hautes eaux, on pourra admettre que les vitesses de propagation sont égales aux vitesses moyennes mesurées lors des jaugeages à une section représentative du bief.

La connaissance de ces relations permettra alors de définir celle liant la longueur de diffusion au débit, donc d'établir la série des courbes opérationnelles, en suivant les méthodes exposées plus haut. Ce travail extrêmement simple à réaliser sur micro-ordinateur, ne prendra guère plus de temps que l'établissement des courbes d'étalonnage. Un algorithme simplifié est représenté sur la figure 9.

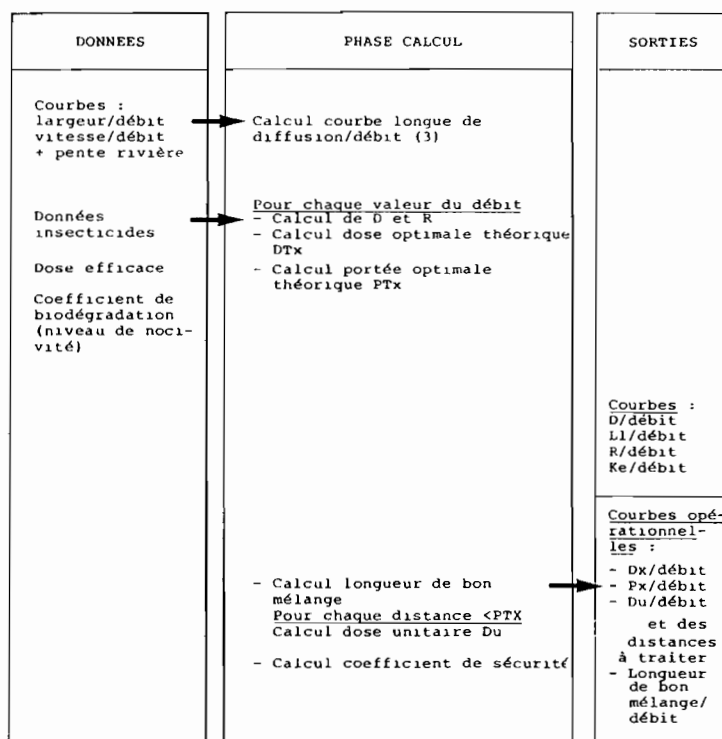


FIG. 9. — Etablissement des courbes opérationnelles (algorithme simplifié).

L'utilisation de ces courbes est très aisée. Supposons par exemple que l'on veuille traiter un bief d'une longueur L donnée, pour un débit Q, il faudra :

1. regarder sur la courbe de distance au bon mélange/débit, la distance, d, séparant le point d'injection du premier gîte à traiter. Appelons L' la valeur L + d. Si d est très grand, le traitement sera incertain ;
2. soit Px (Q) la portée optimale correspondant au débit Q. Si Px (Q) est inférieure à L', il faudra procéder à plusieurs injections de dosage unitaire optimal, séparées entre elles de la distance Px (Q) pour les trois premiers épanchages, de la distance P'x (Q) pour les autres, P'x(Q) étant la portée optimale en cas d'injections successives ;
3. si Px(Q) est supérieure à L', un seul lâcher suffira, la dose unitaire sera déterminée par lecture de l'abaque $Du = f(x, Q)$.

A titre d'exemple il est présenté sur les figures 10 et 11 les courbes opérationnelles obtenues sur deux des biefs étudiés pour les deux insecticides fictifs dont voici les caractéristiques.

$$\text{insecticide 1 : } a = 1,10^{-5} \text{ s}^{-1} \quad R_0 = 5,109^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{insecticide 2 : } a = 0 \quad R_0 = 1,10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

On peut faire sur ces courbes les commentaires suivants : si l'on peut négliger la décroissance de R dans le temps (insecticide n° 2), le protocole standard de traitement est extrêmement simple puisque :

1. la dose unitaire optimale théorique est identique pour toutes les rivières. Elle est égale à $e.Df$ ($e = 2,718$). Seuls changent les coefficients de sécurité à utiliser et qui seront d'autant plus forts que les longueurs de diffusion seront élevées ;

2. les courbes des portées optimales sont déduites uniquement des valeurs du rapport V/R_0 ;

3. les courbes liant la dose unitaire (exprimée en pourcentage de la portée optimale) à la longueur du bief à traiter sont identiques pour toutes les rivières.

Si la décroissance de R dans le temps n'est plus négligeable (insecticide 1), le protocole de traitement va varier suivant le type des rivières :

1. pour celles où les valeurs des longueurs de diffusion sont toujours faibles comparées aux portées optimales, les doses unitaires théoriques à utiliser sont toujours très voisines de 3 fois la dose efficace avec des différences dans la valeur des coefficients de sécurité et des portées ;

2. pour les rivières qui ont des longueurs de diffusion élevées, les variations de dose unitaire en fonction du débit sont très importantes. Les valeurs du rapport dose unitaire sur la portée peuvent être telles qu'il n'est pas réaliste de retenir ces insecticides pour traiter ce type de rivière.

Lorsque la distance de bon mélange est supérieure à celle de la portée, on peut s'interroger sur l'efficacité des traitements. La limite de validité du protocole serait alors atteinte.

4. DÉTERMINATION DE CARACTÉRISTIQUES DES INSECTICIDES

Pour déterminer les caractéristiques des insecticides, deux types d'essais sont indispensables : des essais en laboratoire pour déterminer l'influence de la température, des essais *in situ* pour préciser les paramètres eux-mêmes à une température de référence.

4.1. ESSAIS EN LABORATOIRE

Ces essais seront comparables à ceux déjà réalisés et dont on a fait état au paragraphe 1.1. Ils auront surtout pour but de préciser la correction à apporter aux résultats des essais *in situ* pour rendre les données homogènes.

D'après la formule présente au paragraphe 1.1. et avec les mêmes notations on a la relation suivante entre D_0 et D_0' , doses ayant la même efficacité à des températures T et T'.

$$\frac{D_0}{D_0'} = \exp \left(- \frac{b}{a} (T - T') \right) \quad (14)$$

Il est donc clair que suivant la valeur du rapport b/a , un écart de quelques degrés sur la température d'eau peut entraîner de grosses différences sur la valeur de la dose efficace. Les essais *in situ* des insecticides ne peuvent donc pas se faire sans tenir compte de ce paramètre.

4.2. ESSAIS IN SITU

Ils ont pour but la détermination des 3 paramètres R_0 , a et Df.

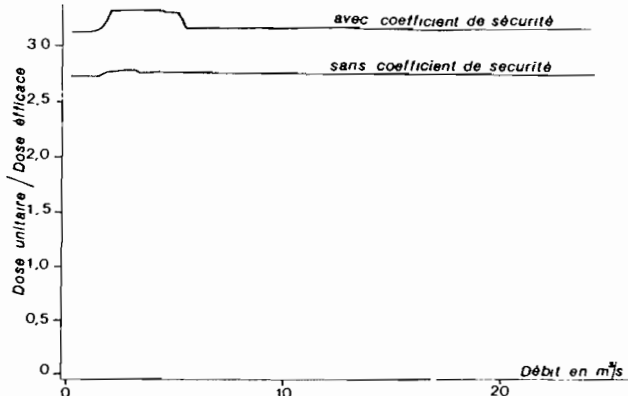
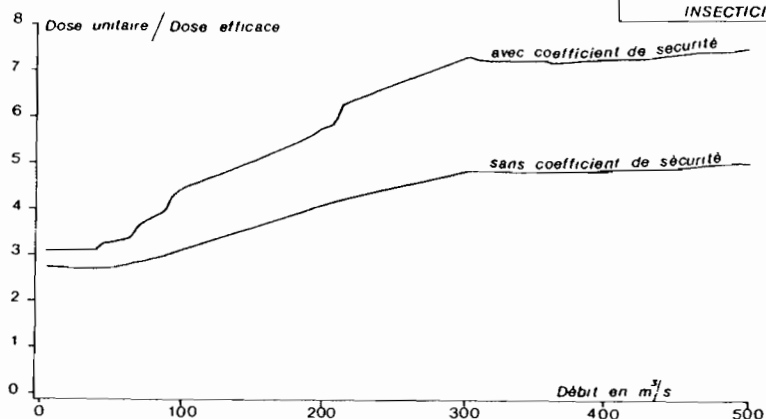
La dose d'insecticide passant à une distance x du point d'injection peut s'exprimer par la relation :

$$D_0(x) = D_u \exp \left(- \frac{x}{V} \left(R_0 + a \left(\frac{x}{L1} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \right)$$

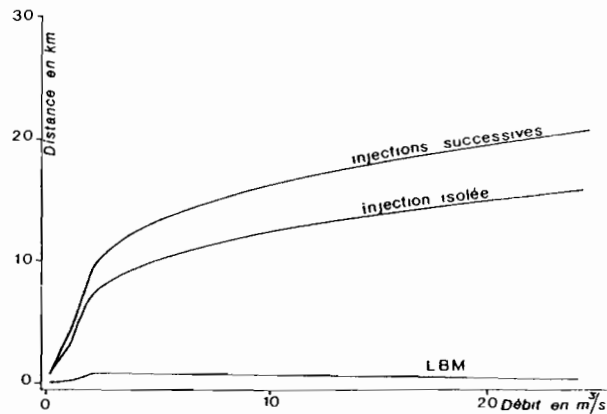
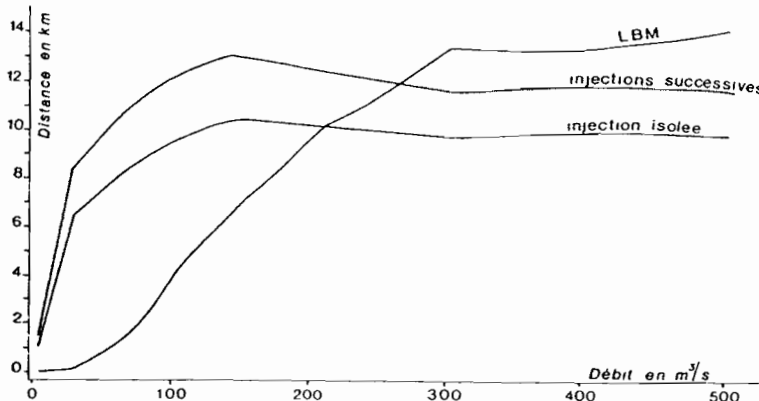
OTI à MANGO

GBAN-HOU à BROUFFOU

Doses optimales en fonction du débit
INSECTICIDE = 1



Portée optimale et longueur de bon mélange
INSECTICIDE = 1



Dose en fonction du débit et de la distance
INSECTICIDE = 1

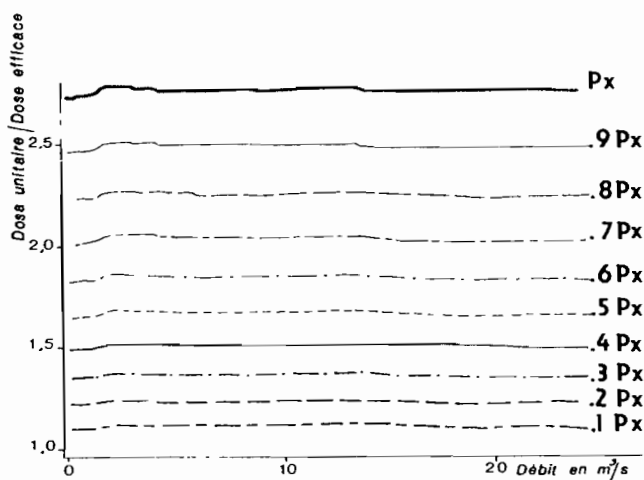
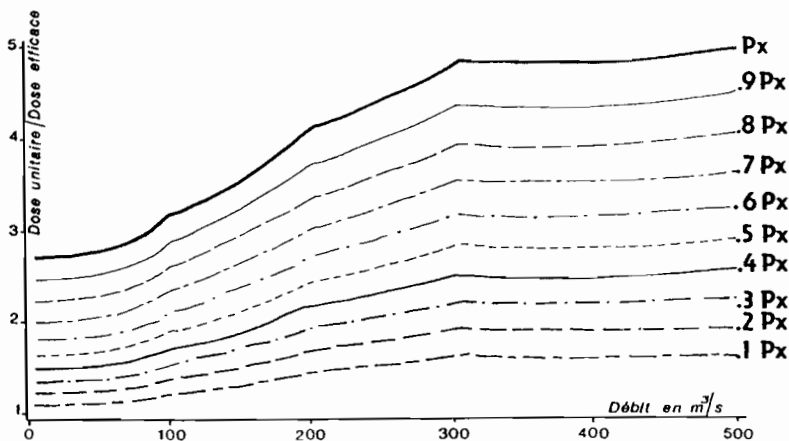
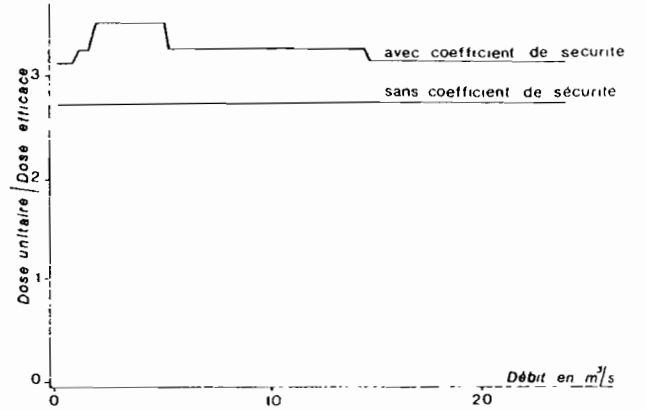
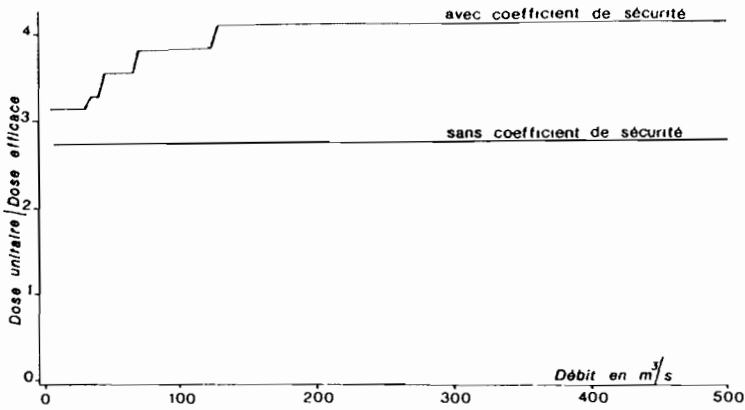


FIG 10.

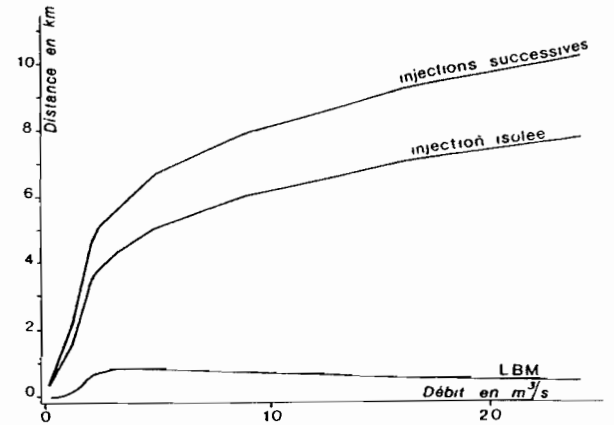
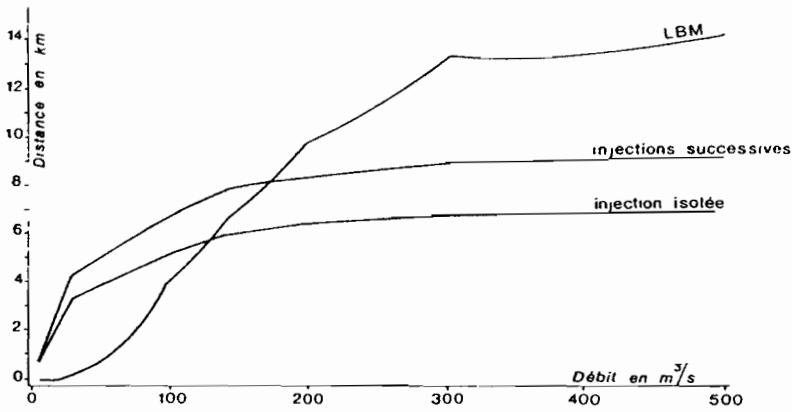
OTI à MANGO

GBAN-HOU à BROUFFOU

Dose optimale en fonction du débit
INSECTICIDE = 2



Portées optimales et longueur de bon mélange
INSECTICIDE = 2



Dose en fonction du débit et de la distance
INSECTICIDE = 2

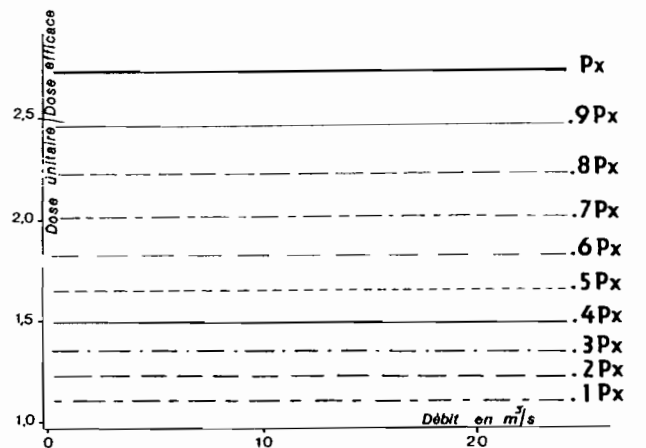
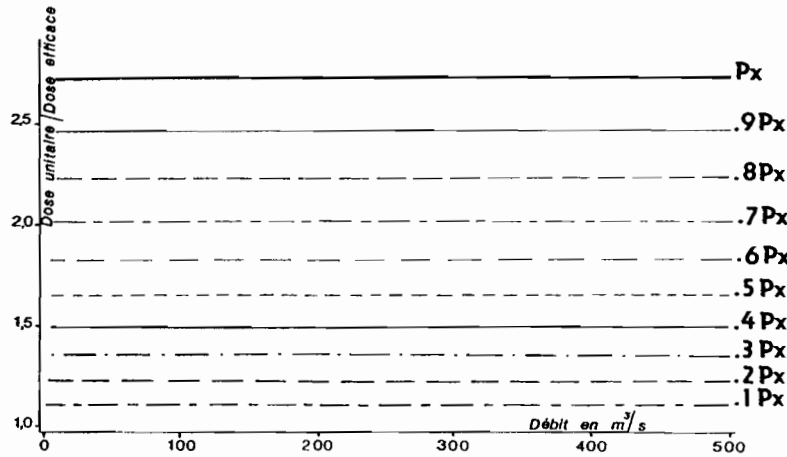


FIG. 11.

Pour un épandage dans une rivière où existent des larves de simules, on peut pour une dose unitaire donnée, déterminer la portée $P(Du)$.

A cette distance, $Do(x)$ est donc égale à la dose efficace pour la température, Te , de l'eau lors de l'essai.

On a donc :

$$Df(te) = Du \exp \left(- \frac{P(Du)}{V} \left(R_0 + a \frac{P(Du)}{L1} \right)^{-\frac{2}{3}} \right)$$

$Do(x)$ et Du étant proportionnelles, on peut utiliser la formule (14), pour calculer la dose unitaire, Du_R , qu'il aurait fallu injecter pour avoir la même portée à la température de référence. Si on note Df_R , la dose efficace correspondante, nous obtenons :

$$Df_R = Du_R \cdot \exp \left(\frac{P(Du_R)}{V} \left(R_0 + a \frac{P(Du_R)}{L1} \right)^{-\frac{2}{3}} \right) \quad (15)$$

Il suffit donc de réaliser un certain nombre d'essais à différents dosages et pour différentes conditions d'écoulement pour définir expérimentalement la courbe Du en fonction de P .

Si on note :

$$P^* = \frac{P}{L1}, \quad P_0^* = \frac{V}{R_0 \cdot L1}, \quad n = \frac{a}{R_0}$$

on a :

$$\ln \left(\frac{Du_R}{Df_R} \right) = (P^* + nP^{*1/3}) \cdot \frac{1}{P_0^*} \quad (16)$$

L'ajustement des paramètres de l'équation (16) pourra se faire mathématiquement ou graphiquement.

CONCLUSION

Pour les produits dont l'action insecticide est directement liée à la dose, les résultats les plus importants de cette étude sont les suivants :

1. la définition des paramètres caractérisant chaque insecticide ;
2. la mise au point d'un protocole d'essais des insecticides afin de préciser ces paramètres ;
3. la définition, pour une température de référence, à partir des paramètres de l'insecticide, d'un protocole standard de traitement simple avec seulement quatre paramètres de l'écoulement ;
 - débit,
 - vitesse,
 - largeur,
 - pente,
4. le moyen de tenir compte de la température de l'eau, si celle-ci est connue (en utilisant la télétransmission, par exemple), pour déduire du protocole standard les doses unitaires à utiliser ;
5. la définition, pour chaque produit, du domaine de validité du protocole standard et des coefficients de sécurité à utiliser.

Pour les insecticides ayant un mode d'action différent, à condition de le connaître, il sera possible, en suivant une démarche comparable à celle présentée, d'établir un protocole.

En revanche pour les rivières ayant des longueurs de diffusion très fortes, c'est-à-dire en général les rivières larges, le protocole standard ne sera pas applicable. Il sera indispensable pour pouvoir traiter convenablement ces rivières d'utiliser une approche bidimensionnelle du problème et il est à craindre que chaque bief à traiter ne soit alors un cas particulier.

REMERCIEMENTS : Les auteurs remercient le Directeur de l'OCP pour son autorisation de diffusion des données et de leur interprétation. Ils remercient également le Chef de la Lutte Antivectorielle de l'OCP pour ses conseils et ses encouragements présents tout au long de l'étude sur le devenir des insecticides.

La technique des traçages n'aurait pas pu être mise en place sans l'accord des Autorités de la République Togolaise et de la République de Côte d'Ivoire.

Le travail n'aurait pas été possible sans le soutien logistique de la Direction Centrale de l'Hydraulique (DH) de la République de Côte d'Ivoire et de la Direction de l'Hydraulique (DH) de la République Togolaise. L'Energie Electrique de Côte d'Ivoire (EECI) a bien voulu communiquer aux auteurs les lâchures des barrages situés en amont des biefs étudiés.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 17 avril 1989

BIBLIOGRAPHIE

- FISCHER (B.), 1967. — The mechanics of dispersion in natural streams. *J. Hydraul. Div.*, ASCE, 93, HY6 : 187-216.
 LE BARBE (L.), GIODA (A.), DELFIEU (G.), WOME (K.), 1987. — Etude expérimentale de la propagation des insecticides dans les rivières. Rapport final. ORSTOM-OCP/OMS, Montpellier, 59 p., *Multigr.*
 SABOL (G.V.), NORDIN (C.F.), 1978. — Dispersion in rivers as related to storage zones. *J. Hydraul. Div.*, ASCE, 104, HY5 : 695-708.
 Université du Québec, 1985. — Programme de recherche sur le Bti. Rapport d'étape, présenté à l'OMS. Programme de lutte contre l'onchocercose. Université du Québec à Trois-Rivières, mai, 5 p. + annexes.
 VALENTINE (E.M.), WOOD (I.R.), 1977. — Longitudinal dispersion with dead zones. *J. Hydraul. Div.*, ASCE, 103, HY9 : 975-990.

ANNEXE

Liste des principaux symboles utilisés (Unités utilisées)

- a [s⁻¹] : paramètre caractéristique de l'insecticide quantifiant la décroissance de R en fonction de la distance.
 A : $A = \left(\frac{a}{3R_0} \right) \left(\frac{V}{2.R_0.L1} \right)^{-\frac{2}{3}}$
 Cx [g.l⁻¹] : concentration maximale.
 C(x,t) [g.l⁻¹] : concentration au temps t après le lâcher, à la distance x du point d'injection.
 D [m².s⁻¹] : coefficient de diffusion longitudinal : $D = 0,37 \cdot L1 \cdot V \left(1 - \exp \left(-0,06 \frac{x}{L1} \right) \right)^{\frac{1}{2}}$
 Df [g.l⁻¹.s] : dose efficace.
 Df_R [g.l⁻¹.s] : dose efficace à la température de référence.
 Do [g.l⁻¹.s] : dose d'insecticide au niveau d'un gîte : $Do = \int_0^{\infty} C(x,t) dt$.
 Du [g.l⁻¹.s] : dose unitaire Du = M/Q.
 Dx [g.l⁻¹.s] : dose unitaire optimale.
 ET [s] : Ecart type de la courbe concentration-temps : $ET = \left[\frac{1}{Du} \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C(x,t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$
 I : pente de la rivière.
 Ke $\left[s.m \frac{1}{2} \right]$: coefficient d'étalement $Ke = (D/V^3)^{\frac{1}{2}}$
 La [m] : largeur de la rivière.

- $L1$ [m] : longueur de diffusion : $L1 = \left(\frac{La^7 \cdot V^5}{9,81 \cdot Q^3 \cdot I} \right)^{\frac{1}{2}}$
 M [kg] : masse d'insecticide injecté.
 P^* : $P^* = P/L1$.
 $P(Du)$ [m] : Portée correspondant à la dose unitaire (Du).
 P_0^* : $P_0^* = V / (R_0 \cdot L1)$.
 Px [m] : portée correspondant à une dose optimale pour une injection isolée.
 Pxs [m] : portée correspondant à une dose optimale pour une série d'injections le long d'une rivière.
 Q [$m^3 \cdot s^{-1}$] : débit.
 R [s^{-1}] : coefficient de disparition de l'insecticide : $R = R_0 + a \left(\frac{x}{L1} \right)^{\frac{2}{3}}$
 R_0 [s^{-1}] : coefficient de biodégradation de l'insecticide.
 TT [s] : durée du nuage.
 TTx [s] : durée du nuage correspondant à la dose optimale.
 Tx [s] : date d'apparition du maximum.
 V [$m \cdot s^{-1}$] : vitesse de propagation.
 W [$m \cdot s^{-1}$] : vitesse apparente de diffusion.
 x [m] : distance à la section d'injection.

4. Le mêmes causes ne produisent pas le mêmes effets : travaux hydrauliques, santé et développement - 1992

Les mêmes causes ne produisent pas les mêmes effets : travaux hydrauliques, santé et développement

Il est de bon ton, aujourd'hui, de dénoncer les conséquences épidémiologiques négatives des aménagements hydro-agricoles qui se sont multipliés au cours des trente dernières années. Le fait est qu'en mettant la gestion de son environnement au service du développement, l'homme crée souvent des déséquilibres écologiques qui peuvent déboucher sur la prolifération d'espèces biologiques nouvelles, parmi lesquelles les vecteurs de redoutables maladies. Mais, en ce domaine, il n'y a pas de fatalité inéluctable : tout dépend des zones climatiques et des comportements humains. Un aménagement bien conçu et bien géré devrait être synonyme d'élévation du niveau de vie et de meilleure santé.

Ce qui suit est parfois polémique. Il s'agit d'une mise au point qui me semble nécessaire. L'article est né de la lecture de différentes études qui m'ont laissé un sentiment d'insatisfaction. Je pense à celles de Biswas et Nakayama [1] sur l'enseignement commun de l'hydrologie et de la santé, de Yacoob *et al.* [2] sur la lutte contre la filaire de Médine (*Dracunculus medinensis*), de Grubinger et Pozzi [3] et de Pozzi [4] sur les maladies hydriques, de Nozais et Chièze [5] sur le coût sanitaire de l'eau...

Les idées qui y sont exprimées sont simplistes. Ainsi, « *les aménagements hydrauliques sont dangereux dans les pays tropicaux* » ou « *le coût sanitaire de l'eau est trop lourd* » ou encore « *il n'y a que cinq à six institutions dans le monde où un bon enseignement eau-santé-tropiques est dispensé* ». Les hydrologues regrettent

cette carence mais, enfermés dans leur discipline, ils ignorent l'effort fait par les scientifiques travaillant dans le domaine de la santé pour mettre en place une approche multidisciplinaire des relations eau-santé-développement.

Une autre tendance néfaste est la publication de splendides tableaux très longs, très fouillés. Y sont citées à la file et détaillées des dizaines de maladies tropicales, leur(s) vecteur(s), leurs effets, les zones d'épidémie... Un cortège d'apocalypse. Au niveau des idées, cela reste squelettique, rappelant la division sommaire entre animaux utiles et nuisibles.

En fait, les premiers résultats du Département Santé de l'ORSTOM font ressortir des différences considérables de l'impact des travaux hydrauliques suivant les zones climatiques, les vecteurs concernés et les comportements humains.

ALAIN GIODA

Laboratoire d'Hydrologie
ORSTOM, BP 5045
34032 Montpellier Cedex 01, France.

Généralités

Le développement

Le mieux-vivre est l'aspiration naturelle de l'homme. Il n'est pas obtenu par une large partie de la population des zones tropicales qui reste essentiellement rurale. Comme dans le monde industriel, elle se réfugie dans les villes où le poids des structures familiales, tribales, claniques est plus faible. De même, le mieux-vivre est à portée de main avec une meilleure facilité d'accès à l'enseignement, l'entrée dans le circuit monétaire... et l'accès au système de santé. Ainsi, à Brazzaville, depuis 1985, la mortalité infantile est de 60 pour mille contre 120 pour mille dans le reste du pays [Lallemant, comm. pers.].

En l'an 2000, la population urbaine des pays en développement atteindra deux milliards contre un milliard en 1980. Trois Latino-Américains sur quatre, deux Africains sur cinq et un Asiatique sur trois vivront dans les villes [6].

A l'inverse, le travail à la campagne fonctionne comme repoussoir. « Si tu n'es pas sage à l'école, tu retourneras en brousse ! » est une menace parentale en Côte d'Ivoire. Pour un fonctionnaire, l'affectation dans une petite ville est assimilée à un limogeage. Au Sénégal, les conditions en milieu rural Sérère, sont moins confortables et apaisantes qu'une vision idéalisante du monde villageois voudrait le faire croire [7].

L'agriculture

Le problème alimentaire était aigu en Asie et en Afrique dans les années 70. Les progrès de pays asiatiques, comme la Chine, les Philippines, l'Inde, le Pakistan ou le Bangladesh, ont été très impressionnants dans les années 80. La « Révolution Verte » fut basée sur la sélection de variétés de riz à haut rendement et sur leur diffusion s'appuyant sur des travaux hydrauliques d'envergure.

Parmi les principales raisons des crises alimentaires en Afrique au sud du Sahara, citons un développement hydraulique insuffisant et une exploitation inefficace des terres irriguées [8]. La faillite de l'irrigation en Afrique est admise par Tolba [9] et Biswas [10]. Les seules exceptions sont les zones où elle est traditionnellement pratiquée (Égypte, Soudan, Sénégal par les Toucouleur le long du fleuve homonyme...).

L'environnement

La dégradation de l'environnement est très rapide particulièrement sous les tropiques. Ainsi, 70 % de la forêt humide de

la Côte d'Ivoire a disparu entre le début du XX^e siècle et 1985 par défrichement pour des activités agricoles souvent à court terme (2 à 3 ans pour le maïs et 8 à 10 ans pour le caféier). Les causes de la dégradation qui touche à la fois la flore, la faune, les sols et les paysages sont multiples et, en Afrique, cette dégradation de l'environnement est le facteur adverse le plus important auquel sont confrontées les populations [9]. Face à cette dégradation, au sud du Sahara, il n'y a pas de politique active de conservation du milieu naturel.

L'Afrique est le continent comptant le plus de déserts et de zones en voie de désertification dans le monde. Il a également la plus forte croissance démographique. Ces deux traits poussent les hommes à étendre leur maîtrise hydraulique, ce qui a des conséquences importantes sur le développement des maladies liées à l'eau.

La santé

La santé n'est pas le moteur du développement. L'homme ne construit pas des barrages, des canaux et a fortiori des villes pour améliorer en premier lieu sa santé. Les responsables de la santé doivent s'adapter aux situations actuelles créées par de nouvelles données socio-économiques. Ceci implique une réévaluation de l'épidémiologie des maladies liées à l'environnement et la mise en place d'une politique établie dans un cadre intersectoriel avec les acteurs du développement à tous les niveaux. Par ce moyen, on peut espérer, selon Mouchet [11], infléchir les techniques dans un sens plus conforme aux nécessités sanitaires.

L'hydrologie

Je prends un exemple dans mon Institut de rattachement mais il pourrait être pris ailleurs sans aucun problème.

Après la Seconde Guerre mondiale, les hydrologues de l'ORSTOM ont d'abord cherché à fournir une énergie renouvelable, nationale et d'un coût acceptable par le Tiers-Monde. Par leur travail d'évaluation de la ressource dans les avant-projets, ils ont contribué à l'édification d'environ trente barrages depuis les années 1950 en Afrique, en Amérique latine et en Océanie. Ils avaient besoin d'eaux courantes et abondantes. L'appareil usuel pour jauger les rivières est un courantomètre. L'outil a façonné la pensée ; les hydrologues ont appris à « turbiner » dans le cadre d'un service s'appuyant sur le savoir-faire d'EDF ou d'autres sociétés de production hydro-électrique.

Ils ont négligé les eaux mortes (mares,

Références

1. Biswas AK, Nakayama M. Health aspects of water resources education and training. *Water Resources Development* 1989 ; 5 : 169-74.
2. Yacoob M, Brieger WR, Watts S. What happened to Guinea worm control ? An issue of water quality and health improvements. *Water International* 1990 ; 15 : 27-34.
3. Grubinger H, Pozzi AR. Water associated vector-borne diseases and environmental management measures for their control. *ICID Bull* 1985 ; 34 : 43-55.
4. Pozzi AR. The impact of rice irrigation development on water associated vector-borne diseases. A case study. *ICID Bull* 1986 ; 35 : 48-52.
5. Nozais J-P, Chièze F. Le coût sanitaire de l'eau. *Sécheresse* 1990 ; 1 : 118-23.
6. Dharmarajan K. Gestion de l'eau en milieu urbain. Responsabiliser les utilisateurs. *Hydro +* 1990 ; 10 : 25-36.
7. Collignon R, Gueye M. Santé mentale et migration vers la ville. In : *Urbanisation et Santé dans le Tiers Monde*. Paris : ORSTOM, Coll et Sém, 1989 : 297-303.
8. Biswas AK. Systems analysis for water management for developing countries : constraints and opportunities. *ICID Bull* 1988 ; 37 : 13-22.
9. Tolba MK. The African environmental situation. *ICID Bull* 1985 ; 35 : 14-8 et 32.
10. Biswas AK. Irrigation in Africa. *ICID Bull* 1987 ; 36 : 1-11.
11. ORSTOM. *Eau, santé et développement*. Rencontres des 14-15 septembre 1989 à Montferrier-sur-Lez. Rapport final. Brengues J. éd., Montpellier : Orstom, 1989.
12. Mouchet J, Brengues J. Les interfaces agriculture-santé dans les domaines de l'épidémiologie des maladies à vecteurs et de la lutte anti-vectorielle. *Bull Soc Path Ex* 1990 ; 83 : 376-93.
13. Coosemans M, Mouchet J. Consequences of rural development on vectors and their control. *Ann Soc Belge Méd Trop* 1990 ; 70 : 5-23.
14. Service NM. Problems of vector-borne diseases and irrigation projects. *Insect Sci Appl* 1984 ; 5 : 227-31.
15. Gratz NG. The impact of rice production on vector-borne disease problems in developing countries. In : *Vector-borne disease control in humans through rice agræcosystem managements*. Manila : International Rice Research Institute, WHO/FAO/UNEP/PEEM, 1988 : 7-12.

champs d'inondation, bras abandonnés et mouilles des grands fleuves...). Pourtant, elles sont bien vivantes au niveau biologique, et sont souvent les sites de développement des vecteurs de maladies.

Les aménagements hydrauliques

Le désintérêt général de la communauté des hydrauliciens et des hydrologues est évident après la construction des ouvrages.

Une petite étude a été faite grâce à la lecture de plus de 10 années d'analyses bibliographiques effectuées par la CIID (Commission internationale de l'irrigation et du drainage). La CIID a son siège en Inde, à New Delhi, et la mise en valeur des pays en développement est l'une de ses priorités. Par rapport au nombre de références analysées chaque année, qui oscille entre 1 050 et 2 200, celui des références sur les effets induits des aménagements et sur les maladies liées à l'eau est dérisoire ; il varie entre 0 et 31 références/an avec une moyenne de l'ordre de 10 (Tableau 1).

Davantage de moustiques ne signifie pas toujours davantage de paludisme

Je centre mon discours sur le paludisme car 1,5 milliard de personnes y sont exposées et 110 millions de cas sont relevés chaque année dont 90 millions en Afrique selon les données du *Bulletin épidémiologique hebdomadaire* (BEH) de l'OMS. C'est la maladie qui touche le plus de monde dans les pays en développement et c'est aussi la maladie liée à l'eau la plus représentative. Elle présente

également un « polymorphisme » épidémiologique en relation avec l'environnement et ses modifications.

Pendant longtemps, les scientifiques ont établi une relation directe entre le nombre d'anophèles potentiellement vecteurs du paludisme et la gravité de la maladie. Or, barrages et irrigation augmentent la production de vecteurs [12]. Une augmentation du paludisme, voire son introduction dans de nouvelles localités pouvait être attendue [13].

La riziculture, les moustiques et le paludisme

Le riz est une nourriture de base de la population sous les tropiques. Il constitue le pivot du régime alimentaire de 60 % de l'humanité et sa demande est sans cesse en augmentation [14].

En 1985, les rizières couvraient 220 millions d'hectares dont 35 % étaient irrigués [15]. Elles constituent des biotopes très productifs pour de multiples espèces de moustiques dont les cycles se succèdent au cours de l'évolution du milieu, conséquence de la croissance de la plante. Après le repiquage, les rizières forment des plans d'eau peu profonds, fortement ensoleillés, où la température de l'eau est élevée. Ensuite, au fur et à mesure de la croissance du riz, elles se transforment en un milieu à végétation dressée, comparable aux roselières, où l'ombrage des plantes évite l'échauffement brutal de l'eau [12]. Ainsi, *Anopheles gambiae*, héliophile, précède au Kenya *An. funestus*, ombrophile (photos 1 et 2) [14]. Ce binôme se retrouve au Burundi où l'irrigation de la vallée du Ruzizi a entraîné également la multiplication d'*An. gambiae s.l.* [16]. *An. gambiae* est le meilleur vecteur de *Plasmodium falciparum*, le parasite responsable

de la létalité palustre. Dans le périmètre irrigué d'Ahero au Kenya, *An. gambiae* cause 65 % des piqûres de moustiques contre moins de 1 % dans les zones environnantes non irriguées [17].

Au Burundi, comme le paludisme était hypoendémique ou absent et que les colons, venant de montagnes indemnes de la maladie, n'étaient pas immuns, l'irrigation a provoqué une épidémie de malaria extrêmement grave frappant des sujets non immuns [16].

Un exemple inverse de celui du Burundi est fourni par le périmètre rizicole du Kou, près de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso. L'introduction de la culture irriguée du riz a entraîné la multiplication par sept du nombre d'*An. gambiae* mais la transmission du paludisme a diminué quatre fois [18]. Ce « succès » a des causes multiples. Le développement agricole a produit des revenus qui ont permis aux populations d'améliorer leur couverture sanitaire et d'assurer leur protection contre les vecteurs en achetant des moustiquaires [12]. L'imprégnation des moustiquaires avec un insecticide, la deltaméthrine, a ensuite encore diminué de moitié l'incidence des manifestations pathologiques du paludisme [Pazart et Robert, comm. pers.]. Enfin, devant la carence des services de santé, la population pratique de plus en plus l'autotraitement par la chloroquine, au grand dam des praticiens traditionnels [19]. Cette pratique qui se généralise en Afrique a été reconnue comme une des causes de la baisse de la mortalité lors du sommet africain d'octobre 1991 et l'OMS souhaite seulement la canaliser.

La vallée du Kou se trouve dans une région d'holoendémie où le paludisme fait partie du cortège des parasites et touche tous les sujets, sans exception, avec une moyenne de 150 à 400 piqûres

Tableau 1. Analyse de bibliographies éditées par la CIID (Commission internationale des irrigations et du drainage)

Année(s)	1989-90	1987	1985	1984	1983	1981	1980	1979	1978	1977	1976
Références	1 141	1 245	1 047	1 800	1 812	1 885	1 805	2 190	2 092	2 069	2 155
Références relatives aux maladies hydriques	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Références relatives aux effets écologiques induits par les projets hydrauliques	13	2	29	2	0	6	12	13	13	14	17

Le nombre de références analysées par la CIID diminue comme ses ressources financières qui permettaient de recevoir auparavant de multiples abonnements.

Photo 1. Femelle d'*Anopheles gambiae* qui est le vecteur majeur du paludisme en Afrique. L'espèce *gambiae* se distingue des autres anophèles africains grâce à ses pattes mouchetées. C'est un moustique de zones humides (forêts et savanes guinéennes), très anthropophile et souvent abondant. La taille de l'adulte est d'environ 5 mm. (Cliché B. Geoffroy)

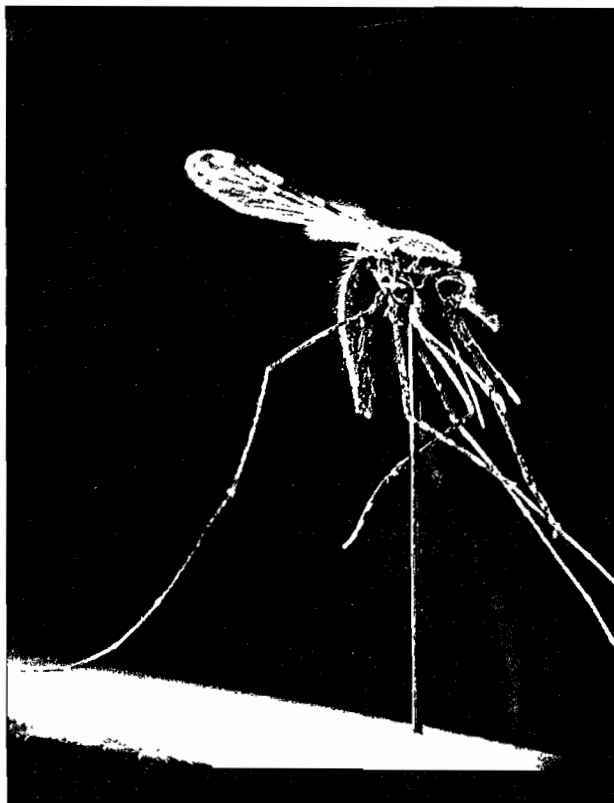
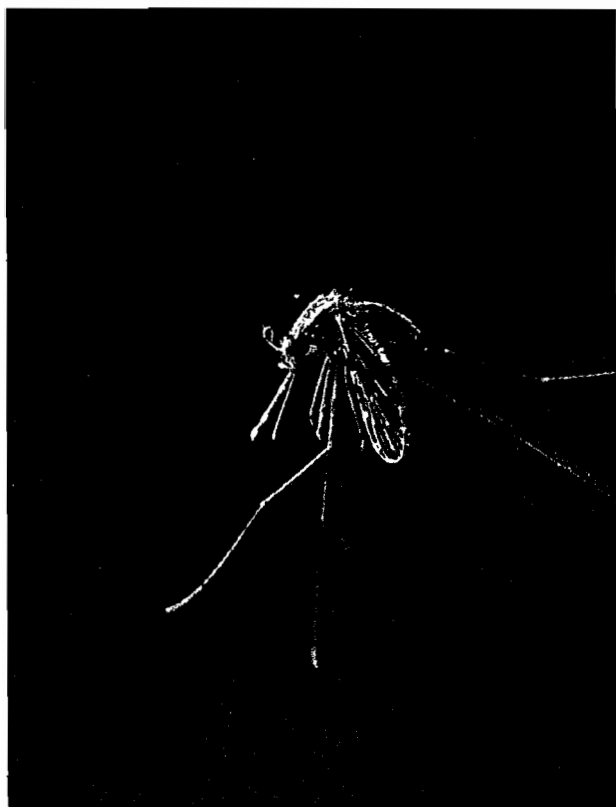


Photo 2. Femelle d'*Anopheles funestus*. C'est un autre grand vecteur du paludisme. L'espèce est de taille plus petite (environ 3,5 mm) qu'*An. gambiae*. Ce moustique ombrophile joue un rôle majeur dans la transmission du paludisme en fin de saison des pluies dans les régions de savanes, de forêts dégradées et dans certaines régions montagneuses. Comme *An. gambiae*, il est très anthropophile. (Cliché B. Geoffroy)

infestantes par homme et par an. La population ne survit que grâce au développement de l'immunité entre 6 mois et 10 ans. Donc, les colons qui viennent dans le périmètre nouvellement irrigué arrivent des zones de savane qui l'entourent et, par conséquent, ont un bon degré d'immunité.

Les retenues, les moustiques et le paludisme

Barrages, retenues collinaires et petits ouvrages d'irrigation multiplient les gîtes à anophèles. Sur le paludisme, l'impact de ces aménagements est variable.

Sur les grands barrages, les petits gîtes abondent en basses-eaux ; des mares résiduelles se forment dans la zone du marnage. Les petites retenues collinaires sont colonisées au Maroc et en Tunisie en saison sèche par des anophèles dont *An. labranchiae*, vecteur potentiel du paludisme [Bouchité, comm. pers.].

En Afrique tropicale, les petites retenues se comportent comme les zones irriguées. Quand le paludisme est stable, peu de

changements apparaissent dans le statut médical des populations. En revanche si le paludisme est absent ou de faible endémicité, en montagne par exemple, la multiplication des retenues pourra être potentiellement dangereuse pour des populations non immunes.

Les villes, les moustiques et le paludisme

Je décris, d'abord, le schéma le plus courant en Afrique. Ensuite, j'aborderai trois cas particuliers : le premier à Ouagadougou ; le second à Bouaké ; le troisième en Inde du sud.

A Bobo-Dioulasso au Burkina Faso, les vecteurs sont les mêmes en zones rurale et urbaine, avec *An. gambiae s.l.*, mais la transmission diminue de la périphérie vers le centre de la ville avec la raréfaction des gîtes à anophèles [20]. La même tendance se mesure ailleurs en Afrique à Brazzaville [21] et à Dakar [22].

En général, la ville est un milieu peu favorable aux vecteurs du paludisme car les larves d'anophèles ne tolèrent pas les

eaux polluées, à l'inverse de celles des moustiques du genre *Culex* qui y pullulent. Il y a moins de transmission, donc moins de stimulations antigéniques par piqûres infectantes et la population développe peu ou pas d'immunité. Les individus qui néanmoins se contaminent dans la ville ou à l'occasion d'un voyage présentent alors des symptômes graves.

A Ouagadougou au Burkina Faso, un quartier de la capitale ne répond pas à ce schéma. Il s'agit de celui qui est proche du barrage, réservoir d'eau de la ville, qui est implanté dans la cité [23]. A Bouaké en Côte d'Ivoire, c'est le développement récent des rizières en milieu urbain périphérique qui est à l'origine du foyer de paludisme [Mouchet, comm. pers.].

En Inde, dans l'État du Tamil Nadu dont la capitale est Madras, l'une des conséquences de l'amélioration du niveau de vie avec l'objectif de « l'Eau pour Tous » a été le développement accéléré, à partir de 1974, du paludisme urbain ; *An. stephensi* se reproduit sur le toit des maisons, dans les réserves en eau nouvelle-

Photo 3. Une rivière pérenne près du village de Ndo dans l'arrondissement de Mbanjock (Cameroun). Gîte à *Anopheles gambiae* et *An. nihili*, vecteurs du paludisme. (Cliché M. Moubignol)

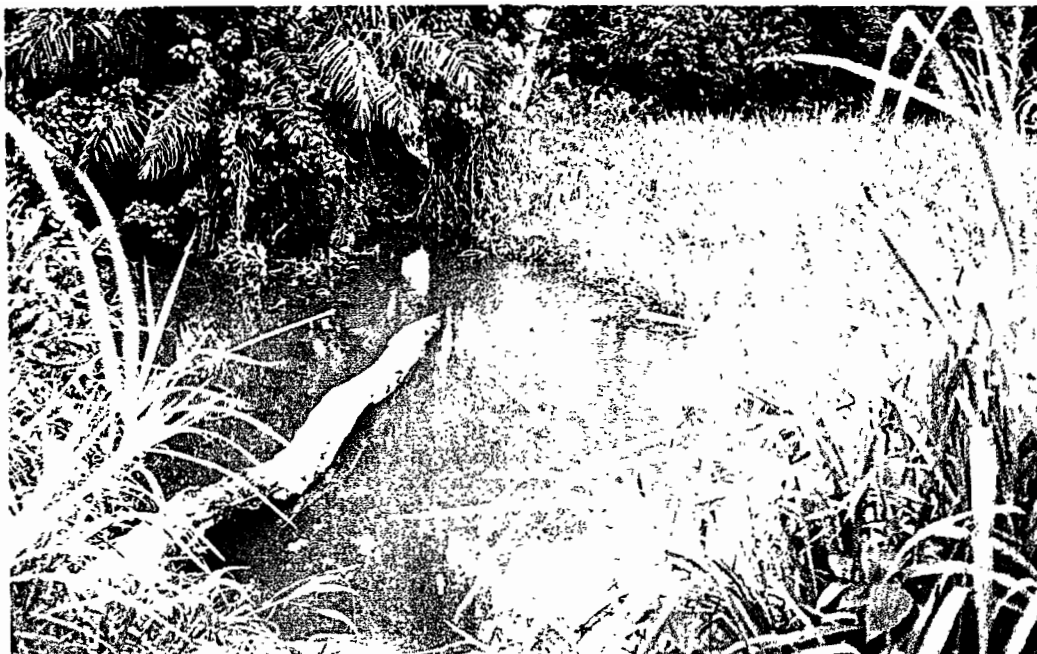


Photo 4. Une équipe camerounaise récolte par la louche des larves d'anophèles dans la rivière Mokona près de la ville de Mbanjock dans le complexe sucrier de la SOSUCAM (Société Sucrière du Cameroun).



Cette équipe évolue dans le groupe d'entomologie médicale ORSTOM travaillant à l'OCEAC (Organisation de coordination pour la lutte contre les endémies en Afrique Centrale). (Cliché M. Moubignol)

Photo 5. Collecte par la louche de larves d'*Anopheles gambiae* dans un gîte constitué d'un vieux pneu de tracteur (village de Ndo de l'arrondissement de Mbanjock, Cameroun). Notez la variété des gîtes dans une même localité (voir photos 3 et 4) d'*An. gambiae* qui colonise l'ensemble des eaux dormantes et courantes. (Cliché M. Moubignol)



16. Coosemans M. *Recherches épidémiologiques sur le paludisme dans la vallée de la Ruzizi et dans l'Imbo Sud (République du Burundi)*. Thèse Doc. Sciences, Université Catholique Louvain, Belgique, 1987.

17. Surtees G. Large-scale irrigation and arbovirus epidemiology, Kano Plain, Kenya. I. Description of the area and preliminary studies on mosquitoes. *Med Entomol* 1970 ; 1 : 509-71.

18. Robert V, Gazin P, Boudin C, et al. La transmission du paludisme en zone de savane arborée et en zone rizicole des environs de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso). *Ann Soc Belg Méd Trop* 1985 ; 65 (Suppl. 2) : 201-14.

19. Bonnet D. Représentations culturelles du paludisme chez les Moose du Burkina. In : *Urbanisation et Santé dans le Tiers-Monde*. Paris : ORSTOM, Coll et Sém, 1989 : 339-42.

20. Robert V, Gazin P, Benasseni R, et al. Le paludisme urbain à Bobo-Dioulasso. In : *Urbanisation et Santé dans le Tiers-Monde*. Paris : ORSTOM, Coll et Sém, 1989 : 181-5.

21. Trape JF, Zoulani A. Malaria and urbanization in Central Africa: the example of Brazzaville. Results of the entomological surveys and epidemiological analysis. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 1987 ; 81 (suppl 2) : 10-8.

22. Verduyck J, Janclous M. Étude entomologique sur la transmission du paludisme humain dans la zone urbaine de Pikine, Sénégal. *Cah ORSTOM, sér Ent Méd Parasitol* 1981 ; 19 : 165-78.

23. Sabatinelli G, Lamizana L. Le paludisme dans la ville de Ouagadougou (Burkina Faso). In : *Urbanisation et Santé dans le Tiers-Monde*. Paris : ORSTOM, Coll et Sém, 1989 : 187-93.

24. Hyma B, Ramesh A, Chakrapani KP. A review of urban malaria control. Situation and related environmental issues in Tamil Nadu, India. In : *Urbanisation et Santé dans le Tiers-Monde*. Paris : ORSTOM, Coll et Sém, 1989 : 159-75.

25. Mouchet J, Bellec Ch. Récentes acquisitions et perspectives de l'entomologie médicale et de la lutte anti-vectorielle. *Ann Parasitol Hum Comp* 1990 ; 65 (suppl. 1) : 107-11.

26. Prost A. Les faits de santé aux cours et décours des sécheresses. *Sécheresse* 1991 ; 2 : 40-7.

27. Dubreuil P, Guiscafré J, Nouvelot J-F, et al. *Le bassin de la rivière Sanaga*. Paris : ORSTOM, Monographies Hydrologiques, 3, 1975.

28. Séguis L. Cultures de décrue et périmètres irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal. *Actes des 6èmes Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 12-13 septembre 1990*. Carré P, éd. Paris : ORSTOM, Coll et Sém, 1992 : 47-63.

ment construites. Dans les villes, 1 634 cas de paludisme furent enregistrés en 1973, puis 48 842 en 1976 et 51 839 en 1984 alors qu'il n'y a guère de paludisme dans les zones rurales voisines [24]. Il est à noter que le paludisme urbain était déjà connu dans cette région antérieurement [Mouchet, comm. pers.]. La situation en Inde est l'inverse de celle de l'Afrique.

L'écologie du paludisme

Il y a donc une modulation des conséquences pathologiques du paludisme par l'immunité et les conditions socio-économiques des populations. Même sur le continent africain considéré comme le modèle du foyer à *P. falciparum*, les deux constatations suivantes se dégagent :

— une stratégie ubiquiste de lutte ne peut être envisagée ;
— c'est la réduction des cas cliniques qui constitue le principal critère de réussite ou d'échec [25].

Au niveau épidémiologique, dans les régions de paludisme stable de haute endémicité comme les forêts et savanes humides, la morbidité n'est pas proportionnelle à l'intensité de la transmission car les injections répétées du parasite constituent le mécanisme stimulateur de la prémunition.

Dans les régions de transmission très faible ou irrégulière (Swaziland, plateaux de Madagascar, bordure saharienne, Kalahari, Égypte en 1942), le paludisme est instable et influencé par les modifications de l'environnement. Il se traduit par des flambées meurtrières [25].

La désertification que connaît de façon très rapide le continent africain crée un terrain très favorable au paludisme car il s'agit d'une rupture avec l'état des lieux antérieur [26]. Avoir moins d'eau aisément disponible conduit les hommes à y multiplier les retenues artificielles. Paradoxalement en apparence, la sécheresse risque d'entraîner le développement d'une maladie liée à l'eau.

Une autre cause de la diversité des réponses est d'ordre écologique. Quand il y a une densité élevée de moustiques, il y a diminution de la durée de vie des moustiques. Or, une femelle d'anophèle doit vivre 14 jours entre le moment où elle pique un sujet porteur d'hématozoaire et celui où elle est susceptible de transmettre le parasite à un sujet sain. Cette période est la durée de la phase extrinsèque du cycle du parasite.

Ce sont précisément les observations sur les contradictions de la diffusion du paludisme dans les zones rizicoles qui ont recentré l'attention sur les aspects écologiques de la biologie du vecteur. Ces aspects sont d'une appréhension difficile même pour les entomologistes.

Que sait-on sur les maladies liées à l'eau ?

Les scientifiques savent beaucoup de choses sur les relations eau-santé-développement mais les équipes capables d'effectuer et donc de financer les allers et retours terrain-enseignement sont très limitées en nombre. Ceci explique le peu d'enseignement de qualité dispensé sur ce thème, comme le regrettent Biswas et Nakayama [1] qui ne citent que les lieux d'enseignement suivants :

— les Universités de Lund (Suède), de Roorkee (Inde), du Caire, d'Ain-Shams (Égypte) et du Zimbabwe à Harare ;
— le CEFIGRE à Sophia-Antipolis (France) ;
— et l'*Asian Institute of Technology* à Bangkok (Thaïlande).

J'y ajoute la formation dispensée depuis six années à l'Université de Valence en Espagne dans le cadre du *Master International en Enfermedades Parasitarias Tropicales*. Elle est tournée vers l'Amérique latine en grande partie. Elle a le soutien de l'OMS et de la CEE (Programme Erasmus).

Je rappelle aussi la concentration à Montpellier de 2 000 chercheurs travaillant sur les mondes tropicaux et méditerranéens. Les domaines abordés vont des études agraires et paysannes, à l'hydrologie (pôle Agropolis) et jusqu'à la médecine (pôle Euromédecine).

Dans les pays tropicaux, je rappelle que des formations avec diplômes à la clef sont dispensées au Centre d'entomologie médicale et vétérinaire (CEMV) de Bouaké en Côte d'Ivoire et de Maradi au Niger. Elles allient une formation universitaire à une formation de terrain, cette dernière indispensable.

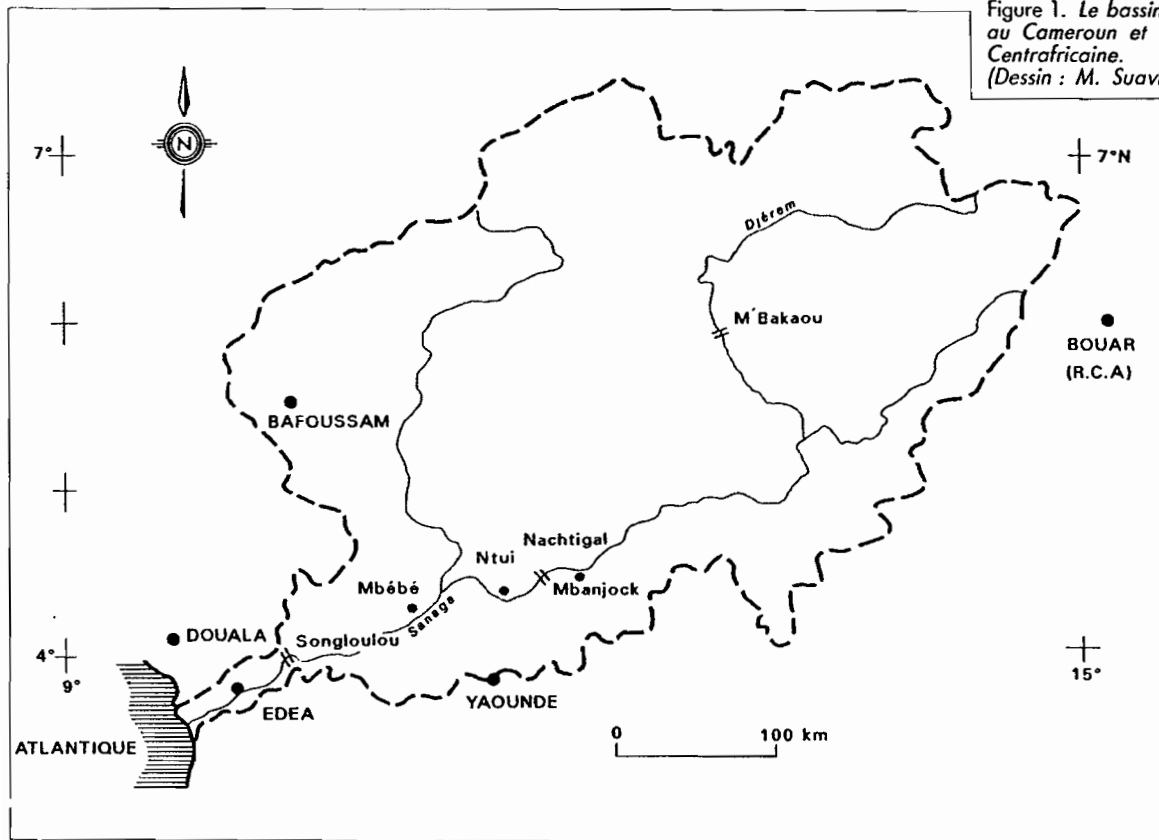
A l'heure actuelle, il est très hasardeux de faire des prévisions sur les conséquences de l'irrigation sur le paludisme et ceci en fait un sujet de recherche prioritaire pour harmoniser les opérations de développement. L'étude de cas est privilégiée afin de disposer de terme d'un large éventail de situations épidémiologiques. Ainsi, le grand programme de recherche de l'ORSTOM « L'eau et la santé dans le contexte du développement » a démarré au Cameroun et au Sénégal en 1988.

L'étude de cas du Cameroun

Au Cameroun, le bassin versant de la Sanaga (131 500 km² à Edéa) est le plus important du pays (*figure 1*) [27]. La recherche sur les rapports eau et santé a été entreprise par Hougard et Robert [11].

Il n'existe pas de projet global d'aménagement du bassin de la Sanaga, connue antérieurement pour l'insalubrité de ses

Figure 1. Le bassin de la Sanaga au Cameroun et en République Centrafricaine.
(Dessin : M. Suavin)



rives infestées de simulies [Nouvelot, comm. pers.]. Toutefois, plusieurs zones de développement sont déjà en place depuis des décennies (le moteur du développement a été la houille blanche). Ces zones comprennent des complexes agro-industriels, des barrages hydro-électriques (Edéa, Songloulou), des barrages régulateurs (M'bakaou sur le Djérem), des industries (aluminium...) et des villes comme Edéa. Les zones traditionnelles désenclavées subissent depuis longtemps l'influence de la culture de rente du cacao.

Quatre zones d'études ont été retenues :

- la région de Mbébé : zone rurale à l'habitat dispersé en milieu forestier, sans projet particulier d'aménagement ;
- la région de Ntui : zone rurale au contact forêt-savane avec deux projets d'aménagement, l'un probable (barrage hydro-électrique de Nachtigal), l'autre incertain (plantation d'ananas) ;
- la région de Mbanjock : zone de savane avec un important complexe sucrier remontant à 1964 qui est à l'origine d'une urbanisation en milieu rural (photos 3, 4 et 5) ;
- la ville d'Edéa, très industrialisée (barrage hydro-électrique homonyme et usine de production d'aluminium) et située sur l'axe Douala-Yaoundé.

L'étude de cas du Sénégal

Au Sénégal, la mise en valeur du fleuve et de ses rives est une entreprise ancienne remontant pour les premières cultures irriguées à 1824. Les aménagements en submersion contrôlée eurent des résultats désastreux [28].

Le remplissage du grand barrage de Manantali (12 milliards de m³) au Mali à partir de 1988 et la mise en route, à 50 km de l'embouchure, de celui de Diama en 1986, sont de nouvelles données à intégrer dans l'hydrologie du fleuve [29]. Le premier ouvrage est destiné à régulariser les apports dans la basse et la moyenne vallée ; le second à empêcher la remontée des eaux salées dans le delta. L'opportunité de ces grands aménagements est très discutée [30].

A l'inverse, ce qui apparaît comme un succès est le Périmètre irrigué villageois (PIV). Le PIV est toujours de petite taille (20-30 ha). Il est situé près du village et reste sommairement aménagé. Son objectif est l'autosuffisance alimentaire des cultivateurs. Ses défauts sont nombreux au niveau technique : la faible capacité des canaux, la rareté des ouvrages hydrauliques (partiteur, régulateur) et les absences de planage et de drainage. Néanmoins, les PIV ont vu leur surface totale

passer de 1 000 ha en 1975 à 26 000 ha en 1989. Pendant la même période, celle des grands périmètres a augmenté plus faiblement, passant de 6 000 à 18 000 ha. Le rendement moyen du riz paddy a été de 4,7 t/ha pour la période 1979-1989 [28].

Sur les terres riveraines du Sénégal, la région de Diamandou a été choisie afin d'étudier la relation eau-santé [11]. Le périmètre endigué de Diamandou est situé près de Podor dans la moyenne vallée du fleuve. Il n'a été mis en eau qu'en 1989. Il couvre 500 ha. Sa mise en valeur est très variée avec des cultures maraîchères sur les sols légers, des rizières sur les sols lourds et une zone piscicole. Une partie non aménagée sert de zone témoin avec une culture de décrue. Le périmètre concerne 4 000 personnes des ethnies *Peul* et *Toucouleur*. Il a été surveillé dès sa mise en eau.

Aujourd'hui, le statut des populations est marqué par l'apparition locale d'une nouvelle maladie, la schistosomiase intestinale. Les planorbes (*Biomphalaria* sp.), mollusques aquatiques hôtes intermédiaires du parasite, *Schistosoma mansoni*, ont envahi les berges du fleuve et certains périmètres dans la région de Richard-Toll. Plus précisément, il y a eu une colonisation par les mollusques des canaux d'aménage des périmètres de culture de

canne à sucre. L'abaissement de la salinité des eaux et la régularisation de leur niveau sont deux phénomènes qui ont favorisé la pullulation des mollusques à la suite de la construction du barrage anti-sel de Diama. La maladie a trouvé un terrain de choix chez des populations très réceptives et peu habituées à prendre des précautions.

Conclusion générale

Je choisis la forme d'une conclusion ouverte en m'appuyant sur un travail fait à la demande des habitants des zones rurales.

Le Projet de développement de l'élevage du nord en Haute-Volta (Burkina Faso depuis 1984) avait demandé en 1980 de réaliser une enquête sur l'utilisation traditionnelle de quatre points d'eau dans l'Oudalan. C'est une région située dans la zone sahélienne. Dans un second temps, il fallait connaître les souhaits des éleveurs concernant un éventuel aménagement hydraulique. Les résultats obtenus furent très différents selon les mares, sans préjuger des possibilités pratiques des aménagements [31].

Références

29. Rochette C. *Le bassin du fleuve Sénégal*. Paris : ORSTOM, Monographies Hydrologiques, 1, 1974.
30. Le Marquand DG. International development of the Senegal River. *Water International* 1990 ; 15 : 223-30.
31. Milleville P, Marchal J. *Enquête sur l'utilisation de quatre mares temporaires de l'Oudalan et l'opportunité de leur aménagement*. Ouagadougou, Haute-Volta : ORD du Sahel-ORSTOM, 1981.
32. Philippon B, Le Barbé L, Le Berre R. L'hydrologie et la télétransmission dans le Programme de Lutte contre l'Onchocercose dans le bassin de la Volta. *Bull CIEH, Ouagadougou* 1983 ; 54 : 17-24.
33. OMS. *Dix années de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest*. OMS, Genève, OCP/GVA/85.1A, 1985.
34. Gioda A, Le Barbé L, Bader J-C. Jaugeages, télétransmission et traçages : éléments pour une stratégie contre l'onchocercose (Afrique Occidentale). *Actes du VIème Congrès mondial des ressources en eau, 29 mai-3 juin 1988, Ottawa*. Urbana, USA : IWRA 1988 ; III : 497-506.
35. Samba EM. OCP intercountry collaboration. *Acta Leidensia* 1990 ; 59 : 115-7.
36. Servat E, Guillet P, Pouyaud B, et al. Surveiller les rivières pour vaincre l'onchocercose. *La Recherche* 1991 ; 22 : 1082-3.

C'est à dessein que j'ai pris un exemple au Burkina Faso car il s'agit d'un pays où plusieurs milliers de mares ont été surcreusées ou aménagées ces dernières années afin de lutter contre la sécheresse qui sévit depuis la fin des années 60.

Aujourd'hui en Afrique, les zones marginales du paludisme sont le théâtre de flambées meurtrières. C'est précisément dans ces zones (Sahel, Éthiopie, Kenya...) que de multiples projets d'aménagements hydrauliques sont prévus pour lutter contre la désertification. Il faut donc mettre en place un système de surveillance pour la prévention ou à défaut pour le traitement rapide de la maladie. La vigilance doit s'étendre aux pays du Maghreb pour éviter une dégradation de la bonne situation de ces pays vis-à-vis du paludisme. Ce système de veille sanitaire doit associer paysans, éleveurs, entomologistes, médecins, hydrologues c'est-à-dire l'ensemble des acteurs du développement. Il faut monter d'autres programmes de travail au long cours comme celui contre l'onchocercose [32-36], appelée aussi cécité des rivières, même si les conditions d'application au paludisme sont nettement plus complexes

Résumé

Le développement n'est pas neutre vis-à-vis des parasitoses liées à l'eau (paludisme, filarioses, amibiases, schistosomiasis, etc.), maladies dont la prévalence culmine sous les tropiques. Il faut nuancer un tableau simpliste où généralement le développement hydraulique conduit de façon univoque à la péjoration du statut médical des populations censées en profiter. L'exemple choisi est significatif car il s'agit de la grande maladie des pays en développement, le paludisme. Ses vecteurs se développent à l'état larvaire dans les rizières et les retenues. Toutefois, la maladie ne suit pas toujours la même courbe ascendante et elle se manifeste, de façon différente, suivant les milieux écologique et socio-économique et le contexte épidémiologique. Pour faire avancer la connaissance des relations complexes eau-santé-développement, il faut des équipes multidisciplinaires de chercheurs et de techniciens. L'approche préconisée pour la recherche passe par la multiplication des études de cas afin d'enquêter sur un large éventail de situations épidémiologiques. Ainsi, il sera possible de prédire les effets des travaux hydrauliques et, éventuellement, d'en éliminer les effets délétères.

Remerciements

M. Jean Mouchet, entomologiste médical, Inspecteur général de recherches honoraire à l'ORSTOM, a rendu possible ce travail par son soutien et ses relectures critiques.

Summary

Increased irrigation and other such developmental programmes always had an effect on the water-related parasitoses (malaria, filariosis, amebiasis, schistosomiasis, ...) prevalent in the tropics. The rather blunt statement that increasing water availability always increases health problems, i.e. has the opposite effect of that planned by the engineers, must be qualified somewhat. To investigate this, we examined the case of malaria; being the major Third World disease, it is a suitable example. The number of malaria vectors increases substantially in irrigated paddy fields and man-made pools, yet disease does not increase in proportion to the mosquito (*Anopheles* sp.), but follows different rhythms linked to natural conditions and the epidemiological environment. Vectors such as arthropods, molluscs and rodents are highly affected by the often rapid environmental changes that occur in the tropics, especially in Africa (desertification and deforestation). Some species become scarce or disappear while others adapt to the new man-made environment and find favourable conditions in which to proliferate. As the vector's ecological conditions change, so does the disease's epidemiology; this may be due to the introduction of new diseases and vectors, intensifying exposure to existing pathogens and parasites or, on the other hand, to the elimination of diseases and vectors. In the case of malaria, increased vector density due to rice-growing may be associated with increased malaria transmission when the reproductive rate is low. But when malaria is at a stable level and transmission greatly exceeds that required to maintain the parasite, few changes will be observed. For any significant progress to be made in understanding the interrelationships between health, environment and increased water availability, we must adopt an interdisciplinary strategy. The approach we have adopted is to multiply case studies in order to include the widest possible range of actual epidemiological conditions. The aim is to predict the consequences of such development and control the negative effects.

5. L'histoire de l'eau - 1999

l'eau

Tome I
**Milieu naturel
et maîtrise**

Gérard Grosclaude (coordinateur)

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
147, rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07

un point sur...

Phytoprotecteurs, protection des plantes, biopesticides

P. BYE, C. DESCOINS, A. DESHAYES, coord.

1991, 178 p.

Le magnésium en agriculture

C. HUGUET, M. COPPENET, coord.

1992, 276 p.

Agricultures et société

C. COURBET, M. BERLAN-DARQUES, Y. DEMARNE, éd.

1993, 326 p.

Élaboration du rendement des principales cultures annuelles

L. COMBE, D. PICARD, coord.

1994, 192 p.

Comportement et bien-être animal

M. PICARD, R.H. PORTER, J.P. SIGNORET, coord.

1994, 228 p.

Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990)

J.C. MULLER, coord.

1996, 392 p.

Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France)

D. BAIZE

1997, 412 p.

Oiseaux à risques en ville et en campagne

Vers une gestion intégrée des populations ?

P. CLERGEAU, coord.

1997, 376 p.

L'information scientifique et technique

Nouveaux enjeux documentaires et éditoriaux

P. VOLLAND-NAIL, coord.

1997, 282 p.

Aliments et industries alimentaires : les priorités de la recherche publique

P. FEILLET, coord.

1998, 288 p.

L'homme et l'animal d'élevage : un débat de société

Arouna P. OUÉDRAOGO, P. LE NEINDRE, coord.

1999, 218 p.

© INRA, Paris 1999 - ISSN : 1250-5218 - ISBN : 2-7380-0854-2

Tome 1 - 2-7380-0855-0

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Cet ouvrage a été réalisé dans le cadre du Comité scientifique "EAU" de l'INRA.

Nous tenons à remercier tout particulièrement M^{me} Nadine Brisson et MM. Pierre Chassin, René Moietta, André Neveu, François Papy et Charles Riou qui ont bien voulu assurer la relecture des différents chapitres.

L'histoire de l'eau

Alain Groda

Après un rappel des conceptions de son cycle au cours de l'histoire, l'eau sera présentée tour à tour comme une amie de l'homme et son ennemie, une source de pouvoir, une pomme de discorde, un patrimoine et une victime. Le but est de montrer un ensemble de situations dans l'histoire et le monde, en décrivant les rapports de l'homme et l'eau dans leur diversité et ainsi de faire percevoir leurs richesses.

La compréhension du cycle de l'eau

L'origine des eaux et leur cycle dans la nature ne s'éclaircissent pour les savants européens qu'à la fin du XVII^e siècle. Le cycle de l'eau comprend trois parties :

- la mer et, dans une moindre mesure, le couvert végétal (évaporation et évapotranspiration dont le moteur est l'énergie solaire) ;
- les nuages (transfert, condensation, précipitations) ;
- l'eau continentale superficielle (sources, rivières, lacs) et souterraine qui finit par retourner à la mer après un temps plus ou moins long à l'exception des eaux fossiles.

En Occident, le livre fondateur de l'hydrologie scientifique est l'œuvre de Pierre Perrault *De l'origine des fontaines* publié en 1674 chez Pierre Le Petit à Paris. Perrault effectua le bilan hydrologique d'un bassin situé sur le cours supérieur de la Seine. En 1687, le britannique Edmond Halley estima l'évaporation de la Méditerranée puis il compara cette évaluation aux apports des fleuves s'y jetant. Pour connaître l'évapotranspiration des végétaux, le mathématicien français De La Hire construisit trois lysimètres en 1688.

Toutefois hors d'Europe dès 500 ans avant J.-C., les Chinois connaissaient le cycle de l'eau et Kautilya, ministre de la dynastie indienne des Maurya (382-184 avant J.-C.), imposait de mesurer la pluie dans un seau devant les magasins agricoles. Pour les services publics, le premier système d'annonce de crues, utilisant des cavaliers voyageant plus vite que le flot, date de 1574. Ce sont les Chinois qui le mirent en place sur le Fleuve Jaune. Les Coréens faisaient des mesures de pluie suivies et systématiques, ne devant rien à l'Occident, dès 1441 et ils continuent jusqu'à nos jours.

La difficulté majeure pour comprendre le cycle de l'eau était d'expliquer pourquoi le niveau des océans ne s'élevait pas, malgré l'apport continu

des fleuves. Il aurait fallu estimer la forte quantité d'eau océanique évaporée par l'énergie solaire or ceci était impossible car les étendues marines n'étaient censées occuper qu'une surface très réduite dans un monde plat et en forme de disque. Héritée de Ptolémée (90-168 après J.-C.), cette conception ne s'effaça que très progressivement chez les Occidentaux, même après les travaux de Copernic (1473-1543) et de Galilée (1564-1642).

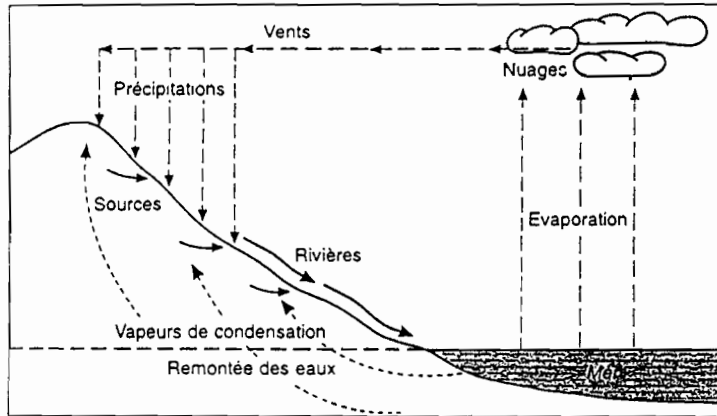


Fig 2.1. Représentations du cycle de l'eau selon Aristote et son temps (Garbrecht, ICID bulletin, 1987) Issue d'infiltrations marines, la vapeur d'eau remonterait par des conduits souterrains jusqu'aux sommets où elle se condenserait. A part cette erreur, le cycle de l'eau, dont l'évaporation marine, est bien compris par Aristote au IV^e siècle avant J.-C.

Un autre paradoxe était difficile à résoudre pour les anciens. En Égypte, la crue du Nil se place en pleine saison sèche et les riverains ne connaissaient pas les sources du fleuve, découvertes seulement au XIX^e siècle par les Européens. Les Anciens Égyptiens, dans les castes basses, admettaient la remontée de la mer dans le fleuve comme dans une ria bretonne et le Nil n'était donc qu'un bras de la Méditerranée mais les lettrés suivaient ses crues sur les premières échelles implantées dans le lit du fleuve, les fameux nilomètres.

Enfin, la pluie cesse et pourtant les rivières continuent de couler. Comment sont-elles alimentées ? Parmi d'autres hypothèses plus solides, Aristote (384-322 avant J.-C.), considérait de façon fantaisiste que l'écoulement des rivières trouvait pour partie sa source dans la condensation de la vapeur d'eau souterraine, elle-même produite par l'écoulement et le dessalement de l'eau de mer dans le sol (fig. 2.1).

Le paradis : l'eau-amie, un don des dieux

Pendant des millénaires, l'humanité a assimilé l'eau à un élément non modifiable du globe comme l'air. Dans un monde essentiellement rural, l'eau était

largement déconnectée des circuits économiques car la source, la rivière, le marigot, le puits et la citerne alimentaient les populations pour un coût nul ou très faible que la main-d'œuvre soit ou non servile.

L'eau était un don des Dieux. L'aversion à modifier le cycle de la nature en interrompant le cours de l'eau se note même chez les Anciens Romains, et les citadins en particulier. Ainsi firent-ils tourner nuit et jour des moulins (fig. 2.2) et alimentèrent-ils fontaines et thermes géants. Les jeux nautiques nécessitèrent la création de cirques spécifiques, les naumachies (fig. 2.3). L'historien Pierre Grimal appelle Rome « la ville de l'eau » car onze aqueducs importants alimentaient la Cité à la fin de l'Empire mais, déjà vers 144 avant J.-C., la technique des siphons renversés était maîtrisée grâce à l'emploi de conduites forcées en plomb, métal abondant en l'actuelle Espagne. Selon des sources bibliographiques, l'eau disponible rapportée par habitant atteignait environ 1 000 litres/jour sous Trajan (98-117 après J.-C.) mais cette évaluation ne tient pas compte des fuites et des pertes énormes du réseau

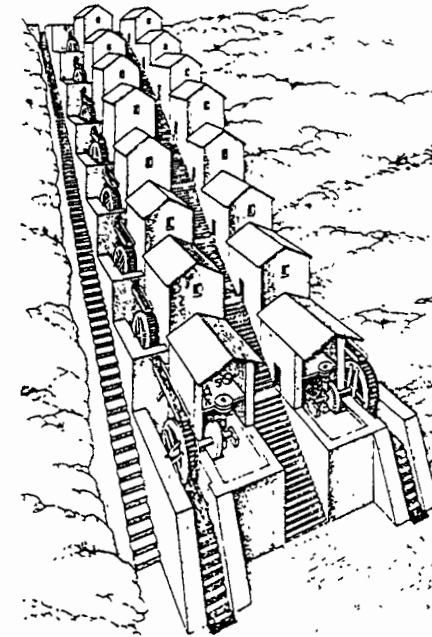


Fig. 2.2. L'eau-amie : le gigantesque moulin hydraulique de Barbégall qui fonctionna au IV^e siècle après J.-C. sous l'empire romain (Trevor Hodge. Pour la science, 1991). Ses ruines sont toujours visibles dans la région d'Arles, près du moulin à vent de Daudet.



Fig. 2.3. L'eau-amie : une naumachie ou un cirque nautique de la Rome antique selon une eau-forte et la libre imagination de Panvinio au XVI^e siècle (Cerchiai, Roma ieri oggi domani, 1990). Les Romains y jouaient à la bataille navale de Salamine entre Grecs et Perses. Aucun de ces cirques ne subsiste à ma connaissance.

antique. Rome puis Constantinople tombées, le goût des fontaines, des jeux d'eaux et des thermes se perpétua et se perfectionna dans le monde arabe et persan avant de pénétrer à nouveau en Europe à l'époque baroque. Toutefois, la vogue du thermalisme n'eut lieu véritablement qu'au XVIII^e et surtout au XIX^e siècles avec la redécouverte du corps et le culte de l'hygiène. Marienbad, Vichy, Baden-Baden, Spa, Bath et Montecatini fleurirent. L'Impératrice Eugénie promut par son exemple le thermalisme. Guy de Maupassant décrit de façon réaliste dans *Mont-Oriol* (1887) la naissance d'une ville thermale à la campagne.

L'eau était un don des Dieux comme l'arbre-fontaine des Canaries qui captait l'eau des brouillards jusqu'en 1610 et ainsi alimentait les populations pré-hispaniques de l'île de Hierro (fig. 2.4). Chez les Incas, le lac Titicaca était le centre originel. Dans le Mexique aztèque, Tlaloc le Dieu de la pluie symbolisé par une grenouille, était la divinité des paysans. De fait, l'eau était le facteur essentiel de la stabilité et de l'organisation des peuples pré-colombiens du Mexique. Enfin, toujours dans le nouveau monde vers 1730, la venue de la pluie était encore un phénomène divin pour Bartolomé Arzáns, chroniqueur de Potosi la plus grande ville américaine du XVII^e siècle.



Fig. 2.4. L'eau-amie : l'arbre-fontaine de Hierro, d'après une gravure anonyme. La légende dit que, par amour pour un Espagnol, une jeune fille révéla le secret de l'alimentation en eau des habitants de cette île aride. Hierro est la plus occidentale des Canaries. Il y a une cinquantaine d'années, un nouvel arbre-fontaine a été planté. Il donne de l'eau potable à partir du brouillard comme l'original disparu au XVI^e siècle (Gioda et al., La recherche, 1992).

Le paradis perdu : l'eau, danger et source de conflits

L'eau-enemie : les maladies hydriques et les calamités naturelles

Toutefois, très vite, l'homme perdit la clef du paradis.

Les maladies liées à l'eau d'origines parasitaire, bactérienne et virale sont très répandues. L'homme les propage par sa mauvaise hygiène ou par des comportements erronés vis-à-vis de l'eau. À la fin du XIX^e siècle, Louis Pasteur et son école montrèrent le rôle des microbes dans les maladies infectieuses et donc l'importance de l'hygiène. Les parasitoses d'origine hydrique dominent très largement la pathologie des habitants du tiers-monde : paludisme (1 million de décès par an, 100 à 150 millions de cas annuels dont 90 % en Afrique et 300 millions de porteurs de parasites), schistosomiasis (300 millions de personnes à risque), filarioses, etc. Parmi les bactéries, le vibron cholérique reste le plus tristement célèbre en Europe à cause de la

pandémie de 1854 (près de 150 000 décès en France) racontée par Jean Giono dans *Le hussard sur le toit*. Au XIX^e et XX^e siècles, sept pandémies mondiales ont causé la mort de centaines de milliers de personnes (fig. 2.5). Parmi les viroses, l'hépatite A est comme le choléra une maladie des mains sales et de l'eau souillée. A ce cortège, il faut ajouter les dysenteries d'origines parasitaire, bactérienne et virale gravissimes chez le jeune enfant.



Fig. 2.5. L'eau-enneemi : le choléra, la mort et son symbole : le squelette. Une représentation journalistique et satirique du XIX^e siècle. (Dodin, Sécheresse, 1992)

Parmi les grandes pluies et les inondations historiques, les huit années mouillées 1313-1320 affectèrent toute l'Europe et produisirent en 1315-1316 l'une des pires famines du Moyen Âge. A Winchester en Angleterre, les foins ne sèchent plus, les récoltes sont ridicules, les bœufs perdent leurs quatre fers, les anguilles se répandent hors des étangs, etc. Le prix du grain atteint le triple de la moyenne calculée sur la période 1270-1350. Le nombre des décès ne sera dépassé à Winchester que lors de la grande peste de 1349. A côté des calamités naturelles, la mauvaise utilisation des sols multiple les ravines et déclenche l'érosion surtout dans les zones montagneuses arides et semi-arides. Également, l'aménagement anarchique et l'occupation permanente des lits majeurs, très larges en région méditerranéenne, sont responsables de la tragédie de juin 1957 du Guil en Haute-Durance décrite par l'hydrologue Maurice Pardé et récemment de celles de Nîmes, de Vaison-la-Romaine et des Alpes-Maritimes.

L'eau-pouvoir : les civilisations « hydrauliques »

Le contrôle de l'eau signifiait le pouvoir dès l'antiquité au Moyen-Orient où elle est particulièrement rare. L'historien Wittvogel a pu parler de civilisations « hydrauliques » reposant sur la propriété et la maîtrise de la gestion de l'eau. Les civilisations égyptienne, assyrienne et du royaume de Saba en sont des exemples patents. Elles fleurirent dans des environnements sensiblement aussi arides que de nos jours.

Au VIII^e siècle avant J.-C., les « quanats » — canaux souterrains artificiels transportant l'eau sur de grandes distances — furent inventés par les habitants d'Urartu dans l'actuelle Turquie. Cette exploitation des eaux issues en général du drainage des aquifères se diffusera en Perse, en Égypte, en Inde, en Grèce, au Maghreb où elle est connue sous le nom de « foggaras », aux Canaries, etc.

Dans la revue américaine *Science* en 1991, Dan Gill propose un scénario basé sur l'Ancien Testament dans lequel la prise de Jérusalem par le roi David aurait été faite en empruntant les conduites souterraines de la ville alimentées par les eaux de la source de Gihon. Toutefois, le cas le plus patent de l'importance de l'eau fut la chute du royaume de Saba attribuée symboliquement à la destruction du seul barrage de Marib (vers le III^e siècle après J.-C.). Dans la sourate des mouches du Coran, l'impiété des habitants de ce royaume fit qu'il disparût par l'eau, le même élément qui avait permis sa prospérité.

Aujourd'hui encore, Israël surveille soigneusement son approvisionnement en eau et seul un puissant réseau interconnecté est capable de satisfaire ses besoins. L'Autorité palestinienne se heurtera rapidement à la carence en eau et donc à sa dépendance vis-à-vis de l'État Hébreu. D'autres cas contemporains bien connus sont ceux des fleuves internationaux où les pays situés à l'amont peuvent contrôler les débits vers l'aval. L'Égypte suit la situation politique de l'Éthiopie, véritable château d'eau du Nil, un pays dont les retenues futures et les prélèvements pourraient rendre caducs le barrage d'Assouan et son agriculture irriguée. Un accord sur l'utilisation des eaux du Jourdain a été conclu entre la Jordanie et Israël.

L'eau-enjeu éco-juridique : les domaines public et privé

Le droit romain considérait l'eau courante comme une chose commune et donc il mettait hors du commerce les fleuves à écoulement continu et leurs rives. Dans le système féodal, le pouvoir politico-militaire a toujours été limité par les communautés rurales qui considéraient l'eau comme un bien collectif dont le renouvellement incessant interdisait l'appropriation seigneuriale. En France, le pouvoir royal par l'Édit des Moulins de 1566 déclara « faire partie du domaine de la couronne tous les fleuves et rivières portant bateaux sauf les droits de pêche, moulins, bacs et autres usages que les particuliers peuvent avoir par titre et possession ».

Aujourd'hui dans le droit français, les eaux domaniales sont composées des lacs navigables, des retenues établies sur le domaine public, des canaux de navigations dont leurs dépendances et leurs accessoires, des cours d'eau

depuis le point de navigabilité jusqu'à l'embouchure y compris les bras non navigables, etc. L'État peut accorder des concessions à des particuliers par des autorisations de prise d'eau personnelle et d'occupation temporaire du domaine public. Enfin, il peut concéder son droit de pêche. Les eaux courantes non domaniales constituent un domaine complexe pour la législation. L'article 2 de la loi du 8 avril 1898 est maintenu dans celle du 3 janvier 1992 : *les riverains n'ont le droit d'user de l'eau courante qui borde ou qui traverse leurs héritages que dans les limites déterminées par la loi...* Enfin, *aucun barrage, aucun ouvrage destiné à l'établissement d'une prise d'eau, d'un moulin ou d'une usine ne peut être entrepris dans un de ces cours d'eau sans l'autorisation de l'administration* (article 106 du Code Rural).

Aux termes de l'article 642 du Code Civil, *celui qui a une source dans son fonds, peut toujours user les eaux à sa volonté dans les limites et les besoins de son héritage* et la jurisprudence a admis que *le législateur a entendu maintenir au propriétaire du fonds sur lequel jaillit la source le droit de disposer entièrement de l'eau*. Ce droit de propriété comporte aussi celui de faire des fouilles bien que celles-ci aient des conséquences à l'aval.

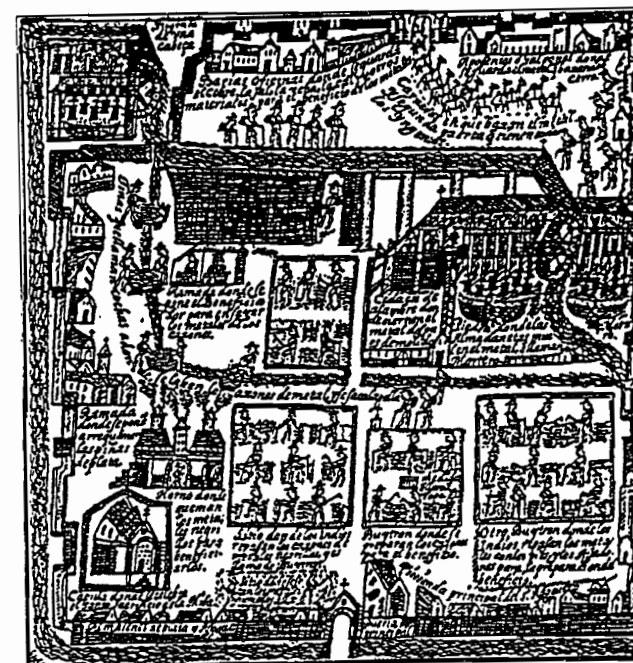
Notre droit de l'eau tout au long de l'histoire est d'autant plus soumis à celui de la propriété que le débit ou le volume de l'eau sont de faible importance tandis que se fortifie dans les lois récentes du 3 janvier 1992 et du 2 février 1995 la notion de patrimoine commun, contrepoids des conflits d'usage entre les domaines public et privé.

L'eau-victime : les pollutions

Dans l'histoire, celles causées par l'homme relèvent essentiellement des pollutions chimiques. Aujourd'hui, s'y ajoutent d'importantes pollutions organiques et thermiques, ces dernières surtout à l'aval des centrales nucléaires.

Parmi les pollutions chimiques, les métaux lourds seront surtout évoqués car leur importance est ancienne. A l'inverse, l'utilisation massive des pesticides, apparus en 1885 dans le vignoble avec la bouillie bordelaise, est postérieure à la découverte des propriétés du DDT par Muller en 1940. L'abondance des nitrates dans l'eau est aussi récente, causée par l'intensification de l'élevage et la fertilisation excessive dans les pays riches ou par le manque de bonnes latrines dans les villes du tiers-monde. De même, le phosphore n'est devenu un problème pour la qualité de eaux stagnantes qu'il enrichit à l'excès ou eutrophise que depuis peu avec la fertilisation surabondante des sols et la généralisation du tout-à-l'égout. Paradoxalement, les progrès de l'hygiène individuelle et l'usage des lessives phosphatées en ont fait un polluant qui touche également les mers comme l'Adriatique avec de spectaculaires et nauséabondes marées vertes.

Les métaux lourds sont très surveillés car les maladies qu'ils provoquent sont d'autant plus dangereuses qu'ils se concentrent dans la chaîne biologique. Citons le plomb (seuil maximal toléré par la norme européenne actuelle : 0,05 mg/l) avec le saturnisme, une intoxication très répandue dans l'antiquité romaine quand les conduites d'eau étaient de ce métal. Ensuite, parlons du



Forma de los ingenios en que se muelen los metales de plata en la Ribera de Potosí, el uno de dos caberos y el otro de una

Fig. 2.6. L'eau-victime : l'énergie hydraulique, le mercure et le travail forcé des Indiens étaient indispensables au fonctionnement des usines d'argent du début du XVIII^e siècle. Potosí, Haut-Pérou, actuelle Bolivie (Arzán, 1705-37, édition de 1965, Brown University, Providence, USA). Si les travaux forcés furent abolis en 1812, l'utilisation de l'eau et du mercure ainsi que le rejet de ce dernier sans retraitement dans les rivières furent continus de 1572 au début du XX^e siècle.

mercure (0,001 mg/l toléré) avec la maladie de Minamata, du nom de la localité japonaise où cette affection sévit après la deuxième guerre mondiale touchant hommes et chats se nourrissant de poissons contaminés par le mercure. Mais dès le XVI^e siècle, ce métal pollue durablement les rivières et les eaux du Haut-Pérou, la Bolivie actuelle, notamment autour de la ville de Potosí. L'introduction de cet élément chimique dans la métallurgie de l'argent en 1572 déclencha la richesse formidable de Potosí. Bien que bâtie à 4 000 m d'altitude et isolée dans les Andes, la ville compta plus de 150 000 habitants entre 1610 et 1650 soit environ la même population que Paris à l'époque. Des dizaines de moulins et d'usines installés au fil de l'eau trituraient le minerai d'argent au début du XVII^e siècle pour l'amalgamer au mercure (fig. 2.6). Maintenant, les anciens terrils de minerai d'argent sont toujours léchés par

les ruisseaux des hautes terres tandis que la pollution par le mercure est devenue très forte à l'aval des gisements d'or dans les rivières descendant vers l'Amazonie bolivienne, péruvienne et brésilienne.

Conclusion

Connaissant l'eau, son histoire et son caractère précieux, sommes-nous économes vis-à-vis d'elle ? Est-ce que nous contribuons à préserver sa qualité ? La réponse est souvent négative et le paradis à reconquérir. Ainsi, nous abusons des bains moussants : un par jour soit quelques 200 litres d'eau alors qu'une douche rapide correspond seulement à une consommation de 20 litres. En Europe, si l'examen de l'évolution historique permet de retrouver la source des erreurs commises, il n'offre guère de modèles et de leçons à nos contemporains et à nous-même. Et pourtant par exemple en épargnant de l'énergie, nous économiserions aussi indirectement de l'eau car cette dernière est indispensable aux centrales hydroélectriques, thermiques et nucléaires. Notre agriculture, après avoir établi des rendement records et être devenue le fer de lance des exportations, doit se préoccuper de reconquérir la qualité de l'eau et de gérer cette ressource. Le monde sera plus propre et l'eau plus claire quand reculera le culte du blanc et la publicité des lessives, quand baissera la débauche lumineuse de nos lampes, et donc quand nous saurons faire « l'éloge de l'ombre » chère à l'écrivain japonais Tanizaki Junichiro. Enfin, un clin d'œil venu de la Grèce antique : sachant que l'élément liquide court, file entre les doigts puis se cache, disparaît et s'évapore, Aristophane dans *Les nuées* conclut logiquement que l'écriture sur le cycle de l'eau est le comble du travail inutile.

Références bibliographiques

- Biswas A.K., 1970. *History of hydrology*. North Holland Publishing Company, Amsterdam & London.
- Bonnin J., 1984. *L'eau dans l'antiquité*. Eyrolles, Paris.
- L'eau, l'industrie, les nuisances*, rubrique « *Histoires d'eau* ». Pierre Johanet et Fils, Paris.
- La Météorologie, 1995. Numéro spécial « Histoire », 8^e série. Météo France, Paris.
- Le Moal R., 1992. *Les droits sur l'eau*. ADEMART, Nantes.
- Le Roy Ladurie E., 1983. *L'histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion, Paris.
- L'Hôte Y., 1990. Historique du concept du cycle de l'eau et des premières mesures hydrologiques en Europe. *Hydrologie continentale*, vol. 5 : 13-27.
- Maneglier H., 1991. *Histoire de l'eau*. François Bourin, Paris.
- Météo France, 1991. Les données pluviométriques anciennes. Météo France et ministère de l'Environnement, Paris.

Pardé M., 1958. La crue de juin 1957. *Revue de géographie alpine*, tome XLVI : 213-230.

Rodda J.C. et Matalas N.C. (éds.), 1987. *Water for the future*. IAHS publication n° 164. Oxon, Grande-Bretagne.

Sircoulon J., 1990. Pierre Perrault, précurseur de l'hydrologie moderne. *Europe* (revue littéraire), n° 739-740 : 40-47.

Tanizaki Junichiro, 1933. *Éloge de l'ombre*. Éditions de 1977 et 1995, Publications Orientalistes de France, Paris.

6. **Résumé : 'Efeitos da agricultura sobre o abastecimento d'água' - 1992 (avec Carlo Merlo, Bruno de Carmantrand, Jean-Claude Simon et Paul Jamet)**

**Brazilian/European Community International Symposium on Agriculture and the Environment.
(Belo Horizonte. May 3-6, 1992).**

Theme: Improving Methods of Environmental Impact Assessment

EFEITOS DA AGRICULTURA SOBRE O ABASTECIMENTO D'ÁGUA

*Alain GIODA*¹
*Carlo MERLO*²
*Bruno de CARMANTRAND*³
*Jean-Claude SIMON*⁴
*Paul JAMET*⁵

RESUMO

As conseqüências da agricultura intensiva (incluindo a pecuária) sobre as fontes d'água e sua qualidade são tratadas nas regiões mediterrâneas e temperadas através dos exemplos franceses e italianos. O papel da atividade agrícola sobre o ciclo hidrológico é lembrado, assim como as principais leis sobre a água, antes de mostrar o balanço da situação atual. As perspectivas e os trabalhos de pesquisa contemporâneos concluem esta comunicação.

Palavras-chaves: *ciclo hidrológico, irrigação, nitratos, pesticidas, França, Itália, Europa.*

¹ Hydrologie, ORSTOM, BP 5045, F-34032 Montpellier cedex 01

² Istituto di Idraulica Agraria, Università degli Studi di Torino, Corso Raffaello 8, I-10126 Torino.

³ Agence de l'Eau "Rhône-Méditerranée-Corse", 27 bd Nédélec, F-13003 Marseille.

⁴ Station d'Agronomie, INRA, rue Stang Vihan, F-29000 Quimper.

⁵ Station de Phytopharmacie, INRA, route de Saint Cyr, F-78026 Versailles cedex

7. *L'arbre fontaine - 1992 (avec Andrés Acosta Baladón, Pierre Fontanel, Zósimo Hernandez Martín, Arnoldo Santos)*

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 MARTÍN 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⁾. Témoignent 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. Également 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



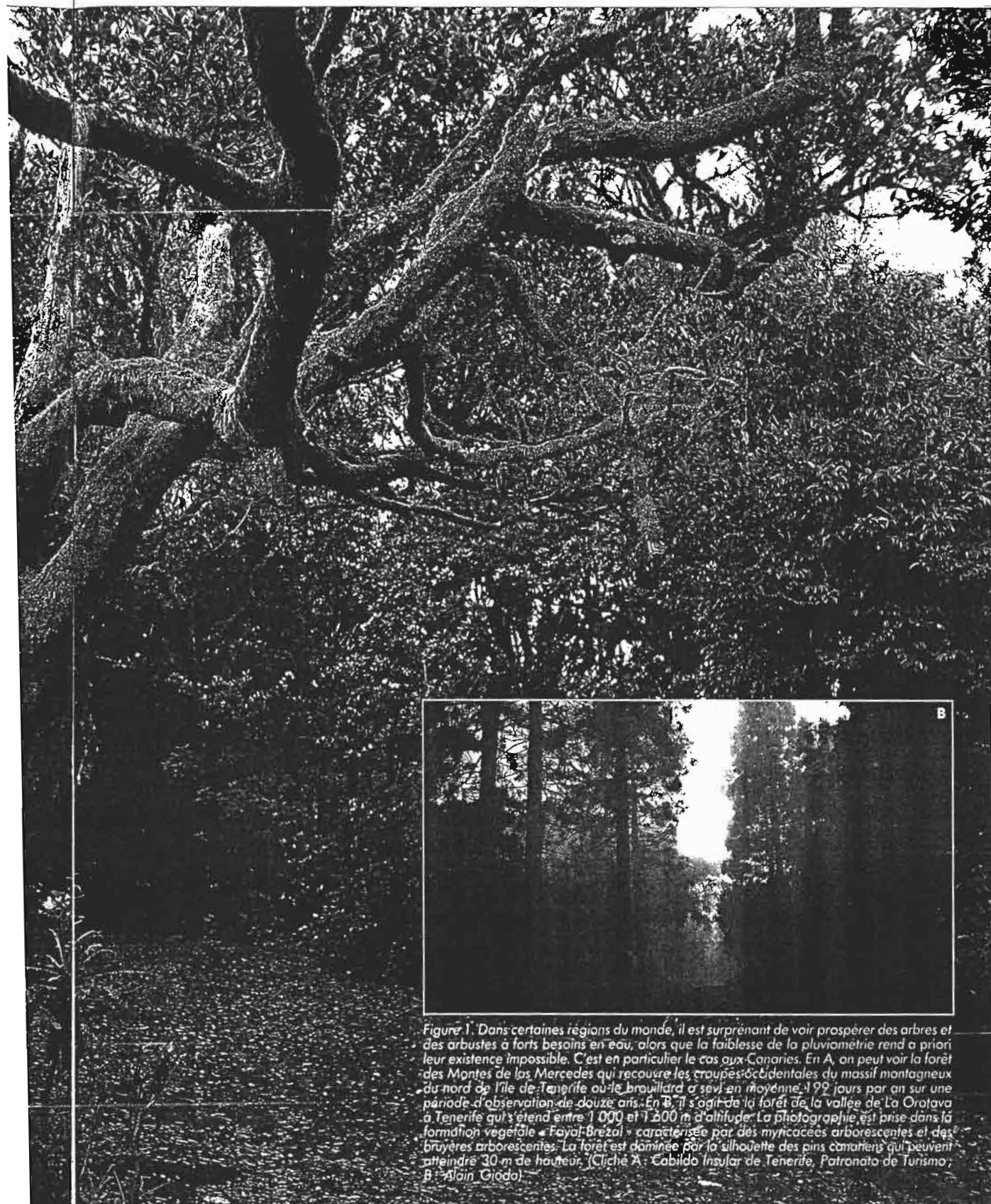


Figure 1. Dans certaines régions du monde, il est surprenant de voir prospérer des arbres et des arbustes à forts besoins en eau, alors que la faiblesse de la pluviométrie rend a priori leur existence impossible. C'est en particulier le cas aux Canaries. En A, on peut voir la forêt des Montes de las Mercedes qui recouvre les croupes occidentales du massif montagneux du nord de l'île de Tenerife où le brouillard et son en moyenne, 192 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 1 200 m d'altitude. La photographie est prise dans la formation végétale « Fayal-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 Gijado)

ALAIN GIODA, hydrologue, est chargé de recherche au centre ORSTOM de Montpellier et membre du réseau SET (Systèmes écologiques tropicaux).
ANDRÉS ACOSTA BALADÓN, de nationalité uruguayenne, est agronome-météorologue honoraire de l'Organisation météorologique mondiale.
PIERRE FANTANEL est botaniste au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) à Montpellier.
XÓSIMO HERNÁNDEZ 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 auprès 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 Canory Islands* de G. Glas, parue à Londres en 1764 (in Font Tullot), 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*.

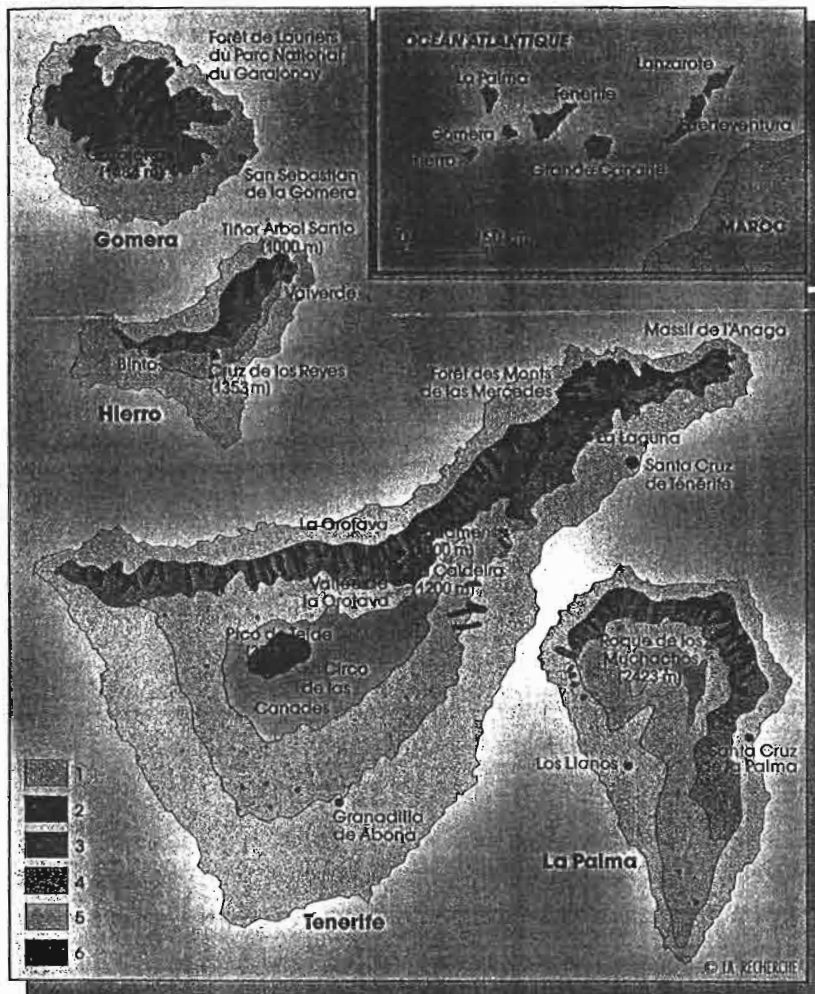


Figure 3. La végétation de quelques îles hautes des Canaries permet d'apprécier l'étagement des formations végétales dû au brouillard. La forêt de lauriers est presque exclusivement cantonnée aux versants septentrionaux. Elle est soumise à l'influence des masses nuageuses, dont les brouillards, poussés 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 « Foyal-Brezal » caractérisées par *Myrica faya* et *Erica arborea*, (4) forêts à *Pinus canariensis* avec petites étendues de formations arbustives à *Cytisus proliferus*, (5) formations arbustives « Retama-Codeso » caractérisées par *Spartocytisus nubigenus* et *Adenocarpus viscosus*, (6) formations altimontaines. (Schémas d'après F. White, 1986)

(1) D.C. Dorlos y Padrón, Noticias generales históricas sobre la isla del Hierro, Goya (ed.), S/ Cruz de Tenerife, 3^e éd., 1988.
 (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, Voyages anciens et modernes, Magasin Pittoresque, Paris, III, 1855.
 (6) P.L. Perez de Poz (ed.), Parque Nacional de Garajonay, ICONA, Madrid, 1990.
 (7) P. Dansereau, Collectanea Bot., VII, 1, 11, 227, 1968.
 (8) M.J. Dourajjanni et C.F. Ponce, Los parques nacionales del Perú, INCAFO, Madrid, 1978.
 (9) Reis F. Cunha, Garcia de Orta, 12, 4, 719, 1964.
 (10) A.N. Acosta Boladón, A. Giada, Sécheresse, 2, 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 *laurisylve*, 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'Erkowitz, 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 Erkowitz, 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-

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

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-





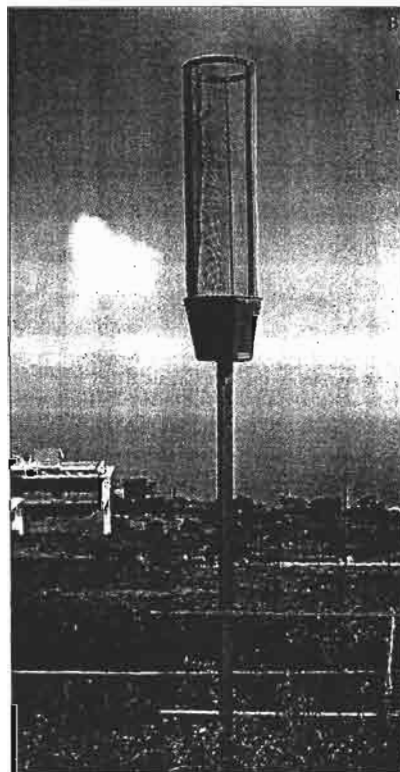
Figure 5. Les zones favorables à la précipitation du brouillard sont nombreuses sur le globe notamment dans les régions côtières et insulaires des zones tropicales et subtropicales. Les régions concernées sont à la fois les tropiques humides et les tropiques arides. Parmi les zones tropicales et subtropicales 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'Equateur 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'Angolo méridional et, tout à l'est du continent, les chaînes côtières du Soudan, de l'Erythrée 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.

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 *synbos*, 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.

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 orbres 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)

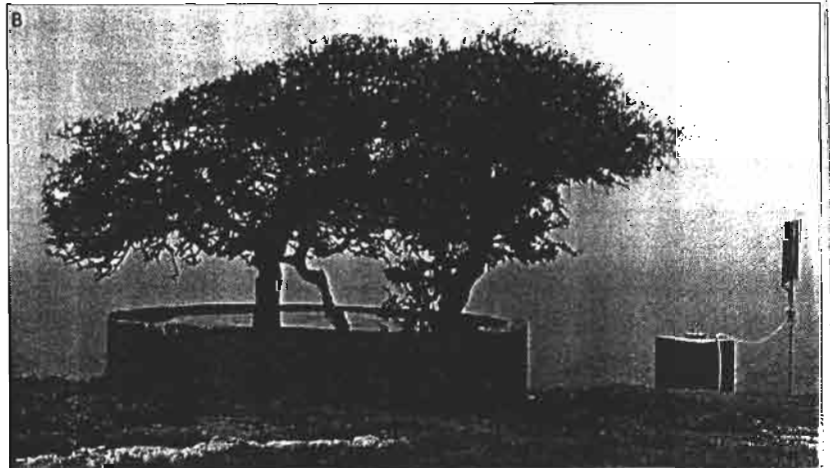


A



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* dominant 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 (*Myrceu-*

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

usivement
es. En dé-
été instal-
branches
r le dia-
tée de la
leur dia-
r les pré-
urvenu la
le brouil-
se au tout
dissipation
n phéno-
s d'autres
favorisées
e du ca-
simulation
journalée.
sensible à
le couvert

es forêts
est, par
au Chili,
ne direc-
sommets
m d'alti-
la ville de
nd, entre
: l'olivier
le canelo
(Myrce-

montagnardes⁽¹³⁾. Il est aisé de conce-
voir que, dans les localités où des végé-
taux jouent le rôle de capteur de l'hu-
midité et de producteur d'eau à la ma-
nière d'une borne-fontaine, les hom-
mes aient pu installer une agricul-
ture qui mette à profit le caractère
presque permanent des brouillards.
Déjà, les Pré-Colombiens avaient ex-
ploité 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, ca-
ractéristique des collines côtières du
Pérou qui abritent des traces antiques
de mise en valeur agricole et des ruines
d'établissements humains. Après la dis-
parition, vers 3 800 ans BP (avant le
présent), de la civilisation côtière du
Pré-Céramique Terminal, le plus im-
portant 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 *patillos*, deux
légumineuses arborées, se développe
entre les terrasses de Chavín; toujours
bien visibles et datées grâce à leur céra-
mique. 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 ter-
roirs⁽¹⁴⁾. La flore aurait survécu jusqu'à
aujourd'hui grâce aux ressources en eau
provenant des brouillards. De plus,
dans les dépôts des gisements Cha-
vín, 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 impor-
tant 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 éta-
blirent aussi en pleine zone des brouil-
lards, à plus de 500 m d'altitude, un
village perché de type défensif à Chan-
caylo, 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 ex-
ploité un très grand agave d'origine
brésilienne (*Furcraea gigantea*) comme
collecteur. Aujourd'hui, les Cap-Ver-
diens exploitent toujours les agaves
pour se procurer de l'eau. Le dattier
(*Phoenix dactylifera*) a lui aussi été uti-
lisé dans un milieu très aride, toujours
dans le même archipel⁽⁹⁾. Sur Hierro, le
génévrier de Phénicie (*Juniperus phoe-
nicea*) a été employé comme capteur
dans les années 1980 par l'ICONA (Insti-
tuto 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 méditerra-
néen (*Rhamnus spp.*) sont utilisés
comme collecteurs au-dessus d'une ci-
terne 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 locale-
ment, 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 systéma-
tique sur cette collecte commence à
être entreprise et des techniques sont
mises au point. Par exemple, du phéno-
mène de précipitation sur les rochers,
que nous avons vu plus haut, est venue
l'idée d'optimiser un attrape-brouil-
lard. Les scientifiques ont remplacé les
pierres par des grillages du type mousti-
quaire. Ces recherches ont débuté sous
l'impulsion d'un Uruguayen, R.P. Saá,
dans les années 1950 à l'université ca-
tholique 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 « Ca-
manchaca » (le nom indien du brouil-
lard 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 perpendi-
culairement à celle-ci, la collecte de

(13) J. Moley,
Climatic Change,
19, 79, 1991.

(14) F.A. Engel,
*De los beganios
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'apparier 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 natio-
nale, pastoralisme et coupe forestière
furent les modes d'exploitation de La-
chay.

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 exception-
nelle. Enfin, Hermógenes Gonçalves,
un agriculteur de l'île de Brava, dans

brêts né-
ntagnes,
i en alti-
diminue
e choses
s rapide
nes lati-
logique
d tropi-
ne flore
ons plus
aires du
t strati-
équiem-
érature
à basse
uement

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* (cyprès), *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'Erkowitz, 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 Perez de l'ICONA dans cet environnement forestier⁽⁶⁾.

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 renforcent 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.

8. Les puits aériens de Théodosia, de Montpellier et de Trans - 1991 (*avec Acosta Baladón*)

Les puits aériens de Théodosia, de Montpellier et de Trans

Alain Gioda

Hydrologue,
ORSTOM, BP 5045,
34032 Montpellier Cedex
01, France.

avec la collaboration de
Andrés N. Acosta
Baladón

Expert Principal Honoraire
de l'OMM,
Paseo Canalejas 57/61,
7A, 37001
Salamanque, Espagne.

Entre 1905 et la Seconde guerre mondiale, des scientifiques russes, français et belges tentèrent de capter la vapeur d'eau atmosphérique autour de la Méditerranée avec des tas de cailloux et cela à cause de la belle histoire des fontaines de Théodosia en Crimée.

J'ai essayé par un montage d'articles anciens et peu accessibles de vous conter leurs recherches et, en faisant des petites enquêtes, de reconstituer la fin de ces expériences en France.

Les fontaines sans source

M. Vinogradoff, ingénieur russe réfugié en Yougoslavie à la suite de la Révolution d'Octobre, envoya une communication à M. de Zvorikine, correspondant de la Société d'Agriculture du Nord de la Russie. M. de Zvorikine en fit part ensuite à M. Henri Hitier qui la présenta à l'Académie d'Agriculture de Paris. Le texte suivant parut en 1925 dans les comptes rendus de cette vénérable institution [1]. Je me suis permis simplement de censurer les passages les plus fleuris.

« La Crimée, l'ancienne Tauride, comme écrivit Hérodote était au V^e siècle avant Jésus-Christ, un pays couvert de cultures faisant partie des colonies grecques de la mer Noire, le Pont-Euxin. La viticulture y prospérait, ce que confirment les amphores de grès découvertes en grandes quantités dans les fouilles de Kertch, ancienne Ponticapée » (figure 1).

Théodosia était une brillante cité, colonie de Milet, fondée vers 600 avant Jésus-Christ. Elle fut détruite par les Huns (IV^e siècle après J-C) alors qu'elle était devenue colonie romaine. Sur ses ruines, une très prospère cité, Kaffa ou Cafra, fut fondée par Gênes en 1266 qui acheta l'emplacement au khan de la Horde d'Or. Elle devint une grande étape de la route de la soie et de la route des épices. Kaffa reçut le nom de Kefe après sa prise par les Turcs en 1475 soit 22 ans après la chute de Constantinople et de l'Empire Romain d'Orient. Les Ottomans en firent la capitale de la Crimée. Pillée lors de la guerre russo-turque en 1771, elle fut rattachée à la Sainte Russie sous le nom de Féodosia ou Féodosiya, lors de l'annexion de la Crimée (1783).

Un siècle plus tard, ce pays connaissait

une terrible sécheresse. Le gouvernement russe fut fort préoccupé et en 1888 fut construite la première conduite d'eau. Elle amenait 500 m³/jour d'eau à Féodosiya d'une source de la montagne Aguer-Mikh, située à 30 km. De plus, il fut élaboré un vaste plan de reboisement des montagnes de la Crimée, la Chaîne Taurique.

L'exécution des travaux fut confiée à l'ingénieur Zibold et commença en 1871. En 1903, plusieurs centaines d'hectares étaient déjà boisés.

Toutefois, pendant les travaux on découvrit tout un réseau de tuyaux de grès de 5 à 7 cm de diamètre qui alimentait les 114 (?) fontaines tarées de Théodosia. Sans doute, faut-il lire les 14 fontaines. M. Zibold constata que les tuyaux prenaient l'eau des crêtes des montagnes environnantes à une altitude de 300-320 m, mais dans aucun de ces endroits, il ne trouva trace de source.

En revanche, il y trouva des monceaux formant des cônes de pierres calcaires concassées dont l'ensemble de l'entassement mesurait environ 30 m de longueur, 25 m de largeur et 10 m de hauteur. Les pierres se trouvaient sous 5 à 10 cm de terre. Il trouva ainsi sur une distance

d'environ 3 km, 13 autres de ces appareils gigantesques qui alimentaient les fontaines.

Dans son rapport au Ministère de l'Agriculture, M. Zibold suppose que les vapeurs atmosphériques, en pénétrant entre les interstices des pierres dans les profondeurs fraîches de ces appareils, se refroidissaient et se transformaient en eau qui s'écoulait vers les fontaines.

D'après un calcul approximatif de M. Zibold, en supposant que ces condensateurs ne fonctionnaient que 8 heures par jour et prenant en considération la capacité de la tuyauterie, chacun de ces condensateurs était en état de produire 55,4 m³ par jour soit environ 2 l/s pendant 8 heures (en admettant un diamètre moyen de 6 cm pour les conduites, on obtient une vitesse moyenne du flot de l'ordre de 0,7 m/s) « de sorte que les citernes aménagées au-dessus des 14 fontaines pouvaient être alimentées par presque 720 m³ par jour [1] ».

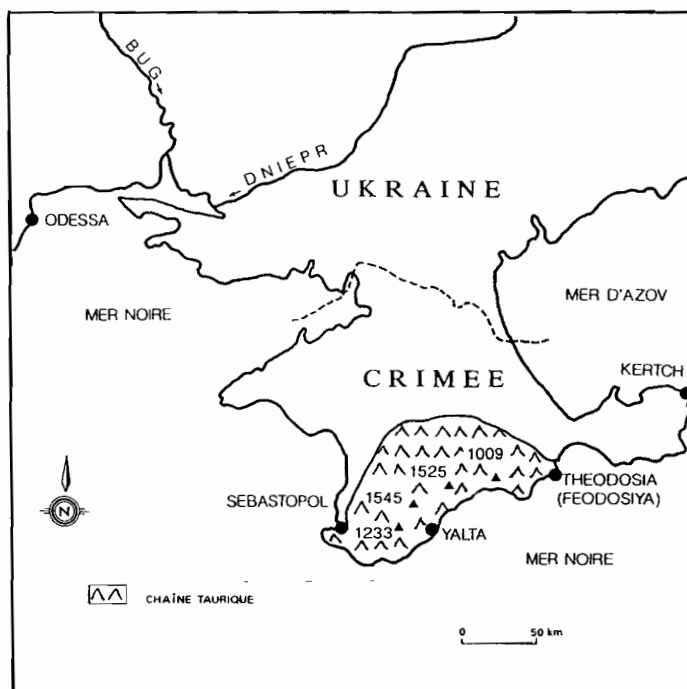


Figure 1. Esquisse de la localisation de Théodosia.

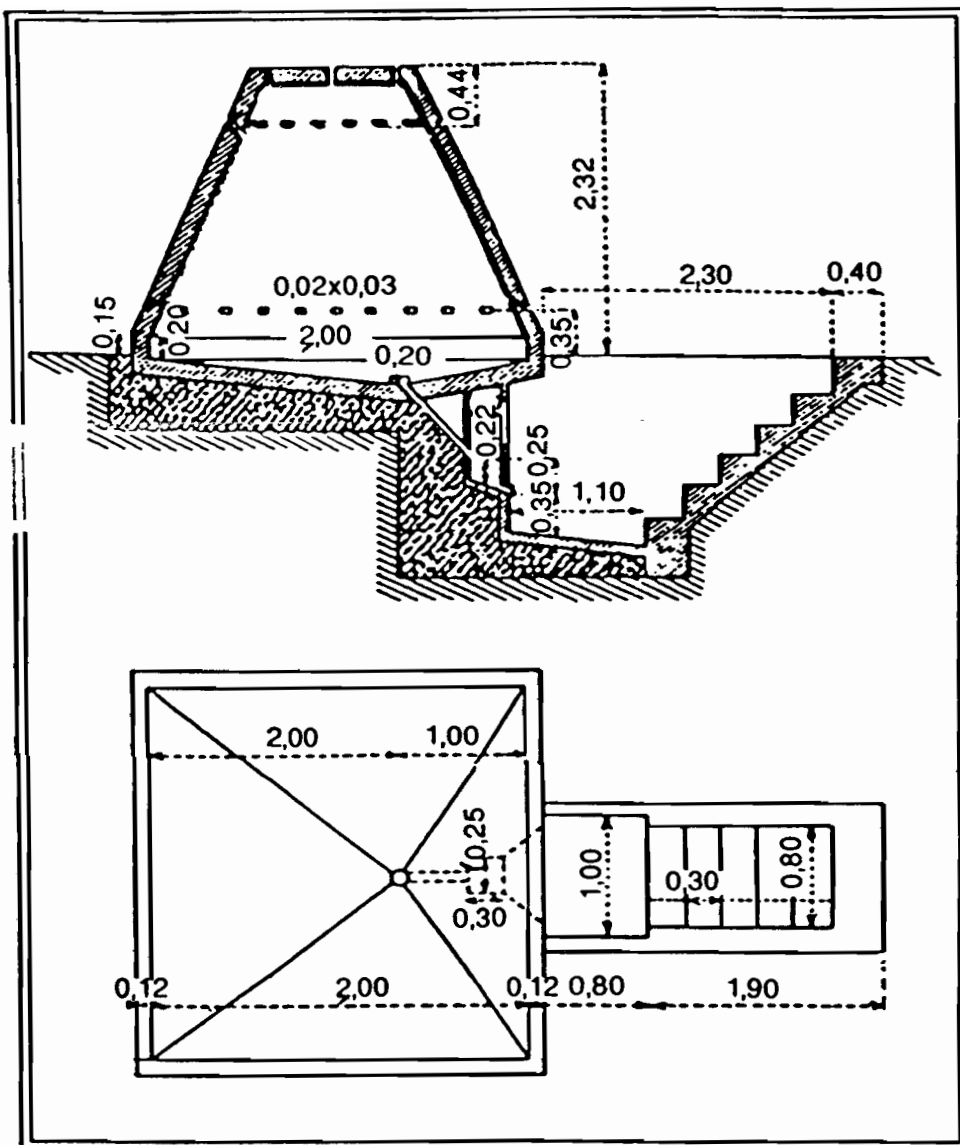


Figure 2. Croquis du capteur de Chaptal [4].

Références

1. Hitier H. Condensateurs des vapeurs atmosphériques dans l'Antiquité, Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris, 1925 ; 679-83.
2. Chaptal L. Contribution à l'étude de la rosée et des sources secondaires d'humidité du sol, *Annales de la Science Agronomique*, 1928 ; 134-54.
3. Chaptal L. La rosée et les dépôts aqueux de l'atmosphère, *Annales de la Science Agronomique*, 1930 ; 69-77.
4. Chaptal L. La lutte contre la sécheresse. La captation de la vapeur d'eau atmosphérique, *La Nature* n° 2893, 60^e année, 2^e semestre, 15 novembre, 1932 ; 449-54.
5. Reis F. Cunha. O problema da captação da água do nevoeiro em Cabo Verde, Garcia de Orta, Lisboa, 1964 ; vol. 12, n° 4, 719-56.

6. Sensidoni F. Contributo al problema idrico nelle regioni costiere a clima caldo-arido, *Giornale del Genio Civile*, Roma, 1945 ; Fasc. 1 : 84-107.
7. Masson H. Condensations atmosphériques non enregistrables au pluviomètre. L'eau de condensation et la végétation, *Bulletin de l'IFAN*, Dakar, 1948 ; Tome X : 1-181.
8. Chaptal L. Importance que présentent pour l'agriculture les sources secondaires d'humidité. In : *Kommission für Landwirtschaftliche Meteorologie*, OMM, Genève, 1937, Sonderabdruck aus Publikation 36, XV : 82-6.
9. Damagnez J. Les sources secondaires d'humidité et l'approvisionnement en eau des sols de la France méditerranéenne, Symposium Rosée, Assemblée Générale de l'UGGI, 3-4 septembre 1957, AISH n° 44, Genbrugge (Belgique), 1958 ; vol. II, 446-57.

En 1905, M. Zibold, avec les crédits du Ministère de l'Agriculture Russe, reconstitua un ancien condensateur en utilisant les galets des plages de Féodosiya. Il échoua peut-être en partie à cause de la nature lithologique différente (mais non spécifiée) du matériau par rapport à l'original. Toutefois conclut M. Hitier, son système avait encore besoin d'être affiné quand éclata la Révolution de 1917 qui dispersa les hommes et les idées.

La pyramide tronquée

Les résultats des expériences antérieures de M. Chaptal [2, 3] sur la rosée et la fixation de la vapeur d'eau sur le sol, ainsi que les analogies existant entre les climats de Théodosia et de Montpellier amenèrent ce scientifique à essayer d'obtenir de l'eau potable par le procédé décrit en Crimée.

À cet effet, un dispositif du type tas de cailloux fut installé au début de 1929 à la Station de Physique et de Climatologie Agricoles de Bel-Air dans le quartier du Petit Bard à Montpellier ; M. Chaptal étant le Directeur de cette Station. L'ensemble était bien exposé aux vents marins.

« Sur une plate-forme carrée en ciment imperméabilisée, mesurant 3 m de côté, on a entassé sur une hauteur de 2,50 m des pierres calcaires non marneuses, débitées en morceaux irréguliers, ayant des dimensions comprises entre 5 et 10 cm (figure 2). L'ensemble qui a l'aspect d'un tronc de pyramide est recouvert par un revêtement en béton dans lequel sont ménagés, vers la base et le sommet, des trous d'aération (figure 3).

La plate-forme est légèrement inclinée vers le centre et de la partie la plus basse part un conduit aboutissant à un réservoir étanche creusé dans le sol.

Ce capteur a donné pendant la saison chaude de 1930 (avril-septembre) 87,8 l d'eau et, en 1931, 40,5 l ; les conditions ayant été moins favorables cette année-là. Le rendement quotidien maximal a été de 2,5 l le 10 mai 1930. 28 fois le capteur a fourni plus de 1 l en 24 h ; 4 fois plus de 2 l » [4].

Les dimensions du capteur étaient trop restreintes selon Chaptal pour que l'on puisse évaluer, même approximativement, les quantités d'eau que pouvaient donner des capteurs plus volumineux. Quand on augmente le volume, poursuit Chaptal, on augmente non seulement la surface de dépôt, mais aussi l'inertie thermique de l'ensemble et par suite le rendement par unité. Les résultats obtenus à Montpellier laissaient toutefois suppo-

ser que la production serait assez élevée pour être pratiquement intéressante.

Le puits aérien

« C'est afin de bien déterminer les conditions de rendement maximum et de se rendre compte du rôle économique que peuvent jouer les capteurs que M. Achille Knapen, qui étudiait depuis de nombreuses années les diverses questions relatives à l'humidité de l'air et des constructions, a édifié à Trans, dans le département du Var, un condensateur qu'il a dénommé puits aérien (Photo 2).

Le puits aérien a l'aspect d'une vaste cloche en maçonnerie, mesurant 12 m de diamètre à la base et 12 m de hauteur (Photo 3). La paroi a une épaisseur de 2,5 m (figure 4) » tandis que celle de la voûte atteint 4 m. Cet ensemble très massif est constitué de roches calcaires assemblées selon la technique des pierres apparentes. « Cette paroi porte aux parties inférieure et supérieure plusieurs rangées d'ouvertures faisant communiquer l'extérieur avec l'intérieur (Photo 5). Sous la cloche, et séparée d'elle par un

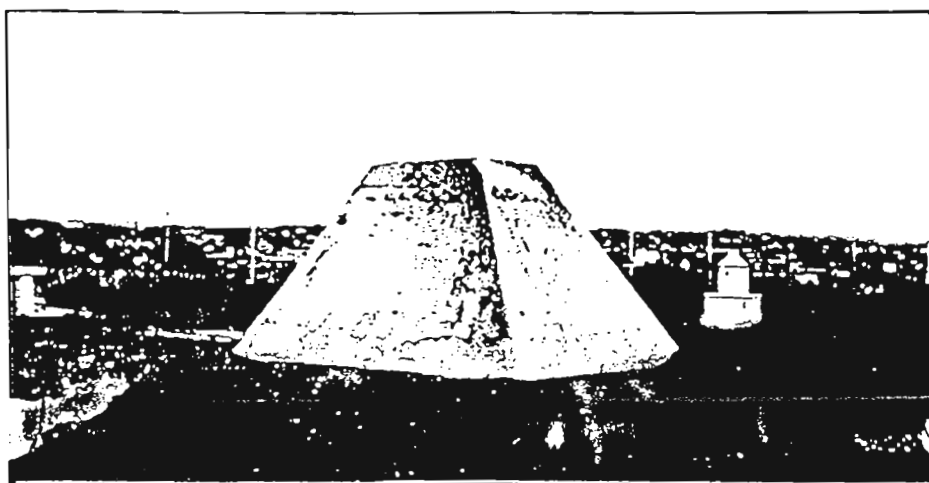


Figure 3. Vue d'ensemble du capteur de Chaptal [4].

assez grand espace, se trouve une masse de béton en grenaille de porphyre et mortier au ciment dans laquelle on a disposé, suivant des directions déterminées, des tubes poreux spéciaux connus sous le nom de siphons aériens (Photo 6) [4]. » Sur la face externe de cette masse bétonnée, on a implanté une grande quantité

de morceaux d'ardoises afin d'augmenter la surface de contact entre l'air et les solides destinés à recevoir les dépôts aqueux (Photo 4). Au centre, on trouve une cavité cylindrique de 1 m de diamètre et 9 m de hauteur, dont l'axe est occupé par un tube métallique de 30 cm de diamètre qui traverse la cloche et la dépasse de 50 cm. »

Voici comment M. Knapen concevait le fonctionnement de son puits : « la nuit, l'air froid pénètre dans le tube métallique central. Il remonte ensuite par le vide annulaire qui entoure ce tube, glisse le long de la masse externe de la masse en béton et sort par les orifices inférieurs de la cloche. Le jour, l'air pénètre par les orifices supérieurs de l'enveloppe, il arrive au contact des ardoises et de la masse interne à basse température, se refroidit, laisse déposer une partie de son humidité et s'échappe par les ouvertures inférieures. Les gouttelettes formées à l'intérieur du condensateur tombent sur le plancher et elles sont conduites par des rigoles dans un réservoir souterrain [4] ».

Au Congrès des Ingénieurs Civils qui eut lieu à Paris en septembre 1931, M. Knapen avait fait savoir que la construction de son puits était à peu près terminée, mais qu'il fallait attendre que les maçonneries échauffées par la carbonation des mortiers aient repris leur température normale. Selon Chaptal [4], bien que cet état thermique ne soit pas encore atteint en septembre 1931, la condensation a commencé à se produire, faisant prévoir un prochain fonctionnement de l'installation.

En fait, rien ne parut dans les revues scientifiques selon Reis F. Cunha [5] et d'après notre petite enquête. Toutefois, F. Sensidoni évoquait les expériences de Théodosia, de Chaptal et de Knapen quand il parlait du développement du

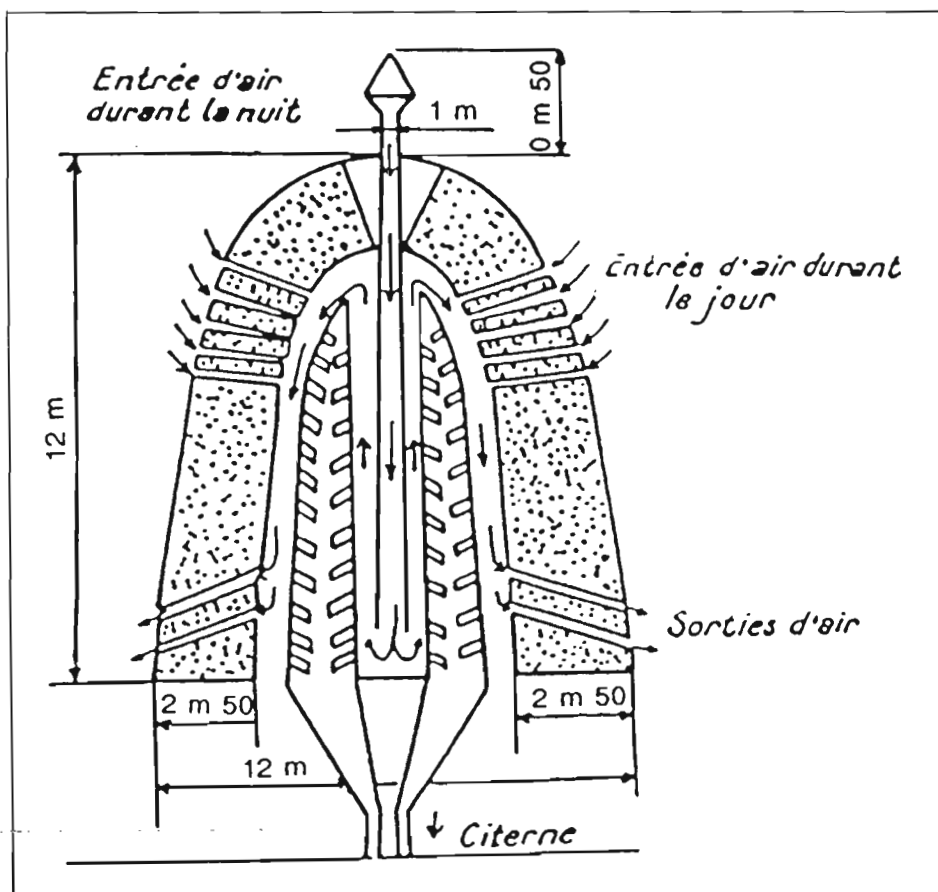


Figure 4. Coupe du puits aérien de Knapen (*La Nature*, Paris 1933, 1^{er} semestre : 300 in [7]).



Photo 1. Panneau indicateur du puits aérien de Trans qui se trouve à l'ouest du village, au-delà de la route menant à Draguignan (Var). (Cliché Alain Gioda, ORSTOM).



Photo 2. Le puits aérien de Trans dans son cadre naturel. (Cliché Alain Gioda, ORSTOM).

désert de la Libye [6]. D'autre part, H. Masson [7] rappelait que Knapen n'avait pas utilisé les calcaires poreux de Théodosia et de Montpellier ; d'ailleurs, il se proposait de continuer pareilles expériences en Mauritanie, mais ce ne fut pas le cas [7].

Il est important de savoir que la rigueur de M. Chaptal et la qualité de l'ensemble de ses travaux firent qu'en 1935 l'Organisation Météorologique Internationale, l'ancêtre de l'OMM, l'avait chargé, au cours de la réunion de Dantzig, d'effectuer une enquête sur l'intérêt des sources secondaires d'humidité et sur l'état d'avancement des recherches dans ce domaine [8, 9].

Conclusion

La guerre, à nouveau, dispersa les hommes notamment à cause du prétexte du corridor de Dantzig. L. Chaptal s'éteignit. Son capteur existait encore en 1962 et fut cité par Reis F. Cunha [5], chef du groupe de travail de bioclimatologie pour l'Outre-Mer portugais, qui le décrit lors d'un voyage d'études à Montpellier. En 1969, avant l'abandon par l'INRA de la Station de Physique et de Bioclimatologie Agricoles de Bel-Air, le capteur avait été détruit. Les rendements avaient toujours été très modestes. Les archives de la Station furent transfé-

rées à l'INRA-Montfavet, près d'Avignon où elles sont conservées aujourd'hui.

A Trans, entre les Arcs et Draguignan, le puits aérien existe toujours. Pour s'y rendre, sur l'autoroute La Provençale en direction de Nice, sortir au panneau Le Muy-Draguignan puis poursuivre vers Draguignan ; Trans est à moins de 10 km de la sortie de l'autoroute. Le puits aérien a même été restauré après avoir servi de vespasienne pendant des années. A l'adret parmi les villas de caractère, il domine, de son élégante silhouette de colombier, la petite ville arrosée par la Nartuby et il est devenu l'une des curiosités touristiques de la localité (Photo 1)

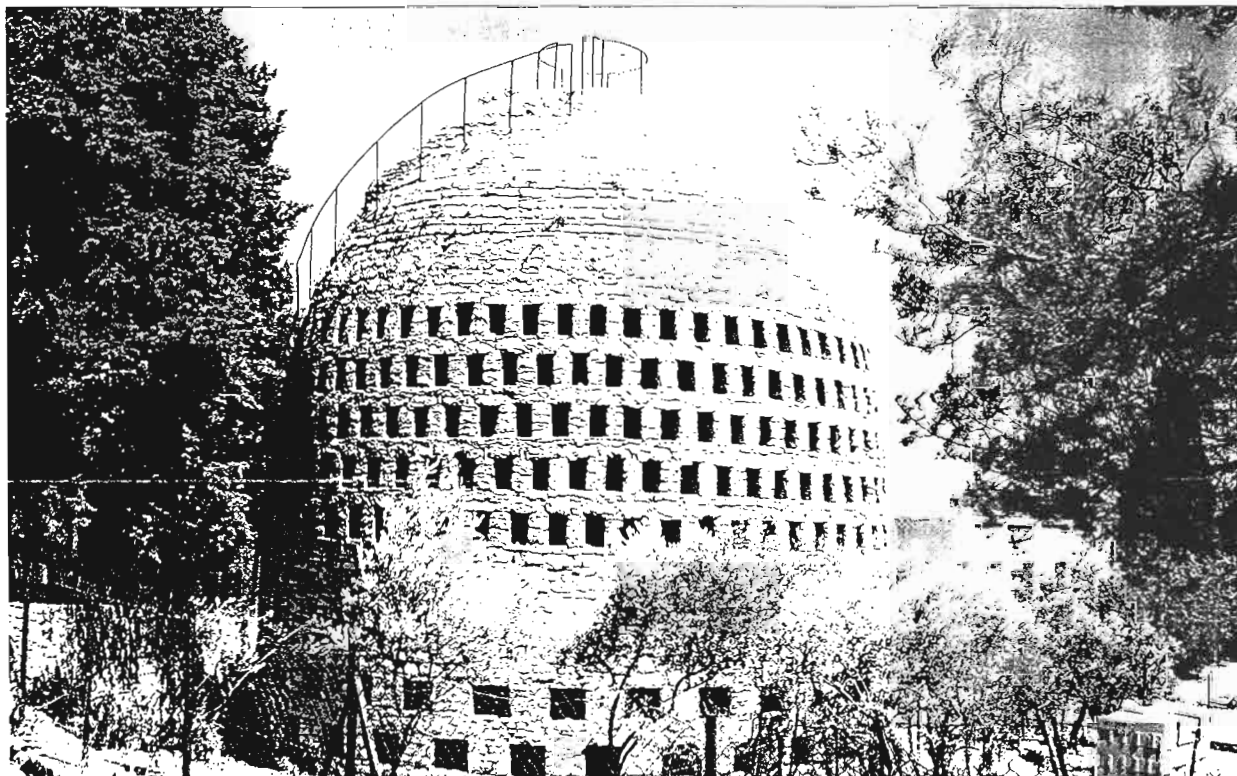


Photo 3. Vue d'ensemble du puits aérien de Trans-en-Provence (Var). (Cliché Alain Gioda, ORSTOM).

Résumé

La découverte d'un réseau antique de tuyaux prenant leurs sources à partir de grands pierriers à Théodosia (aujourd'hui, Féodosiya - Crimée), a conduit l'ingénieur Zibold, au début du XX^e siècle, à reconstituer un condensateur naturel appelé puits aérien. Il s'agit de capter la vapeur d'eau de l'atmosphère grâce à une construction de cailloux en exploitant la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur pour atteindre le point de rosée c'est-à-dire la condensation dans le puits aérien. Interrompus en 1917, les essais furent repris à Montpellier par L. Chaptal, dans les années 1920 et 1930, grâce à une petite pyramide tronquée. Le rendement maximal fut de 87,8 l entre avril et septembre 1930 et la production d'eau journalière maximale fut de 2,5 l. Enfin, une cloche en maçonnerie de 12 m de diamètre et 12 m de hauteur a été construite selon ces schémas à Trans-en-Provence, au début des années 1930, par Knapen. Si l'ensemble ne produisit pas d'eau, l'édifice élégant et aujourd'hui unique au monde a été préservé et restauré.

Remerciements :

Les remerciements iront à M. Jean-Pierre Porthelet, Maire de la commune de Trans-en-Provence (83720), pour avoir pris la décision de mettre en valeur le puits aérien. MM. Bernard Seguin (INRA-Montfavet) et Hubert Chamayou (INRA-Montpellier) ont facilité la recherche bibliographique.

Photo 5. Espace intérieur du puits aérien de Trans. A gauche, sont visibles les ouvertures carrées de 50 cm de côté des cavités de 2,50 m de long qui sont destinées à la sortie de l'air froid nocturne. A droite, se trouve la masse bétonnée interne avec les restes des bouts d'ardoises fichées dans celle-ci. (Cliché Alain Gioda, ORSTOM).

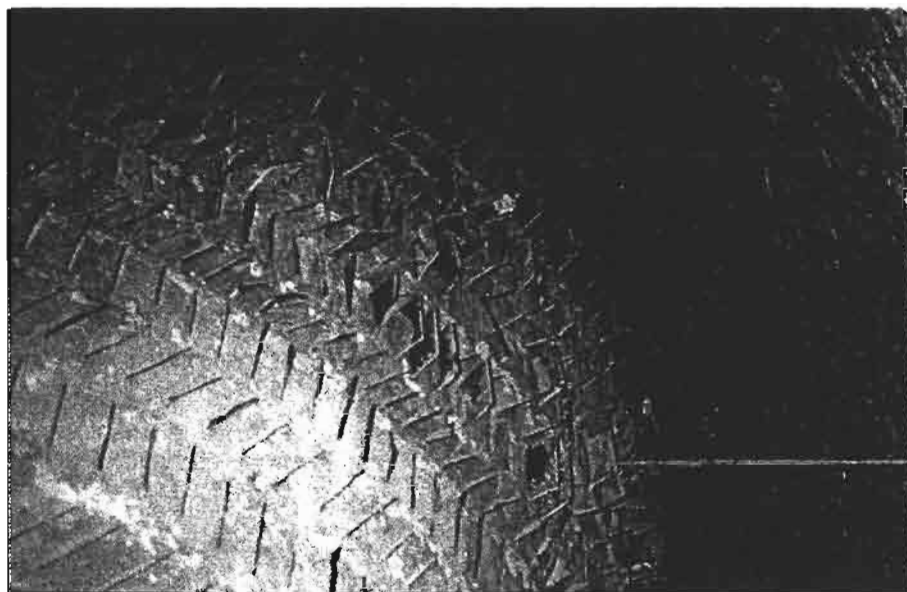


Photo 4. Vue de la voûte du puits aérien de Trans et de la masse bétonnée interne avec ses ardoises qui sont intactes en hauteur. (Cliché Alain Gioda, ORSTOM).

Summary

An antique supply channel network without any spring was discovered in the mountains above Feodosiya (formerly, Theodosia - Russian Crimea) almost at the beginning of the XXth century. The discovery of huge stone heaps at the network head led the engineer Zibold to think it was possible to rebuild a natural water condenser called atmospheric well. The aim is to catch the atmospheric vapor with the help of a building using temperature differences between the inside and the outside until the dew point is reached i.e. until the condensation begins. Works in Russia were stop-

ped by the Soviet Revolution but Chaptal, Head of the Montpellier Bioclimatological Centre in France, went on with this research using a small pyramid. The maximum water production was 87.8 litres over the period April-September 1930 and the maximum daily discharge was about 2.5 litres. Another big construction (12 m high and a diameter of 12 m) was built by Knapen in Trans (Provence) in early thirties. It never produced water but it is an elegant-looking structure and unique in the world today. Hence it has been preserved and restored.

Photo 6. Masse bétonnée interne du puits aérien de Trans. Les siphons aériens d'un diamètre de 20 mm sont visibles. Par contre, les ardoises ont été très abîmées lorsqu'elles étaient à hauteur d'homme. (Cliché Alain Gioda, ORSTOM).



9. Water recovery from dew - 1996 (*avec Vladimir Nikolayev, Daniel Beysens, Irena Milimouk, Eugeni Katiushin et Jean-Paul Morel*)

Associate Editors

G.B. Allison, Glen Osmond, S.A., Australia
J.C. Bathurst, Newcastle upon Tyne, UK
A. Becker, Berlin, Germany
R. Berndtsson, Lund, Sweden
B. Bobée, Quebec, Que., Canada
I.R. Calder, Wallingford, UK
R.T. Clarke, Porto Alegre, Brazil
C. Cunnane, Galway, Ireland
R.A. Feddes, Wageningen, Netherlands
M. Franchini, Bologna, Italy
E.O. Frind, Waterloo, Ont., Canada
J.H.C. Gash, Wallingford, UK
K.P. Georgakakos, San Diego, CA, USA
S. Gorelick, Stanford, CA, USA
S. Guo, Wuhan, People's Republic of China
R.J. Harding, Wallingford, UK
Tissa H. Illangasekare, Boulder, CO, USA
M.L. Kavvas, Davis, CA, USA
W.E. Kelly, Lincoln, NE, USA
L.S. Kuchment, Moscow, Russia

E. Kuusisto, Helsinki, Finland
D.R. Maidment, Austin, TX, USA
E. Mazor, Rehovot, Israel
A.I. McKerchar, Christchurch, New Zealand
A.F. Moench, Menlo Park, CA, USA
U. Moiseello, Pavia, Italy
C. Neal, Wallingford, UK
P.E. O'Connell, Newcastle upon Tyne, UK
J.P. O'Kane, Cork, Ireland
A.J. Peck, Subiaco, W.A., Australia
H.N. Phien, Bangkok, Thailand
H. Savenije, Delft, Netherlands
G.A. Schultz, Bochum, Germany
H.M. Seip, Oslo, Norway
W.J. Shuttleworth, Tucson, AZ, USA
M. Sivapalan, Nedlands, W.A., Australia
M. Sophocleous, Lawrence, KS, USA
D. Stephenson, Johannesburg, South Africa
Y. Tagutschi, Tsukuba, Japan
G. Teutsch, Tübingen, Germany
A. van der Beken, Brussels, Belgium

Publication schedule and subscription information

Journal of Hydrology (ISSN 0022-1694). For 1996 volumes 174–186 are scheduled for publication. Subscription prices are available upon request from the publishers. Subscriptions are accepted on a prepaid basis only and are entered on a calendar year basis. Issues are sent by surface mail except to the following countries where air delivery via SAL (Surface Air Lifted) mail is ensured: Argentina, Australia, Brazil, Canada, Hong Kong, India, Israel, Japan*, Malaysia, Mexico, New Zealand, Pakistan, China, Singapore, South Africa, Taiwan, Thailand, USA. For all other countries airmail rates are available upon request.

Claims for missing issues must be made within 6 months of our publication (mailing) date, otherwise such claims cannot be honoured free of charge.

Please address all requests regarding orders and subscription queries to: Elsevier Science B.V., Journal Department, P.O. Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands. Tel. 31.20.4853642, Fax 31.20.4853598.

Note to contributors

Contributions in the area of Physical Processes in Hydrology; Instrumentation; and Agrohydrology should be sent in triplicate to Dr. J.S.G. McCulloch, Burcot Tower, Burcot, Abingdon OX14 3DJ, UK. Tel: +44 (186540) 7770.

Contributions in all other areas should be sent in triplicate to Editorial Office *Journal of Hydrology*, P.O. Box 1930, 1000 BX Amsterdam, Netherlands. The indication of a fax and e-mail number on submission of the manuscript to the Editorial Office could assist in speeding communications. The fax number for the Amsterdam office is +31.20.4852696. Illustrations should also be submitted in triplicate. One set should be in a form ready for reproduction, the other two may be of lower quality. Submission of an article is understood to imply that the article is original and unpublished and is not being considered for publication elsewhere.

Upon acceptance of an article by the Journal, the author(s) will be asked to transfer the copyright of the article to the Publisher. This transfer will ensure the widest possible dissemination of information under the US Copyright Law. A detailed *Guide for authors* is available on request from the Publisher, Elsevier Editorial Services, Mayfield House, 256 Banbury Road, Oxford OX2 7DH, UK, and will also be printed each year (for 1996 Vol. 174, Nos. 1–2) You are kindly requested to consult this guide. Please pay special attention to the following notes.

Language

Manuscripts should be written in English. Authors whose native language is not English are recommended to seek the advice of a colleague who has English as his mother-tongue before submitting their manuscript. (see further inside back cover)

© 1996, ELSEVIER SCIENCE B.V. ALL RIGHTS RESERVED

0022-1694/96/\$15.00

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, Elsevier Science B.V., Copyright and Permissions Department, P.O. Box 521, 1000 AM Amsterdam, Netherlands. Upon acceptance of an article by the journal, the author(s) will be asked to transfer copyright of the article to the publisher. The transfer will ensure the widest possible dissemination of information.

Special regulations for readers in the USA — This journal has been registered with the Copyright Clearance Center, Inc. Consent is given for copying of articles for personal or internal use, or for the personal use of specific clients. This consent is given on the condition that the copier pays through the Center the per-copy fee stated in the code on the first part of each article for copying beyond that permitted by Sections 107 or 108 of the US Copyright Law. The appropriate fee should be forwarded with a copy of the first page of the article to the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA. If no code appears in an article, the author has not given broad consent to copy and permissions to copy must be obtained directly from the author. The fees indicated on the first page of an article in this issue will apply retroactively to all articles published in the journal, regardless of the year of publication. This consent does not extend to other kinds of copying, such as for general distribution, resale, advertising and promotion purposes, or for creating new collective works. Special written permission must be obtained from the publisher for such copying.

No responsibility is assumed by the Publisher for any injury and/or damage to persons or property as a matter of products liability, negligence or otherwise, or from any use or operation of any methods, products, instructions or ideas contained in the material herein.

Although all advertising material is expected to conform to ethical (medical) standards, inclusion in this publication does not constitute a guarantee or endorsement of the quality or value of such products or of the claims made of it by its manufacturer.



Water recovery from dew

V.S. Nikolayev^{a,1}, D. Beysens^{a,*}, A. Gioda^b, I. Milimouk^a,
E. Katiushin^c, J.-P. Morel^d

^a*Service de Physique de l'Etat Condensé du Commissariat à l'Energie Atomique,
Centre d'Etudes de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France*

^b*ORSTOM – BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France*

^c*Museum for Regional Study of Feodosia, 11, Lenin Avenue, 334800, Feodosia, Ukraine*

^d*Centre National de la Recherche Scientifique, URA 284, Université de Provence,
F-13621 Aix-en-Provence, France*

Received 28 October 1994; revision accepted 23 September 1995

Abstract

The recovery of clean water from dew has remained a longstanding challenge in many places all around the world. It is currently believed that the ancient Greeks succeeded in recovering atmospheric water vapour on a scale large enough to supply water to the city of Theodosia (presently Feodosia, Crimea, Ukraine). Several attempts were made in the early 20th century to build artificial dew-catching constructions which were subsequently abandoned because of their low yield. The idea of dew collection is revised in the light of recent investigations of the basic physical phenomena involved in the formation of dew. A model for calculating condensation rates on real dew condensers is proposed. Some suggestions for the 'ideal' condenser are formulated.

1. Introduction

Atmospheric humidity can in principle be an alternative source of potable water in the arid and semi-arid zones. Condensation of the atmospheric vapour into water occurs in nature near the ground surface in two different forms: fog and dew. Fog is a cloud of already condensed water droplets. A high relative humidity (in practice 100%) is necessary for the formation of fog. Water collection from fog is a resource in the arid zones where dense fog is frequent. Fog water collection by trees (Gioda

¹ Present address: Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, National Ukrainian Academy of Sciences, 252143 Kiev, Ukraine.

* Corresponding author at: DRFMC, CENG, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex, France



Fig. 1. Present state of a tumulus which was thought to be an Early Greek condenser. It is situated on the hills of Tepe-Oba near the old Jewish Cemetery

et al., 1992) or by synthetic nets is very useful in the low mountain regions close to the ocean. Nowadays, it represents a non-negligible resource especially in Chile and Peru (Schemenauer and Cereceda, 1991; Bouloc, 1993; Gioda et al., 1993a,b).

The formation of dew requires a cold surface, but 100% humidity is not necessary. Thus, dew is common even in the dryer zones of the world. In contrast, fog is rare except in very particular locations like mountainous and coastal areas. This is why the idea of the recovery of dew water by collecting the water condensing on walls of special devices is so attractive.

2. Historical sketch

The history of the devices mentioned began in Feodosia, city of the Crimean peninsula in Ukraine. There is an old myth in science that the Early Greeks who founded Theodosia (Greek name for the present Feodosia) about 6th century BC used dew condensers to fulfil their water needs (Hitier, 1925; Jumikis, 1965; Gioda and Acosta Baladón, 1991). This belief comes from the Russian forester F.I. Zibold who was in charge of some countryside around Feodosia. To prove his theory he built an experimental condenser following what he considered to be an Early Greek condenser (Zibold, 1905, 1907; Hitier, 1925). Because of the importance of this pioneer's research we have investigated carefully the original manuscripts and other related documents as well as the remains of Zibold's construction.

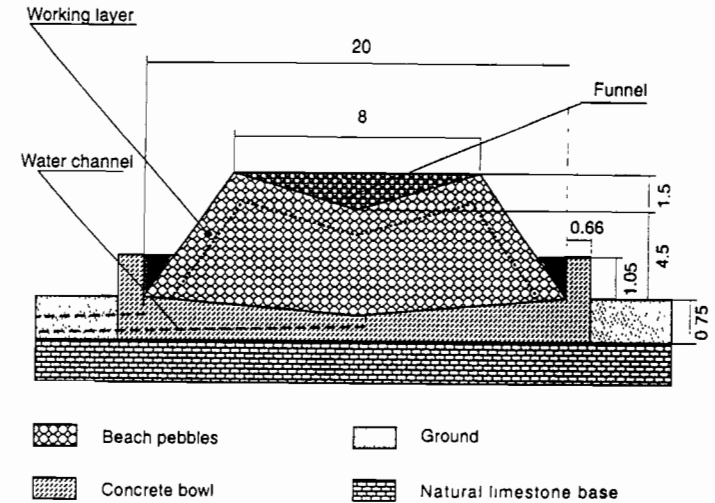


Fig. 2. Section of the condenser of F.I. Zibold (initial state). The slope of the bowl is enlarged for illustrative purposes. All the dimensions are given in m. We have shown the working layer of the condenser by the dotted line.

Zibold (1905) mentioned that “the climate in Feodosia is quite dry, the rains are rare and the droughts during several months are usual”. From the Feodosia weather station data, the average annual rainfall is 366 mm and the average number of days with fog during a year is 25. At the same time the conditions suitable for dew formation exist there as masses of humid air, which move from the sea in the evening, rise over the surrounding hills, the so-called Mount Tepe-Oba (c. 300 m a.s.l.) (Totchilov, 1938). While uprising, this humid air cools down and condensation can occur. Zibold mentioned a large quantity of dew but was unable to find any natural water sources in Feodosian forest. The existence of the ancient water supply which is functioning even now (Beysens, 1994; Beysens et al., 1996) whose source remains unknown (Anonymous, 1935) led him to query the purpose of the numerous mounds on Tepe-Oba (Fig. 1). Zibold (1907) excavated around some of them and reported the remains of the ancient pipes and water channels. Finally, he concluded that the mounds were condensers of dew made by Early Greeks. However, at least several of the piles are actually tumuli without any signs of hydraulic purpose including a water supply system (Anonymous, 1935).

Based on the results of the archaeological excavations (Katiushin, 1979), one of us (E.K.) suggested that the chain of mounds described by Zibold is a part of the necropolis of antic Theodosia. Since the 1850s more than 80 mounds in the surroundings of Feodosia have been excavated (Beysens, 1994; Beysens et al., 1996); they turned out to be the tombs either of ancient Greeks or Scythes and then dated to 4th–3rd century BC. These excavations revealed neither tubes nor water channels under the mounds.



Fig. 3 The present state of the remnants of the Zibold condenser

While the mounds belong to 4th–3rd century BC, most of the water supply tubes which were found on Tepe-Oba and in Feodosia were laid out during the Middle-Ages when Feodosia became a Genoa city called Caffa. Hence, it is unlikely that the mounds and these tubes could function in the same water supply system. Meanwhile, it is possible that Italian inhabitants from Genoa replaced the tubes of the Early Greeks.

To prove that dew can be a source of water, Zibold built a model condenser, a huge truncated cone of sea-beach pebbles with a funnel on the top. It was mounted on a concrete bowl (Fig. 2) with a channel to let condensed water out. The structure was ready by the beginning of 1912 and was said by one Jacob Mironovitch Nikitas, a meteorologist of Zibold's forestry to yield up to 300–360 l of water day⁻¹ (Zhukov, 1931; Anonymous, 1935). Unexpectedly, the condenser stopped functioning. A leakage of the bowl was suspected (Anonymous, 1915) and then the cone of pebbles was demolished. However, the bowl is still visible (Fig. 3). Topological measurements (Beysens, 1993) show that the slope between the perimeter and the centre of the bowl is now half that reported in the 1912 documents. Thus, settling of the condenser base has occurred. It is hard to say if the leakage was the principal reason of low yield. Unfortunately, no documents concerning the functioning of the condenser are available.

Zibold's attempt inspired the experiments performed in the South of France from 1928 to 1957 by French hydrologists L. Chaptal and M. Goddard and the Belgian engineer A. Knapen (Chaptal, 1932; Jumikis, 1965 and references therein). Their

installations, which they called "aerial wells", were very massive. The best of them yielded several litres of condensed water a day. After 1957, there was no reported attempts to recover water from vapour despite the attractiveness of this idea.

The main reason for the failures of these constructions may be found in the idea on which their creation was based. F.I. Zibold's ideas on the hydrological cycle were close to Aristotle's conception which was far from the conception of Perrault, Mariotte, and Halley (17th–18th century), i.e. the modern theory (L'Hôte, 1987). He believed that water forms continuously in the soil, as atmospheric air penetrates the pores and fissures in the ground; cooling condenses water which then accumulates and finally rises to the surface in the form of springs and rivers (Galbrecht, 1987). Hence, the tumuli which are located at the top of the hills may have been mistaken for springs.

3. Model for condensation in Zibold-type condensers

Since the 1950s the formation of dew has been investigated both by physicists and by hydrologists. The objects of the physical investigation are 'breath figures', i.e. the condensation of water on a surface, e.g. on a piece of glass (Beysens et al., 1991). Agrometeorologists are interested in dew formation in nature (Monteith, 1957; Pedro and Gillespie, 1982a, b); in particular, Lhomme and Jimenez (1992) were interested in dew on banana plantations because there is a close link between dew and cryptogamic development on the leaves. Environmental scientists study the dew as a source of acid pollution (Pierson et al., 1986; Janssen et al., 1991).

Dew formation on a surface requires cooling of the latter, generally by thermal irradiation during the night. Alternatively, cooling can occur due to the thermal contact with the ground if the ground is cooler. But at depth the temperature of the soil corresponds to the average daily temperature and remains constant. Thus, this ground level functions like a furnace which heats the ground surface during the night due to the thermal conductivity. An object which is thermally isolated from the ground lacks such a source of heating and thus its temperature can be lower. Hence, engineers of condensers should avoid good thermal contact with the ground. This statement is the first (though not the main) reason for the failure of the condensers in Southern France which had the concrete shells with massive foundations (Jumikis, 1965). Zibold's installation consisted of rather large (15–40 cm in diameter) pebbles of rounded form. The pebbles thus had weak physical and thermal contact with each other and with the bowl. Thus we can neglect this kind of thermal loss in our rough approximation. Moreover, due to the small thermal conductivity we can assume that temperature varies with time only on a small part of the condenser. Indeed, only two or three surface-layers of pebbles can perform the irradiation heat exchange with an environment. Also, the fresh humid air cannot penetrate deep into the pile of stones. Therefore we shall consider the working layer to be of the depth 0.3 m (see Fig. 2). This depth corresponds to three layers of 0.15 m diameter pebbles out of which the outer layers of Zibold's condenser were made. All this working part as well as the condensed water will be supposed to have a uniform temperature T_c . We assume also that the pebbles themselves take only

a half of the volume of this layer when estimating its mass. The heat balance equation for the condenser is

$$\frac{dT_c}{dt}(Mc_c + mc_w) = R_i + R_{he} + R_{cond}, \quad (1)$$

where the left-hand side represents the rate at which the amount of heat of the condenser changes, M and m are the masses of the working part of the condenser and condensed water respectively, c_c and c_w are the specific heats of the material of the condenser and water; t is time. Hereafter, SI units are supposed for all the values except temperature which is expressed in Celsius degrees. The variables in the right-hand side represent the different physical processes due to which the heat energy comes to or leaves the condenser surface: R_i (W) is the irradiation, R_{he} (W) is the heat exchange with the surrounding air, R_{cond} (W) is the energy gain due to the latent heat of the condensation (L per unit mass). Thus

$$R_{cond} = L \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

The heat exchange term can be expressed in the usual form as

$$R_{he} = S_c a (T_a - T_c). \quad (3)$$

where a is a heat transfer coefficient, T_a is the air temperature. S_c is the surface area which takes part in heat exchange with the air. Due to the porous structure of the condenser the fresh air penetrates into it and goes out constantly. That is why the value of S_c is larger than the external surface of the condenser S_i and depends on the wind speed u : the increase of u causes deeper penetration and thus a larger value of S_c . a relates to the width of the aerodynamical boundary air layer and thus depends on u too (see Beysens et al., 1991). The formula (Pedro and Gillespie, 1982a)

$$a = f \sqrt{u/D}, \quad (4)$$

in which the numerical factor $f = 4$ ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$) is empirical for the flow parallel to a plane sheet of size D . As a rough estimate $D \approx \sqrt{S_i/2}$.

The total irradiation term from Eq. (1) can be divided into several parts:

$$R_i = R_b + R_l + R_s - R_c. \quad (5)$$

R_b is the direct beam irradiation, R_l and R_s are the long-wave and short-wave parts of the diffuse incoming irradiation and R_c is the outgoing irradiation of the condenser which is so important. It can be represented by

$$R_c = S_i \epsilon_c \sigma (T_c + 273)^4, \quad (6)$$

where σ is the Stephan–Boltzmann constant and ϵ_c is the emissivity of the condenser. The long-wave and short-wave radiation terms are given by Pedro and Gillespie (1982a) (below, it is assumed that clouds are absent):

$$R_l = S_i \epsilon_s \epsilon_c \sigma (T_a + 273)^4, \quad (7)$$

$$R_s = S_i R_{sol} \frac{d}{2} (1 - A^q) \sin \alpha, \quad (8)$$

where ϵ_s is the emissivity of the sky, R_{sol} is the solar constant (1350 W m^{-2}), d is the short-wave absorptivity of the condenser, A is the atmospheric transmission constant, $q = 1/\sin \alpha$, where α is defined as the angle of elevation of the Sun over the horizon. The coefficient ϵ_s in (7) depends on the vapour pressure, but the dependence is very weak. For average conditions, $\epsilon_s \approx 0.82$.

It is supposed that night comes when α becomes equal to zero (though it is not exactly so; due to the atmospheric refraction, night comes when $\alpha = -36'36''$). α can be estimated by the classical expression (Campbell, 1977)

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos[\pi(t - 12)/12], \quad (9)$$

where t is the time of day in h, ϕ is the latitude of the place (for Feodosia $\phi = 45^\circ 01' 45''$) and δ is a solar declination.

The estimation of the direct beam irradiation is a slightly more difficult problem. It can be represented by the expression

$$R_b = S_p R_{sol} d A^q, \quad (10)$$

where S_p is a surface of a geometrical projection of the condenser on the plane perpendicular to the direction of the beams. Since this direction is defined by α , S_p is a function of α . For example for the horizontal plane

$$S_p = S \sin \alpha, \quad (11)$$

for the vertical plane

$$S_p = S \cos \alpha, \quad (12)$$

where S is the surface of the plane. For the plane which has an angle

$$\alpha_{max} = \pi/2 - \phi + \delta \quad (13)$$

with the horizon $S_p = 0$, since such a plane will be parallel to the solar beams all day long. In all the cases, the planes are supposed to be parallel to the direction East–West. For the truncated cone (see Appendix)

$$S_p = (R^2 - r^2) \sin \alpha [(\tan^2 \beta \cot^2 \alpha - 1)^{1/2} - \arccos(\tan \alpha \cot \beta)] + \pi R^2 \sin \alpha, \quad \text{if } 0 < \alpha < \beta$$

$$S_p = \pi R^2 \sin \alpha, \quad \text{if } \beta < \alpha < \pi/2 \quad (14)$$

where R and r are the radii of the base and the top of the cone, $\tan \beta = h/(R - r)$ and h is the height of the cone.

The equation for m represents the condensation rate:

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} S_c b (p_v - p_c(T_c)), & \text{if } p_v > p_c(T_c) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

Here p_v is the partial pressure of the water vapour in the atmosphere which is considered constant during the night. $p_c(T_c)$ is the vapour pressure over the condenser at which condensation on its surface begins. b is proportional to a in Eq. (4):

$$b = 0.656a/(pc_a), \quad (16)$$

where p is the atmospheric pressure and c_a is the specific heat of air. This expression

Table 1

Values of physical parameters which are used for the calculations

Parameter	Notation	Value
Sky emissivity	ϵ_s	0.8
Emissivity of condenser	ϵ_c	0.9
Short-wave absorptivity of the condenser	d	0.5 ^a
Atmospheric transmission constant	A	0.84
Specific heat of water	c_w	$4.18 \cdot 10^3$ (J kg ⁻¹ K)
Specific heat of stones	c_c	$1.09 \cdot 10^3$ (J kg ⁻¹ K)
Specific heat of air	c_a	$1.01 \cdot 10^3$ (J kg ⁻¹ K)
Density of stones	–	$2.5 \cdot 10^3$ (kg m ⁻³)
Latent heat of condensation	L	$2.26 \cdot 10^6$ (J kg ⁻¹)

^a For white beach pebbles.

as well as the numerical factor comes from the calculations of the vapour transfer coefficient (Pedro and Gillespie, 1982a).

Generally speaking, $p_c(T)$ does not coincide with the saturation pressure of the water vapour $p_s(T)$ and depends on the degree of wetting of the surface by the water which can be characterized by the contact angle (Zhao and Beysens, 1995). For the surface which is incompletely wetted by water (such as for ordinary surfaces which are inevitably coated by some oil or grease) (Beysens et al., 1991), $p_c(T) \leq p_s(T)$. We consider for the sake of simplicity the case

$$p_c(T) = p_s(T), \quad (17)$$

although in reality $p_c(T) < p_s(T)$.

Evaporation is neglected (cf. the second option in Eq. (15)) and it is assumed that all condensed water flows immediately into a container inside the condenser. The water is removed from the container as soon as condensation stops.

The day of 8 April 1992 has been chosen for the calculation as it is typical of the spring and fall seasons during which the condensation is the largest (Totchilov, 1938). For this day $\delta \approx 7^\circ$ (Campbell, 1977); the maximum and minimum air temperatures for that sunny day were 15.2°C and 9.5°C, respectively, the atmospheric pressure was 750 mm Hg and the maximal relative humidity for the Tepe-Oba mountain at night was 97%. This corresponds to the dew point temperature $T_d = 9^\circ\text{C}$. We suggest also that the variation of T_a is assumed sinusoidal with the period of 24 h and the maximum at 13 h 30 min. This delay with respect to the maximum of sun irradiation (12 h) is usual. The other physical constants for the simulation are given in Table 1.

4. Numerical simulation of Zibold's condenser

Now that all the parameters of the set of Eqs. (1)–(15) have been defined, the set

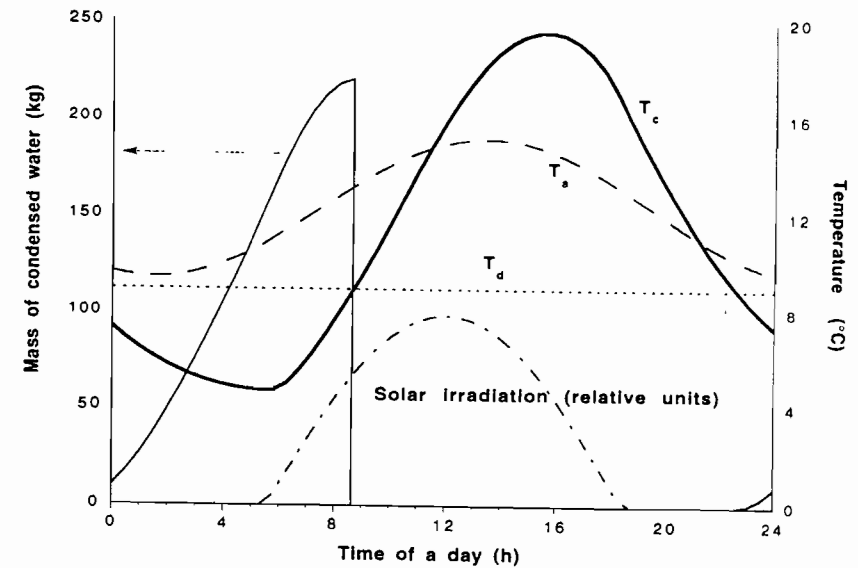


Fig. 4. Day evolution of the temperatures of the Zibold condenser (T_c) and the surrounding air (T_a) as well as the mass of condensed water inside the condenser. The evolution of the solar irradiation intensity and dew point temperature (T_d) is shown also. $u = 10 \text{ m s}^{-1}$.

can be solved numerically. The conditions

$$T_c(0 \text{ h}) = T_c(24 \text{ h}),$$

$$m(0 \text{ h}) = m(24 \text{ h})$$

have to be specified to provide a periodical (with the period of 24 h) change of all the physical values.

The simulation shows that during the day of 09/04/1992 Zibold's condenser would yield 221 l of water. This result is in good agreement with the reported data — 300–360 l. The evolution of all the important parameters is shown in Fig. 4. Condensation stops at about 09:00. The dash-dotted line represents the intensity of the direct beam irradiation of the horizontal plane during the day. The condensation starts 4 h after the sunset when T_c approaches T_d . Unfortunately there are no other available data concerning the functioning of the condenser and so a more detailed comparison is impossible.

The ratio S_c/S , has been assumed to be equal to 2 due to the penetration of the fresh air into the condenser for a rather strong wind ($u = 10 \text{ m s}^{-1}$). When the wind is weaker, the fresh humid air penetrates to a smaller depth into the pebble pile and this ratio is smaller. The results for different velocities are presented in Table 2. For the case of Zibold's condenser the water yield is an increasing function of the wind velocity.

Table 2
Water yield of Zibold's condenser depending on the wind speed

Wind speed (m s ⁻¹)	S _c /S _i	Water yield (l)
10	2	221
5	1.5	155
1	1.1	61

5. Simulation of Zibold-type condensers

One can distinguish two limiting types of condensers. The first are massive, with S_c > S_i, 'Zibold-type condensers'. For these it is assumed that S_c/S_i = 2 in the following. The representative of the second type is a 'grass-like' condenser which is simply a sheet of some light material with both sides working as a condenser. Hence, for these S_c = S_i. The water yield of the first type depends strongly on direct solar irradiation which is determined by the value S_p < S_i, Eq. (10). S_p, in turn, depends on the shape of the condenser. To generalize the model the shape factor has been excluded from the consideration by defining an effective surface of irradiation S_{eff}, S_p < S_{eff} < S_i. S_{eff} is the area of a horizontal plane whose total irradiation balance during the day is very close to that of the real condenser. Hence S_{eff} should be

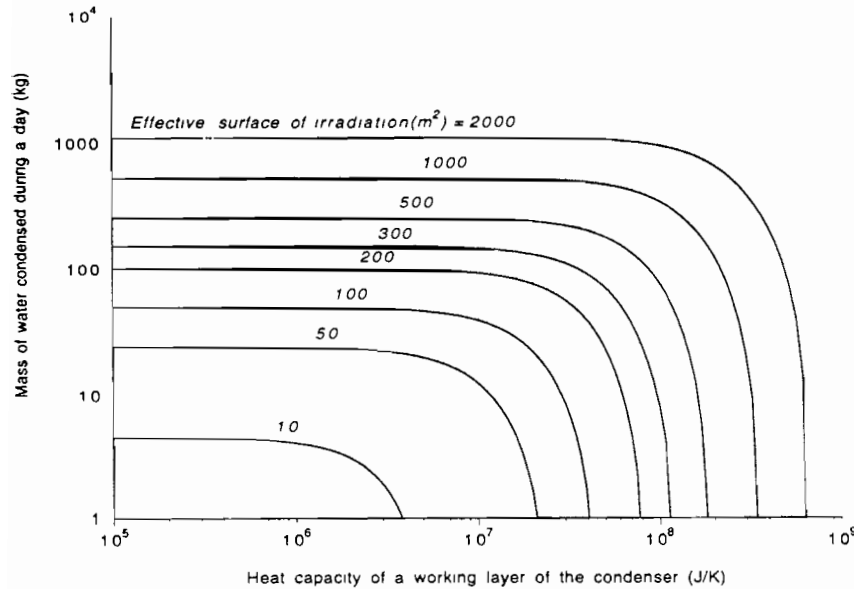


Fig. 5. Mass of water condensed during the day versus heat capacity of the working layer of the Zibold-type condenser u = 10 m s⁻¹

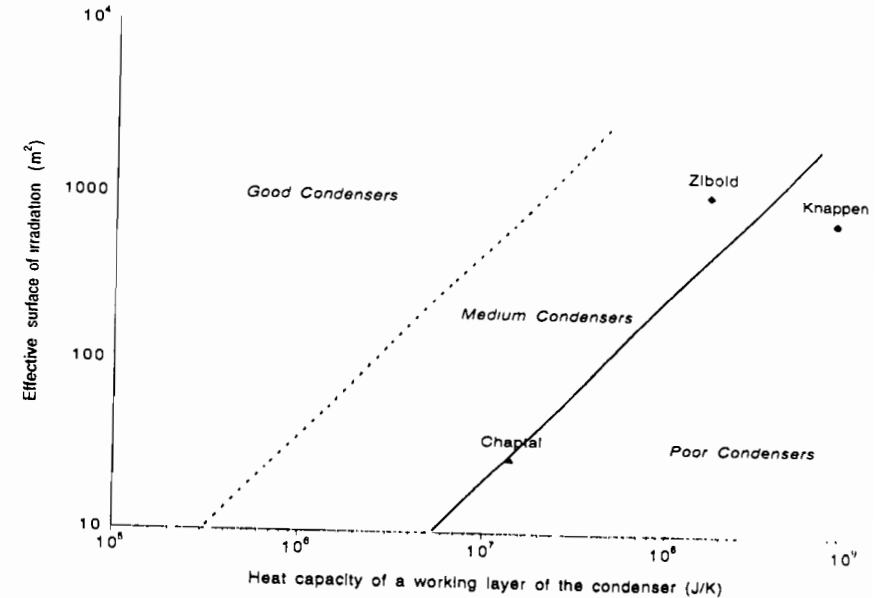


Fig. 6. Diagram of the Zibold-type condensers. For explanations see the text

substituted for S_i in Eqs. (6)–(8). Then in (10) we mean under S_p the value from (11) where we should substitute S_{eff} for S also.

For the sake of comparison the same meteorological data and the same values of material constants (Table 1) will be applied as for the case of Zibold's condenser.

The dependence of water yield on the heat capacity M_c of the working layer is shown in Fig. 5. The condenser will work (m > 0) if M_c is less than some limiting value which depends on S_{eff} (this dependence is presented in Fig. 6 as a solid line); the large thermal inertia of the massive working layer may not permit cooling below the dew point temperature during the night (see Fig. 4). The water yield grows very quickly as M_c decreases and soon reaches saturation. The dependence of this value of M_c where saturation is reached (the point where m is less by 5% than the saturation value) on S_{eff} is depicted in Fig. 6 as a dashed line. The lower the working mass of the condenser, the higher the water yield.

Saturation takes place due to the interplay of two effects: thermal inertia and irradiation. When M_c is small the temperature evolution will not depend on its value. Then the kinetics is defined by other terms in Eq. (1), mostly by the irradiation term. In this case the heat capacity of the condenser can be neglected as occurred in the studies of dew on leaves (Pedro and Gillespie, 1982a, b; Lhomme and Jimenez, 1992).

Two lines in Fig. 6 divide the S_{eff}–M_c plane into three regions of good, medium and poor condensers. This diagram is not universal; its exact shape will depend slightly on the meteorological conditions and the constants of the materials of real

Table 3
Estimated physical parameters of the different devices

Inventor	$M, 10^3 \text{ kg}$	$S_1, \text{ m}^2$	$S_{\text{eff}}, \text{ m}^2$
Zibold	152	854	1075
Chaptal	12.8	22	27.7
Knappen	759	601	757

structures. Nevertheless, it suffices to compare the quality of the condensers since the parameters S_{eff} and Mc_c are the most important. We compare here the quality of Zibold's condenser to the quality of two experimental devices, detailed data on which are available from the literature — Chaptal's first captor in Montpellier and Knappen's aerial well in Trans-en-Provence. The estimated parameters of them are summarized in Table 3.

The corresponding points are depicted in Fig. 6. The positions of the points are in good agreement with the experimental results of the inventors. In fact, both devices were not good condensers giving only several litres of water on the best days. But Chaptal's structure was the more efficient taking into account its smaller size.

It appears that the main fault of the condensers was their large mass.

6. Simulation of 'grass-like' condensers

The leaves of plants represent nearly ideal dew condensers although their surface is hydrophobic. A good wetting by water is essential to facilitate the condensation with the lower partial vapour pressure p_v (Zhao and Beysens, 1995). In addition, the separate drops do not flow quickly from the surface of the leaves so that evaporation of those drops may occur when the sun shines in the morning. A sheet of some polymer material is more suitable for these studies. For a polyethylene sheet with a thickness 0.5 mm, density $0.95 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ and specific heat $c_c = 1.9 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}$, the water yield m versus the surface area S of one side of the sheet is presented in Fig. 7. The inertial term in Eq. (1) is small for this case and the temperature follows mainly the change in irradiation.

Three angles of the sheets with the horizon were simulated: α_{max} defined by (13), 0° and 90° . In all the cases the sheets are supposed to be parallel to the direction East–West. Due to the small thermal inertia, the difference in yield of water depends only slightly on the angle. But the difference is drastic in the maximal temperature of the sheets: for the horizontal or vertical sheets it is about 60°C , for the inclined one is about 15°C . The dependence on the wind speed u for this case seems to be unusual — the water yield decreases with the increase of u . This is because an increase in air velocity has two consequences: it increases the condensation rate (b , Eq. (16)) and it increases the heat exchange with outer air (a , Eq. (4)). Because during most of the day $T_c < T_a$ (see Eq. (3)), the second effect leads to a heating of the sheet while

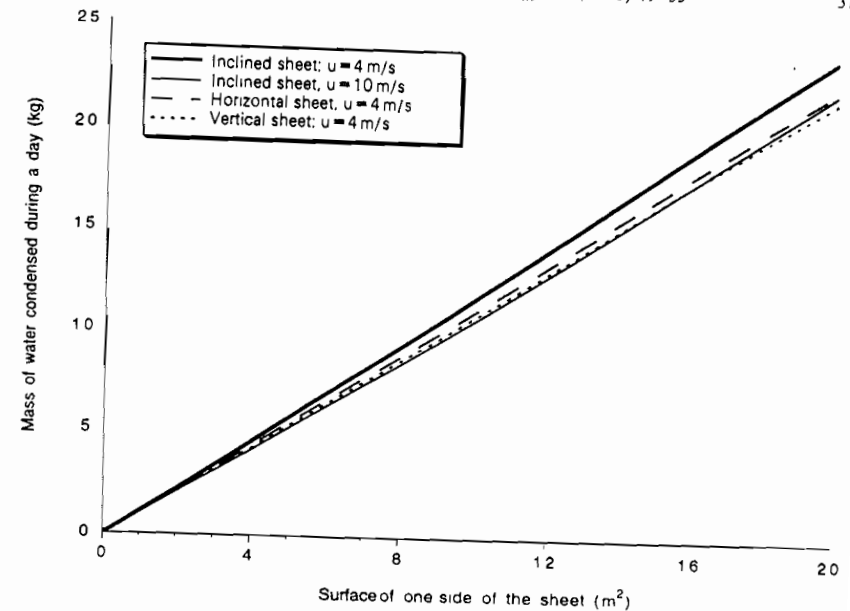


Fig. 7. Mass of water condensed during the day versus surface of one side of the polyethylene sheet with the thickness 0.5 mm.

the first leads to a cooling. For a thin sheet (in contrast to the Zibold-type condenser) the heating appears to be stronger with an increase in u .

The small curvature of $m(S)$ lines in Fig. 7 is due to the velocity dependence of the heat transfer coefficient.

7. Conclusions

This paper investigated the history and functioning of dew condensers. It is difficult to strictly refute Zibold's hypothesis concerning the Early Greek condensers. This would need extensive excavation work. The Tepe-Oba mountain is fissured by the remains of a sophisticated system of ancient water supply and tubes can be found within hundreds of metres of every mound. But excavations of more than 80 mounds did not reveal any signs of a hydraulic system. On the contrary, tombs were found in each of them. Where water still comes out of the broken water supply, it contains dissolved minerals and thus does not come out of condensers, because condensed water is almost distilled. Moreover, the dry remains of the ancient water tubes are covered (inside) by a thick layer of mineral deposits. Hence, it is thought that there were no ancient dew condensers in the surroundings of Feodosia. We describe the main physical principles of the functioning of dew condensers and suggest a model to simulate them. It turns out that Zibold's condenser might

It has been the most successful experimental device among those that ever existed; its yield was of the order of 100–200 l of water day⁻¹.

We suggest a simple diagram (Fig. 6), which can be used to estimate the quality of the massive ('Zibold-type') condenser and compare it with the other constructions. The huge mass of the devices was their main fault. It caused the large thermal inertia which did not allow them to cool during the night and thus the conditions for the dew formation were poor. The creators of the massive condensers were not aware that the cooling is, in fact, due to irradiation, and they tried to increase the condensation surface, not the irradiation surface. It is their second fault. Their third fault was a too high thermal contact with the ground. The temperature of a good condenser is lower than ground temperature during most of the day. Thus, the ground heats the condenser. The decrease of its quality is a consequence.

Hence the 'ideal' condenser should be 'grass-like', i.e. a light sheet thermally isolated from the massive parts and the ground. It is very important that its surfaces should be open to let them irradiate the energy into space. It means that something that can reflect the infrared irradiation of the condenser should be placed near its surface and vice-versa, the condenser itself should be placed far enough from such surfaces, e.g. the ground to avoid the 'greenhouse' effect. In practice, a sheet of polyethylene (polymer) film would be suitable. The material of the sheet should be well chemically completely wetted by the water to decrease the nucleation barrier. The place of the condenser should be chosen on an open area but where the winds are not strong and dew is frequent (i.e. where humidity is high enough).

A sheet of polyethylene, assuming that there is no evaporation and that all the condensed water flows into a vessel, should yield approximately 1 l m⁻² under the meteorological conditions defined above.

Hence, practical utilization of dew water contained in the air seems possible. Using the present study, engineers of future dew condensers will be able to obtain a volume of very clean water.

Acknowledgements

The authors thank Mr Dmitri Novitski, Mayor of Feodosia in Crimea, and Mr Jean-Pierre Portholet, Mayor of Trans-en-Provence in France, for their warm welcome. Valuable scientific information was obtained from Dr Alexander Zibold (F.I. Zibold's grandson), his wife Katerina (Donetsk) and Prof. V.N. Dublyansky (Simferopol State University). Mrs A. Wasowicz (Warsaw, Poland) provided previous help because of her Early Greek archaeological knowledge of the Crimea. The French Embassy in Kiev is thanked for funding expeditions to Feodosia (in 1993 and 1994). The contribution of the European Center for Advanced Studies in Thermodynamics to the 1994 mission is also acknowledged. J.-P. Lhomme is thanked for the critical reading of this article. One of the authors (V.N.) would like to thank the collaborators of SPEC Saclay for their kind hospitality.

Appendix

To obtain Eq. (14), i.e. to find S_p for the truncated cone, first find it for a full cone with base radius R and height H such that

$$H/R = h/(R - r) = \tan \beta. \quad (A1)$$

Then the truncated cone is a part of the full cone. Assume that $\alpha \leq \pi/2$ — if not, one should substitute $\pi - \alpha$ for α in the final expression.

To calculate S_p for the cone, substitute for the cone the regular pyramid with the same top and with all the base vertices lying on the circle — the base of the cone. Obviously, all the characteristics of the pyramid will tend to those of a cone as the number of vertices tends to infinity. Choose the reference point O of the Cartesian coordinates at the centre of the base, the axis OZ as the vertical one and axis OX so that the Sun will be in the XOZ plane. Then the plane defined by the equation

$$z + x \cot \alpha = 0 \quad (A2)$$

is perpendicular to the direction of solar beams — it is the projection plane. The sides of the pyramid differ by the polar angle γ (in the plane XOY with respect to the point O and axis OX) of one of the bottom summits. The other one has the angle $\gamma + d\gamma$ where $d\gamma$ tends to zero as the number of summits tends to infinity. Then the equation of the geometrical plane, which contains the side as its part, is

$$x \cos \left(\gamma + \frac{d\gamma}{2} \right) + y \sin \left(\gamma + \frac{d\gamma}{2} \right) + (z - H) \frac{R}{H} \cos \left(\frac{d\gamma}{2} \right) = 0. \quad (A3)$$

The surface of this side is $dS = \sqrt{H^2 + R^2} R d\gamma / 2$. Now S_p is defined as a sum which is transformed into the integral when $d\gamma \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned} S_p &= \int \cos \xi dS \\ &= \sqrt{H^2 + R^2} \frac{R}{2} \int \cos \xi d\gamma. \end{aligned} \quad (A4)$$

ξ is an angle between two inscribed planes, which can be found out of Eqs (A2) and (A3) by the straightforward application of the known formula of analytical geometry and is given by

$$\cos \xi = \sin \beta \cos \alpha \cos \gamma + \cos \beta \sin \alpha. \quad (A5)$$

It follows from Eq. (A5) that when $\alpha > \beta$, i.e. when all the surface of the cone is exposed to the solar irradiation, ξ is always less than $\pi/2$. Thus the integration in (A4) should be performed from 0 to 2π yielding

$$S_p = \pi R^2 \sin \alpha. \quad (A6)$$

When $\alpha < \beta$, the sides which have $\xi > \pi/2$ are not exposed to the solar irradiation. Taking into account that $\xi < \pi/2$ if $\gamma_1 < \gamma < 2\pi - \gamma_1$, where $\gamma_1 = \arccos(-\tan \alpha \cot \beta)$,

it follows from Eq. (A5), S_p should be computed as a sum of two integrals (A4): the first from 0 to γ_1 and the second from $2\pi - \gamma_1$ to 2π . Hence,

$$S_p = R^2 \sin \alpha [(\tan^2 \beta \cot^2 \alpha - 1)^{1/2} + \pi - \arccos(\tan \alpha \cot \beta)] \quad (\text{A7})$$

valid when $\alpha < \beta$ for the full cone.

Now the cone can be truncated 'cutting' its topmost part. Evidently, Eq. (A6) is valid for this case when $\alpha > \beta$, since the square of the projection will not depend on finer details (this is also the reason why S_p does not depend on the presence of the funnel). To obtain the first part of Eq. (14) (for $\alpha < \beta$), the value of S_p for the cone with the base radius r and the same angle β (topmost part) has to be subtracted and the square of the projection of the upper base $\pi r^2 \sin \alpha$ added.

References

- Anonymous, 1915. Proceedings of the inspection of the condenser, which was built in the Feodosian forest. 19 06 1915 (in Russian, manuscript kept in the Feodosian Museum). French Translation: Rapport CEA-Saclay, 1995, DIST, No. 95002495
- Anonymous, 1935. Stenograph of the proceedings of the 1st Conf. on the condensation of the atmospheric water vapour (Aerial well). Moscow, Leningrad (in Russian, manuscript kept in the Feodosian Museum). French Translation: Rapport CEA-Saclay, 1995, DIST, No. 95002495.
- Beysens, D., 1993. Rapport de la mission franco-ukrainienne effectuée à Féodosia (Crimée, Ukraine) en Septembre–Octobre 1993 (unpublished).
- Beysens, D., 1994. Rapport de la mission franco-ukrainienne effectuée à Féodosia (Crimée, Ukraine) en Août 1994 (unpublished).
- Beysens, D., Steyer, A., Guenoun, P., Fritter, D. and Knobler, C.M., 1991. How does dew form? *Phase Transitions*, 31: 219–246.
- Beysens, D., Gioda, A., Katioushine, E., Milimouk, I., Morel, J.-P. and Nikolayev, V., 1996. Les puits aériens. *La Recherche*, in press.
- Belloc, J., 1993. De la toile d'araignée ... au piège à brouillard. *La Houille Blanche*, 5: 337–344.
- de Groot, G.S., 1977. *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer Verlag, New York.
- de Saussure, L., 1932. La captation de la vapeur d'eau atmosphérique. *La Nature*, 60(2893): 449–454.
- de Saussure, G., 1987. Hydraulic engineering, hydrology and hydraulics in Antiquity. *ICID Bull.*, 36: 1–10
- de Saussure, A. and Acosta Baladón, A.N., 1991. Les puits aériens de Théodosia, de Montpellier et de Trans. *Revue de Géographie*, 2: 215–219.
- de Saussure, A., Acosta Baladón, A., Fontanel, P., Hernández Martin, Z. and Santos, A., 1992. L'arbre fontaine. *La Recherche*, 23: 1400–1408
- de Saussure, A., Beysens, D. and Acosta Baladón, A., 1993a. Dew and atmospheric wells in mediterranean climates. In: A. Becker, B. Sevruck and M. Lapin (Editors), *Proc. Symp. on Precipitation and Evaporation*, 20–24 September 1993, Bratislava, Slovakia, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 3: 279–284.
- de Saussure, A., Espejo Guasp, R. and Acosta Baladón, A., 1993b. Fog collectors in the tropics. In: A. Becker, B. Sevruck and M. Lapin (Editors), *Proc. Symp. on Precipitation and Evaporation*, 20–24 September 1993, Bratislava, Slovakia, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 3: 273–278.
- de Saussure, H., 1925. Condensateurs des Vapeurs Atmosphériques dans l'Antiquité. *Comptes-Rendus Académie d'Agriculture*, Paris, pp. 679–683.
- de Saussure, L.H.J.M., Römer, F.G. and Kema, N.V., 1991. The frequency and duration of dew occurrence over a year. Model results compared with measurements. *Tellus*, 43B: 408–419.
- de Saussure, A.R., 1965. Aerial wells: secondary sources of water. *Soil Sci.* 100: 83–95.
- de Saussure, E.A., 1979. Excavations in the Surroundings of Feodosia. *Arheologicheskie otkrytija 1978* (in Russian), Nauka, Moscow, pp. 334–339 (in Russian).

- L'Hôte, Y., 1987. Rappel de l'histoire du concept du cycle de l'eau dans la culture occidentale. *IAHS Publ.*, 164: 37–45.
- Lhomme, J.-P. and Jimenez, O.F., 1992. Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standard meteorological observations. *Agric. For. Meteorol.*, 62: 263–274.
- Monteith, J.L., 1957. Dew. *Q. J. Royal Meteorol. Soc.*, 83: 322–341.
- Pedro, M.J. and Gillespie, T.J., 1982a. Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agric. Meteorol.*, 25: 283–296.
- Pedro, M.J. and Gillespie, T.J., 1982b. Estimating dew duration. II Utilizing standard weather station data. *Agric. Meteorol.*, 25: 297–310.
- Pierson, W.R., Brachaczek, W.W., Gorse, R.A., Japar, S.M. and Norbeck, J.M., 1986. On the acidity of dew. *J. Geophys. Res.*, 91: 4083–4096.
- Schemenauer, R.S. and Cereceda, P., 1991. Fog-water collection in arid coastal locations. *Ambio*, 20: 303–308.
- Totchilov, V.I., 1938. Condensers of Feodosia and the conditions of condensation in the surroundings. *Soviet Water Works Sanitary Eng.*, 1: 61–67 (in Russian) French Translation. Rapport CEA-Saclay, 1995, DIST, No. 95002495.
- Zhao, H. and Beysens, D., 1995. From droplet growth to film growth on a heterogeneous surface: condensation associated with a wettability gradient. *Langmuir*, 11: 627–634.
- Zhukov, N.N., 1931. About the ancient hydrotechnical constructions in the surrounds of Feodosia. In: *Feodosian Section of the Society of Crimea Study and the Museum of Archeology (Editors), Collection of the articles on economy, mode of life and history of Feodosian region*, No. 1, Feodosia (in Russian). French Translation: Rapport CEA-Saclay, 1995, DIST, No. 95002495
- Zibold, F.I., 1905. The role of underground dew in water supply of Feodosia. *Trudy opytnykh lesnitchestv*, No. III (in Russian, manuscript kept in the Feodosian Museum). French Translation: Rapport CEA-Saclay, 1995, DIST, No. 95002495.
- Zibold, F.I., 1907. The experiment of the ancient-Theodosian way of potable water extraction. Lecture given in Feodosia (in Russian, manuscript kept in the Feodosian Museum). French Translation: Rapport CEA-Saclay, 1995, DIST, No. 95002495.

10. Tropical Montane Cloud Forests : Conservation Status and Management Issues (*avec Charles Doumenge, Don Guilmour, Manuel Ruíz Pérez et Jill Bockhus*)

Ecological Studies

Volumes published since 1989 are listed at the back of this book.

Lawrence S. Hamilton
James O. Juvik
F. N. Scatena
Editors

Tropical Montane Cloud Forests

With 102 illustrations



Springer-Verlag

New York Berlin Heidelberg London Paris
Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest

Lawrence Hamilton
Islands and Highlands
Environmental Consultancy
RR #1, Box 1685A
Hinesburg, VT 05461
USA

F. N. Scatena
International Institute of
Tropical Forestry
USDA Forest Service
Rio Piedras, PR 00928
USA

James O. Juvik
Department of Geography
University of Hawaii, Hilo
Hilo, HI 96720
USA



EAST-WEST CENTER
PROGRAM ON ENVIRONMENT



International Hydrological Programme



International Institute of Tropical Forestry

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data
Tropical montane cloud forests / Lawrence S. Hamilton, James O. Juvik,
and F. N. Scatena, editors.

p. cm. — (Ecological studies ; v. 110)
Includes bibliographical references and index.
ISBN 0-387-94323-4 (New York). — ISBN 3-540-94323-4 (Berlin)
1. Cloud forest ecology. 2. Cloud forests. 3. Mountain ecology—
Tropics. I. Hamilton, Lawrence S. II. Juvik, James O.
III. Scatena, F. N. IV. Series.
QH541.5.C63T76 1994
574.5'2642—dc20

94-12683

Printed on acid-free paper.

An earlier version of this book was published by the East-West Center

©1995 Springer-Verlag New York, Inc.

All rights reserved. This work may not be translated or copied in whole or in part without the written permission of the publisher (Springer-Verlag New York, Inc., 175 Fifth Avenue, New York, NY 10010, USA), except for brief excerpts in connection with reviews or scholarly analysis. Use in connection with any form of information storage and retrieval, electronic adaptation, computer software, or by similar or dissimilar methodology now known or hereafter developed is forbidden. The use of general descriptive names, trade names, trademarks, etc., in this publication, even if the former are not especially identified, is not to be taken as a sign that such names, as understood by the Trade Marks and Merchandise Marks Act, may accordingly be used freely by anyone. Permission to photocopy for internal or personal use, or the internal or personal use of specific clients, is granted by Springer-Verlag, Inc., for libraries registered with the Copyright Clearance Center (CCC), provided that the base fee of \$5.00 per copy, plus \$0.20 per page, is paid directly to Springer-Verlag New York, 175 Fifth Avenue, New York, NY 10010, USA.
ISBN 0-387-94323-4 1995 \$5 00 + 0 20

Production managed by Laura Carlson; manufacturing supervised by Jacqui Ashri.
Composition by KP Company, Brooklyn, NY.
Printed and bound by Braun-Brumfield, Ann Arbor, MI
Printed in the United States of America

9 8 7 6 5 4 3 2 1

ISBN 0-387-94323-4 Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg
ISBN 3-540-94323-4 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

In Memory of Alwyn Gentry

The editors dedicate these proceedings to Dr. Alwyn Gentry, a participant in the symposium and a stalwart champion for tropical cloud forest conservation. His untimely death in an aircraft crash in Ecuador occurred as this publication was being edited.

2. Tropical Montane Cloud Forests: Conservation Status and Management Issues

Charles Doumenge, Don Gilmour,
Manuel Ruíz Pérez, and Jill Blockhus

With the collaboration of the World Conservation Monitoring Centre,
Cambridge, UK, and Alain Gioda, ORSTOM, Montpellier, France

In the humid tropics, montane cloud forests are found between 500 and 3,500 m altitude (LaBastille and Pool 1978; Unesco 1981; Sosa 1987; Stadtmüller 1987; Fao 1992) with major occurrence between 1,200 and 2,500 m (Stadtmüller 1987). They may occur within the montane and submontane floristic zones.

Within the humid tropical zone, one can observe some vegetation gradients with increasing altitude: diminishing tree height, simplified stratification, smaller leaf size, more open understory, some floristic changes, and more epiphytes, mosses, and lichens (Whitmore 1975; Unesco 1981; White 1983; Jacobs 1988). Tropical montane forests are usually of low stature (White 1983; Letouzey 1985; Sayer, Harcourt, and Collins 1992) whereas submontane forests have greater height (20–30 m vs. 15–25 m), are richer in species, with more vascular epiphytes, and incorporate species from low and mid-altitude forests (Letouzey 1985; Thomas and Achoundong 1991).

In this paper, we will refer to tropical montane cloud forests (TMCF) in a topographic sense, as cloud forests lying on wetter mountainsides, ridges and saddles, whether in montane or submontane floristic zones. They can be defined as tropical montane or submontane forests characterized by persistent clouds or fogs, sometimes with small trees, often with abundant mosses, ferns, lichens, or flowering plants in trees and on soil surface.

Global Distribution

In Table 1 and Figures 1–3, we have summarized available information on the geographical distribution and overlap extent of montane and submontane forests. According to recent FAO estimates (Table 1), montane and submontane forests comprise more than 11 percent of the total tropical forests. According to Persson's (1974) estimates, cloud forests occur in a portion of this area and cover about 50 million ha, or one-fourth of the montane and submontane forests. These estimates should be considered as border figures because of a lack of precise data on the extent and distribution of TMCF within these broader montane and submontane forest categories. Cloud forests occur on humid mountain slopes where topo-climate conditions are favorable to the occurrence of ground-level clouds during a considerable period of the year. They occur more frequently in tropical America and Southeast Asia than in tropical Africa (Stadtmüller 1987). The reason for the difference is that there is a wider distribution of mountain ranges, subject to oceanic influences, in America and Asia than in Africa.

Apart from this general distribution, TMCF does appear as micro-occurrences, in locations where there is a cooler climate and a stronger influence of mists and clouds than might normally be expected. In Africa, some of these cloud forest micro-occurrences include isolated low elevation mountains exposed to wind and clouds such as the Belinga mountains of Gabon (800–900 m) and other topographical situations where low elevation passes or peaks are exposed to oceanic influences (e.g., in Congo, the Mayombe mountains, 500–700 m, [Cusset 1989; Dowsett-Lemaire 1991]); the Angola Highlands, where there is an extension of dense forests from southern Zaire, which also include important occurrences of cloud forests (White 1983; Stuart, Adams, and Jenkins 1990; Thomas and Achoundong 1991).

Table 1. Tropical montane and submontane forest cover and deforestation rate compared to the entire tropics

	Forest Cover 1990		Annual Deforestation 1981–90		
	Land Area (million ha)	Total (million ha)	Land Area (%)	Total (million ha)	% per Year
Total tropics	4,778.3	1,756.3	37	15.4	0.8
Hills and mountains	700.9	204.3	29	2.5	1.1

Source: FAO 1993.

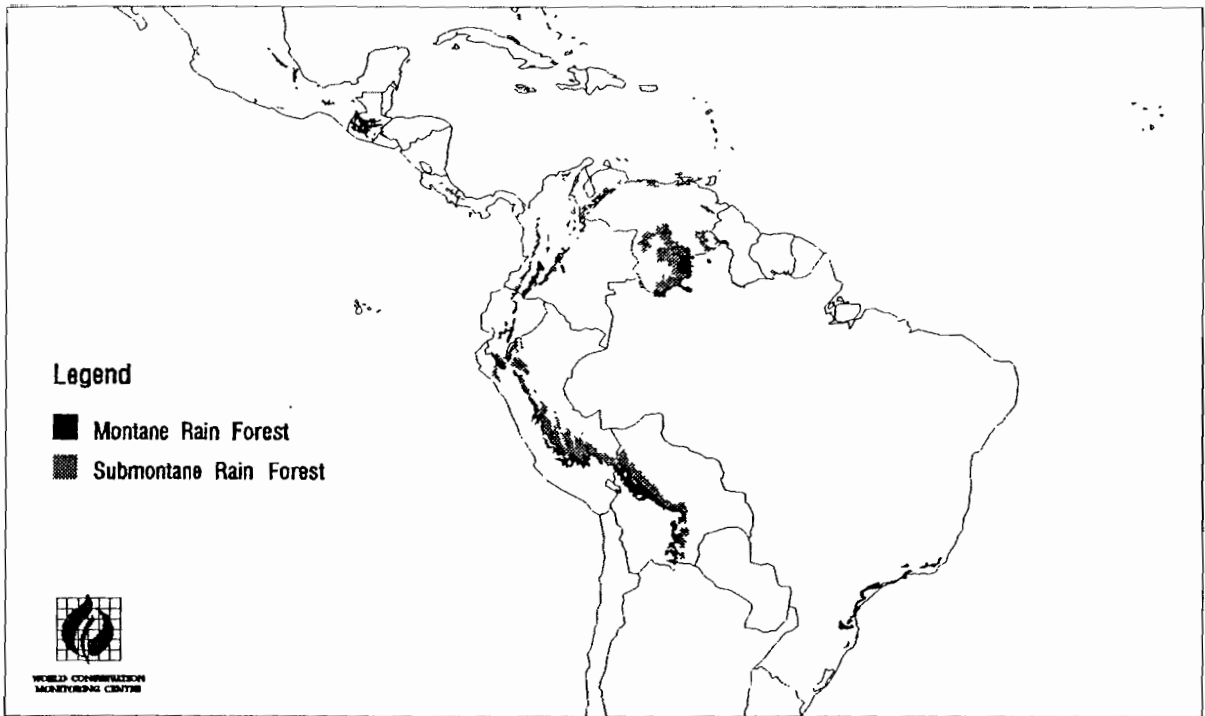


Figure 1. Distribution of tropical montane and submontane forests in Central and South America. Data are incomplete for the forest cover of Mexico, the Caribbean, and most of Central America and the southern countries of South America. (Source: World Conservation Monitoring Centre.)

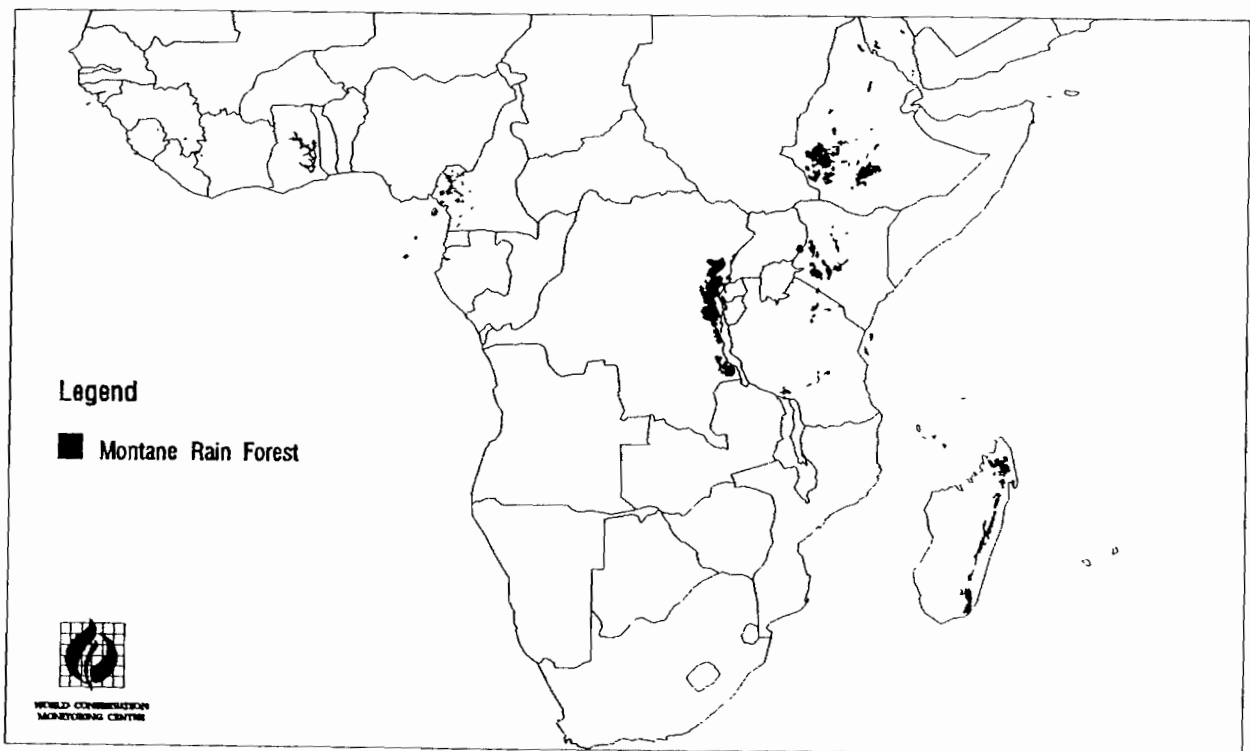


Figure 2. Distribution of tropical montane forests in Africa. (Source: World Conservation Monitoring Centre.)

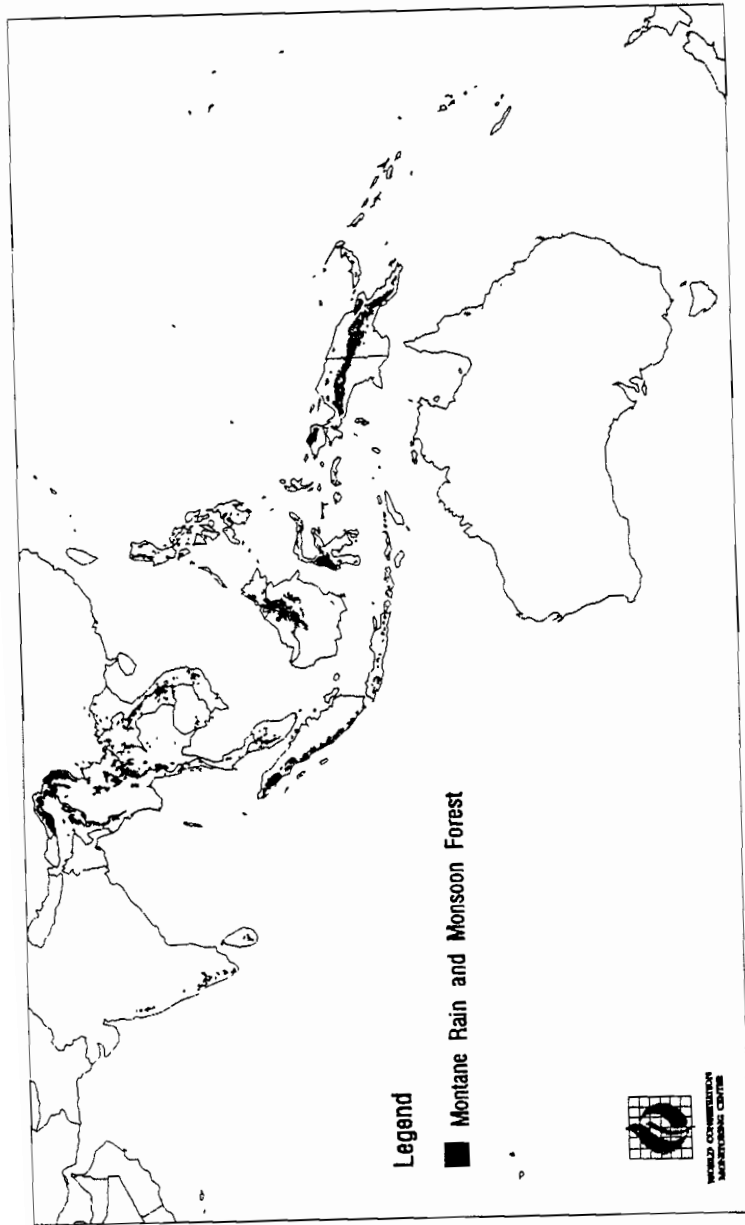


Figure 3. Distribution of tropical montane rain and monsoon forest in South and Southeast Asia and the Pacific (Source: World Conservation Monitoring Centre.)

Values

Tropical montane cloud forests exhibit many values related to the uniqueness of these ecosystems, in terms of their diversity and endemism, and the functions they provide. These values encompass:

- *Watershed function*, including a role in the capture and transport of water and protection of soils against erosion (LaBastille and Pool 1978). Evidence suggests that cloud forests perform a watershed function that is somewhat different from that performed by noncloud forests. This difference relates to the presence of the cloud itself and the occurrence of occult precipitation. The tree crowns act to intercept wind-driven cloud moisture on leaves and branches that drips to the ground. The absolute increase in net precipitation is a result of the presence of trees. This can add to the groundwater and streamflow levels, but its precise effect on the hydrological cycle is difficult to determine. The impact will, in any case, vary from place to place depending on factors such as incidence of wind-driven clouds, density of the clouds and wind speed, size and orientation of mountains, altitude, type of vegetation, and other climatic variables (see Kerfoot 1968; Stadtmüller 1987).

This "cloud stripping" phenomenon may well double the effective rainfall received in dry seasons and increase the wet season rainfall total by about 10 percent (Vogelmann 1973; Bruijnzeel 1990). Experiments to measure the extent of occult precipitation in temperate cloud forest were carried out in the Snowy Mountains in southern Australia in woodlands close to the tree line in an area with a high incidence of wind-driven clouds (Costin and Wimbush 1961). The results indicated a significant increase in net precipitation under the canopy of scattered trees compared with locations between the canopies. This contrasts strongly with the results in noncloud forests where the opposite situation occurs. That is, in noncloud forests, tree canopies frequently intercept and evaporate 20 percent or more of the incident precipitation, and this is lost to the land component of the hydrological cycle.

It can be postulated that clearing cloud forests and replacing them with vegetation with a reduced "filtering" ability will decrease net precipitation. Indirect evidence for this comes from Sri Lanka, where large areas of the central highlands montane forests have been converted to tea estates. Long-term streamflow records have indicated a decline in water yield even though there has not been a corresponding trend of decline in rainfall (Madduma Bandara and Kurupuarachchi 1988). While correlation and causation are not always the same, it is a trend that is worth exploring further.

- *Vegetation elements*. In Sub-Saharan Africa, Stuart, Adams, and Jenkins (1990) postulated that 80 percent of about 4,000 plant species of the Afromontane region are endemic, some of them occurring in cloud forests. In cloud forests of Central America, endemism is high, especially in

the Caribbean islands (LaBastille and Pool 1978). Throughout the tropics, the cloud forest zone provides habitat for notable species such as *Podocarpus* (Unesco 1981; White 1983; Sosa 1987; Jacobs 1988; FAO 1992) and tree ferns (Cyateaceae), which are common in this foggy environment (Stadtmüller 1987). In the neotropics, Luteyn (1989) determined that species of the family Ericaceae are most common in the cloud forest zone, although they are not restricted to it. The economic values of this vegetation type range from wood (often fuelwood or construction material) to medicinal plants and food plants (Torres et al. 1992), and to touristic values.

- **Fauna.** Possibly the best known cloud forest mammal is the Mountain Gorilla (*Gorilla g. beringei*), which in addition to its intrinsic value, is an important attraction for nature tourism in some countries of Central Africa (there is a similar case in South America with the Spectacled Bear). Cloud forests are also habitats for mammals and birds that play an important role in the functioning of the ecosystem, in terms of predation-dispersion of seeds and forest dynamics. Many species are valuable to local people as bushmeat, providing them with animal protein. In tropical Africa, the centers of endemism for birds largely coincide with mountainous areas, including cloud forests (Stuart, Adams, and Jenkins 1990); in South America montane areas and foothills were refuges during dry periods in the geological past, and are currently centers of diversity and endemism (Colinvaux 1989). In Costa Rica, cloud forests are covered with epiphytes, which "provide many birds with habitat and supplies of energy and nutrients," especially in the wet season (Nadkarni 1988).

Cloud forest environments in some areas have values for alternate uses, particularly where the soils are of high quality (LaBastille and Pool 1978). These include general agriculture, tea or coffee estates, pastures, and wood plantations (e.g., *Pinus* spp., *Eucalyptus* spp.).

Human Uses and Conservation Status

Many TMCFs suffer from human pressure, particularly in the submontane area (White 1983). However, it is difficult to assess precisely the global extent of such pressures in terms of their effects on structure and composition or disappearance of the cloud forests. A recent evaluation of tropical hill and mountain forest clearance by FAO (1993) estimated that the annual rate of deforestation was about 1.1 percent for 1981–1990 (Table 1). This is greater than the rate of deforestation for the tropical forest biome as a whole, estimated to be about 0.8 percent per year. LaBastille and Pool (1978) estimate that the cloud forests in Central America and the Caribbean are "probably disappearing faster than any other forest ecosystem."

A variety of nonwood forest products is harvested from cloud forests. For example, in the mountains of Central Africa, *Prunus africana* is heavily exploited for the medicinal properties of its bark and is in danger of extinction (Letouzey 1985). For other products, such as shoots of the edible mountain bamboo (*Arundinaria alpina*) in Uganda, it is difficult to assess whether or not harvesting is at a sustainable level. In heavily populated mountainous areas, the collection of fire wood (for heating and cooking) is a major contributor to forest degradation. Fires of human origin are of importance along forest edges (Thomas and Achoundong 1991). Logging, especially in submontane areas but also at higher altitudes for species such as *Podocarpus*, causes substantial changes to forest structure.

Hunting has a direct impact on fauna populations and an indirect impact on forest cover, as hunters regularly burn the vegetation at forest edges (and sometimes the forest itself) for ease of access and to concentrate grazing animals in areas of young vegetation.

Significant areas of cloud forests have been converted to plantations, especially in submontane areas. In Africa, agriculture is found as high as 2,400 m altitude and pastures as high as 2,000–3,000 m (Letouzey 1985) whereas in the Andes, agriculture has been developed as high as 3,700 m and pastures to well over 4,000 m (Morlon 1992). Tea and coffee estates are common in the montane forest zone of East Africa, and tea estates are widespread in the same zone in Sri Lanka. Cloud forests on steep slopes in South America have been converted to agriculture and pastures, resulting in severe erosion (Unesco 1981). In Costa Rica, the conversion of cloud forests into pastures, even when there is a colonization by shrub trees, has resulted in a vegetation complex with fewer epiphytes, smaller biomass, and lower diversity (Nadkarni 1988). Changes in land use, such as gold mining or iron ore extraction, can lead to locally severe land degradation.

Especially in islands or isolated forests, introduction of exotic plant and animal species has favored degradation of native ecosystems (La Reunion Island, Doumenge and Renard 1989; East Usambara Mountains, Tanzania, Hamilton and Bensted-Smith 1989).

Some cloud forests are nevertheless incorporated in the existing reserves in montane areas, but their extent and conservation status are difficult to assess because of fragmented information. Generally, areas with lesser known large species, but with numerous endemics, such as montane forests, have tended to be underrepresented in networks of protected areas (Stuart, Adams, and Jenkins 1990).

In some areas, local traditions favor conservation and sustainable use of certain forest resources. For example, in some parts of Cameroon Highlands, honey collection is an important activity for the local people and beehives are placed in trees such as *Schefflera* spp. Some forests or parts of forests are considered sacred by local people and are afforded protection (as occurs around Lake Oku in Cameroon).

Despite some notable examples of local protection, in most places high population density and the consequent demand for forest products and land for alternate uses are the most important factors that influence the conservation status of cloud forests. In some countries official government policies recognize the conservation value of such forests, and attempts are made to establish protected reserves. However, in heavily populated areas, current land pressures are likely to lead to the preservation of only small forest patches within a wider agricultural landscape. This is the case in montane Central Africa, where rich volcanic soils and high population densities favor conversion to agriculture and grazing lands.

Management Issues

Some important biophysical aspects should be considered when discussing management of TMCFs and converted land. The major issues are related to the role of vegetation in the hydrological cycle, long-term supply of forest products (both plants and animals), protection of soils, and maintenance of ecological processes. However, the details of the processes involved are poorly understood, and there is a lack of basic scientific data on the nature of the linkages.

The use of forest resources is increasingly driven by the immediate benefits that arise from these uses. There is often no real management of cloud forest resources based on rational assessment of the extent of goods and services that can be provided by well-managed forests. Some studies are being conducted to evaluate the carrying capacity of the environment with respect to resource use, but these studies have been recently established and are not yet fully operational.

It is frequently perceived that a lack of awareness and knowledge among local people is at the heart of unsustainable utilization of forest resources. However, it is rare that people living close to forests, and often dependent on them for their livelihood, are not aware of the importance of the forest. A more important constraint is often associated with the inability of local populations to take effective actions because of the presence of more powerful socioeconomic structures.

One essential element of effective management is the development of appropriate institutional structures to ensure that the wishes and desires of all those who have an interest in montane cloud forests can be considered. These interest groups may include a range of people, from those who depend on the forest for livelihood support to those who have an intellectual interest in forest conservation. However, the official decision-making process is normally in the hands of urban-based government officials and politicians who have the task of integrating sectoral interests with the broader interests of the state. There can also be, as in Eastern Zaire and the Cameroon Highlands, conflicts between traditional customary regulations governing the use of natural re-

sources and state-controlled structures and laws that tend to focus on perceived national interests.

An additional influence, which often has a major impact on the way in which forests are managed, is that of in-migration. Examples can be seen in mountainous parts of the Philippines where migrants, often from ethnic backgrounds different from the local indigenous populations, create situations that make effective management difficult.

Conservation and Sustainable Use: Some IUCN Experiences

The three projects described here are used as examples to illustrate a variety of approaches that may be suitable in advancing conservation objectives in areas subject to heavy pressure on forest resources. They are being implemented in montane and submontane areas where cloud forests occur, but where they cover only part of the project area. The primary goal of the projects is to ensure the conservation of forest resources by facilitating related development activities.

Mount Elgon Conservation and Development Project

The Mount Elgon Project in Eastern Uganda (financed by the Norwegian Agency for Development Cooperation) promotes a joint program of activities between the Ministry of Environment Protection of Uganda and IUCN. The long-term goal is to ensure conservation of natural forests on Mount Elgon while assisting community development activities where this development is directly linked to the sustainable use of forest products. The first phase of the project consisted of an extensive study and planning stage, combined with some immediate conservation measures. Phase two, under way, consists of implementation of a management plan for the forest and a long-term strategy aimed at promoting the sustainable use of natural resources in the area. Demarcation of the Mount Elgon Forest Park boundaries and improvement of the infrastructure and management of the park are also part of the activities. A study has recently started to determine bamboo (*Arundinaria alpina*) utilization patterns in the area. The plan will involve people who depend on harvesting bamboo shoots and stems in management of the bamboo resources. The goal is to continue bamboo harvesting in a sustainable manner while conserving the bamboo forests. Similar studies are planned to determine the nature of the interactions between people and other forest resources as a prelude to developing management procedures aimed at sustainable utilization.

Itombwe Mountains Project

In the Itombwe Mountains in Eastern Zaire, IUCN works closely with a governmental body, the Zairian Institute for Conservation of Nature, and with local people and NGOs. Pressures on the forests come from extension of pas-

tures and agriculture, gathering of wood (for fuel and construction), hunting, and, in some places, gold mining. The approach selected is a participative one, bringing external expertise to work with local people and NGOs to facilitate planning and sustainable development. This participatory rural development process has permitted local people to gather information and analyze environmental and socioeconomic problems they are facing. The socioeconomic data are processed locally, and the results will be discussed with the rural people living in the area, through workshops to be held in selected villages. This action will form the basis for future project planning.

Although this process has just started, the cooperative mechanism has reinforced local awareness and local capacity to analyze and manage natural resources. This cooperative effort is vital in countries like Zaire where internal conflicts have resulted in disintegration of the administrative capacity of the official government. Some problems experienced include the necessity to send longer support missions than may be the case in normal circumstances, and the difficulty—in continuing with the analysis phase—of mobilizing funds to execute future on-ground activities in a country with political instability.

Native Andean Forests Conservation Project

A recent preliminary analysis by Intercooperation (an NGO) and IUCN of native Andean forests in Bolivia and Ecuador drew several conclusions: (1) only small patches of native montane forests remain; (2) these forest fragments are in danger of complete elimination due to pressure from uncontrolled colonization; (3) the official management institutions are ineffective with respect to protection of remaining forest areas. This analysis led to a program aimed at conservation and sustainable use of the native Andean forests by stabilizing the pressures on these forests and reclaiming degraded areas. The activities include establishing demonstration projects, strengthening institutional capacity, analyzing the legislative system, and enhancing regional coordination and knowledge sharing. This project is financed by and will be implemented by Intercooperation and the Swiss Technical Cooperation with local organizations and communities; IUCN will provide technical support.

Conclusions

The values and services provided by TMCFs should be fully recognized and taken into account in policy statements and management decisions. Management decisions should consider (1) the necessity of exploiting products within the carrying capacity of the ecosystems; (2) the value of forests in water capture and for maintaining soil stability (particularly important in areas where soils are prone to erosion); and (3) the necessity of conserving reservoirs for genetic material. The conversion of forests to other uses should be carried out only after careful impact analysis.

Such topics for consideration are important; however, they do not meet all the conditions necessary for sustainable use of natural resources. We have provided some details of possible approaches, with references to IUCN projects. A conclusion of these project experiences is that the major constraint to cloud forest conservation is awareness and commitment of all the participants and interest groups for the long-term conservation of these forests. It is necessary to build management processes that take into account the existing and potential conflicts to be resolved and to design a human-scale approach, which is more participative, favoring integration of concerns and cooperation (Poore 1992). Similar initiatives are being implemented around the world but should be further developed, extended, and adapted to different circumstances.

The diversity of situations implies a diversity of strategies in the field, but some basic principles that apply to managing mountain ecosystems can still be valid worldwide (see global guidelines in Dasmann and Poore 1979 and Poore 1992).

While a lack of biophysical knowledge is a constraint to understanding the nature of the hydrological and ecological processes operating in TMCFs, the major need is a conceptual framework within which to address the conservation needs of cloud forests globally, regionally, and nationally. We hope that the task of providing such a framework will be undertaken. Among points that need consideration are:

Globally

- listing of the unique features and values of TMCF, including a typology;
- evaluation of extent and distribution of cloud forests, and assessment of their conservation status;
- identification of the major threats to their conservation and of sustainable practices;
- definition of a global policy on cloud forests including prioritization of those areas where immediate conservation action is required.

Regionally

- identification of the transfrontier cloud forests that deserve coordinated actions between neighboring countries;
- establishment of cooperation processes to manage sustainably transfrontier cloud forests, and design of regional policies.

Nationally

- detailed mapping of cloud forest areas and assessment of their conservation value (locally and globally) and status (current land tenure, level of protection, threats to their integrity);

- development of a strategy to ensure that the values of cloud forests are recognized and fully considered in decision-making processes;
- implementation of management regimes that take account of the legitimate demands of local people for access to and usage of forest products in a sustainable way.

Acknowledgments. The authors thank their colleagues in Gland and around the world who provided valuable information and helpful comments on the drafts.

References

- Bruijnzeel, L. A. 1990. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: A state of knowledge review*. Paris: Unesco.
- Colinvaux, P. A. 1989. The past and future Amazon. *Scientific American* 68-74.
- Costin, A. B., and D. J. Wimbush. 1961. Studies in catchment hydrology in the Australian Alps. 4) Interception by trees of rain, cloud and fog. CSIRO Australian Division of Plant Industry Technical Paper 16, Canberra, Australia.
- Cusset, G. 1989. La flore et la végétation du Mayombe congolais. Etat des connaissances. In *Revue des connaissances sur la Mayombe*, ed. J. Sénéchal, Matuka Kabala, and F. Fourmier, 103-136. Paris: Unesco.
- Dasmann, R. F., and D. Poore. 1979. *Ecological guidelines for balanced land use, conservation and development in high mountains*. UNEP, Nairobi, IUCN, and WWF, Gland, Switzerland.
- Doumenge, C., and Y. Renard. 1989. *La conservation des écosystèmes forestiers de l'île de la Réunion*. Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni: IUCN.
- Dowsett-Lemaire, F. 1991. The vegetation of the Kouilou bassin in Congo. In *Flore et faune du bassin du Kouilou (Congo) et leur exploitation*, ed. R.J. Dowsett and F. Dowsett-Lemaire. *Tauraco Research Report* 4:17-51.
- FAO. 1992. *Aménagement et conservation des forêts denses en Amérique tropicale*. FAO, Etude Forêts 101, Rome.
- FAO. 1993. Summary of the final report of forest resources assessment 1990 for the tropical world. Paper prepared for the 11th COFO meeting, Rome.
- Hamilton, A. C., and R. Bensted-Smith, eds. 1989. *Forest conservation in the East Usambara Mountains, Tanzania*. Gland, Switzerland, and Cambridge, UK: IUCN.
- Jacobs, M. 1988. *The tropical rain forest: A first encounter*. Berlin and Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Kerfoot, O. 1968. Mist precipitation on vegetation. *Forestry Abstracts* 29:8-20.
- LaBastille, A., and D. J. Pool. 1978. On the need for a system of cloud-forest parks in Middle America and the Caribbean. *Environmental Conservation* 5(3): 183-190.
- Letouzey, R. 1985. *Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1:500 000 (1985). 2) M-SM. Région afro-montagnarde et étage submontagnard*. Toulouse, France: Institut de la Carte Internationale de la Végétation.
- Luteyn, J. L. 1989. Speciation and diversity of Ericaceae in Neotropical montane vegetation. In *Tropical forests. Botanical dynamics, speciation and diversity*, ed. L.B. Holm-Nielsen, I.C. Nielsen, and H. Balslev, 297-310. London: Academic Press.
- Madduma Bandara, C. M., and T. A. Kurupuarachchi. 1988. Land-use change and hydrological trends in the upper Mahaweli basin. For workshop on hydrology of natural and man-made forests in the hill country of Sri Lanka, Kandy. Unpublished.
- Morlon, P., ed. 1992. *Comprendre l'agriculture paysanne dans les Andes Centrales*. Paris: INRA.

- Nadkarni, N. M. 1988. Tropical rain forest ecology from a canopy perspective. In *Tropical rainforests: Diversity and conservation*, ed. F. Almeda and C.M. Pringle, 189-208. San Francisco: California Academy of Sciences and American Association for the Advancement of Science.
- Persson, R. 1974. *World forest resources*. Stockholm: Royal College of Forestry.
- Poore, D. 1992. *Guidelines for mountain protected areas*. Gland, Switzerland, and Cambridge, UK: IUCN Commission on National Parks and Protected Areas.
- Sayer, J. A., C. S. Harcourt, and N. M. Collins, eds. 1992. *The conservation atlas of tropical forests. Africa*. Gland, Switzerland, and Cambridge, UK: IUCN.
- Sosa, V. J. 1987. Generalidades de la región de Gómez Farías. In *El bosque mesofilo de montaña de Tamaulipas*, ed. H. Puig y R. Brach, 15-28. México: Instituto de Ecología.
- Stadtmüller, T. 1987. *Cloud forests in the humid tropics. A bibliographic review*. United Nations University, Tokyo, and CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Stuart, S. N., R. J. Adams, and M. D. Jenkins. 1990. *Biodiversity in Sub-Saharan Africa and its islands. Conservation, management and sustainable use*. IUCN, Occasional Papers of the IUCN Species Survival Commission 6, Gland, Switzerland.
- Thomas, D. W., and G. Achoundong 1991. Montane forests of Western Africa. In AETFAT Congress.
- Torres, H., R. Borel, N. Bustamante, and M. I. Centeno. 1992. *Usos tradicionales de arbustos nativos en el sur de Puno*. Puno, Perú: Intercooperation Unesco. 1981. *Vegetation map of South America. Explanatory notes*. Paris: Unesco.
- Vogelmann, H. W. 1973. Fog precipitation in the cloud forests of Eastern Mexico. *BioScience* 23(2): 96-100.
- White, F. 1983. *The vegetation of Africa*. Paris: Unesco.
- Whitmore, T. C. 1975. *Tropical rain forests of the Far East*. London: Oxford University Press

11. Histoire des sécheresses andines : Potosi, El Niño et le Petit Age Glaciaire - 1999 (avec *Maria del Rosario Prieto*)

HISTOIRE DES SÉCHERESSES ANDINES POTOSI, EL NIÑO ET LE PETIT ÂGE GLACIAIRE

Alain Gioda⁽¹⁾ et Maria del Rosario Prieto⁽²⁾

(1) Programme Neiges et Glaciers Tropicaux, UR 1
IRD - SENAMHI, C.P. 2352, Cochabamba, BOLIVIE

(2) Unidad de Historia Ambiental
Instituto Argentino de Nivología y Glaciología
CRICYT, C.C. 330, 5500 Mendoza, ARGENTINE

RÉSUMÉ

Cet article présente la méthode historique de reconstitution du climat des Andes centrales depuis la colonisation espagnole (xvi^e siècle), qui utilise les sources narratives des archives et des bibliothèques boliviennes, essentiellement à Potosí et à Sucre (l'ancienne Charcas ou encore La Plata), argentines, à Buenos Aires, et espagnoles, à Madrid et surtout à Séville dans l'*Archivo General de Indias*. Les relations entre les sécheresses et l'intensité des épisodes El Niño au cours de la période étudiée sont présentées et discutées, de même que la chronologie du Petit Âge Glaciaire. Il faut souligner que les grandes périodes sèches andines, qui sont aussi identifiées à Potosí de 1560 à 1641 et de 1780 à 1820, sont contemporaines de pulsations froides du Petit Âge Glaciaire.

ABSTRACT

History of the Andean droughts; Potosi, El Niño and the Little ice Age

This is an account of the construction of the climate of the central Andes since the Spanish conquest in the 16th century. The data were collected from libraries in Bolivia (mainly Potosi and Sucre, formerly Charcas or La Plata), Argentina (Buenos Aires) and Spain (Madrid and particularly the *Archivo general de Indias* in Seville). We discuss the relationships between droughts and El Niño episodes with an historical focus on the links between cold periods and the Little Ice Age. We confirm that two main dry periods in the Andes, which are identified in the Potosi area in 1560-1641 and 1780-1820, are linked with two Little Ice Ages.

Afin de reconstituer la variabilité climatique, on utilise des chronologies établies grâce à l'étude des glaces, des sédiments lacustres, des pollens (palynologie), des lichens (lichenostratigraphie) et diatomées fossiles, de la mesure des stries de croissance des coraux et des anneaux des arbres (dendrochronologie) ainsi que des documents écrits anciens (encadré page suivante). Dans ce travail, le climat andin depuis la seconde moitié du xvi^e siècle est analysé selon les sources historiques, dites aussi narratives. Le projet Archival Climate History Survey (Archiss) de l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (Unesco), de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et de l'International Council on Archives (ICA) fédère ces recherches (Baker, 1996 et 1998 ; Duckstein, 1998). L'Amérique latine est l'un des terrains privilégiés d'études grâce à l'ample production publique et privée de documents sur papier par l'empire colonial espagnol, qui se poursuit après l'indépendance des États sud-américains au xix^e siècle.

Les limites des outils paléoclimatiques dans les Andes tropicales

L'étude des glaces permet de remonter loin dans le temps. Ainsi, Thompson et al. (1998), qui utilisent les isotopes de l'oxygène et le deutérium, viennent de proposer une chronologie des 25 000 dernières années en Bolivie, mais seuls des accidents, comme les poussières volcaniques provenant d'une éruption lointaine et bien datée dans l'histoire et incluses dans les glaces, permettront peut-être d'affiner cette approche au plan temporel.

Des reconstitutions paléoenvironnementales se font aussi à partir d'indicateurs fossiles comme les pollens et les diatomées conservés dans les sédiments lacustres prélevés par carottage. Les assemblages de pollens et diatomées correspondent à un mélange d'espèces ayant vécu durant une période plus ou moins longue (5-10 ans dans le meilleur des cas). La profondeur des échantillons est convertie en échelle de temps, en s'appuyant sur les datations par le carbone 14. Deux échantillons proches peuvent être séparés par vingt à cinquante années. Particularité gênante du milieu tropical, les sédiments lacustres ne présentent pas de varves annuelles ou saisonnières, à quelques exceptions près.

La lichenostratigraphie peut présenter des marges d'erreur importantes car elle dépend d'étalonnages sur des monuments bien datés, ce qui n'est pas le cas de ceux des civilisations précolombiennes de l'époque Tiwanaku (VIII^e siècle av. J.-C.-XII^e siècle apr. J.-C.) et incaïque (XV^e-XVI^e siècle).

Les coraux présentent des stries de croissance dont la variation peut être étudiée même à l'échelle de la saison. La composition chimique ou isotopique des squelettes calcaires dépend de la température de la mer, des précipitations et des teneurs en nutriments, et donc de l'intensité des upwellings. Les Galapagos, où ils furent utilisés par Dunbar et al. (1994) pour reconstruire les températures des eaux de surface depuis la fin du XVI^e siècle, sont le milieu le plus proche des Andes dont le climat a été étudié par cette méthode.

La dendrochronologie est difficile à mettre en œuvre dans les milieux tropicaux où les arbres ne présentent généralement pas d'anneaux de croissance et à fortiori annuels. Déboisées depuis des millénaires, les montagnes andines sèches sont, de plus, caractérisées par la très lente croissance de leurs arbres endémiques.

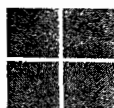
Les sources historiques, issues des archives et grimoires, sont les seules qui permettent de dater, au jour près dans le meilleur des cas, un épisode climatique, noté par ses contemporains, le plus souvent à cause de son caractère désastreux. L'idéal est de disposer de séries continues d'observations contrôlées afin d'aboutir à une histoire sérieuse et à une chronologie climatique, mais l'écriture n'arrive localement qu'au XVI^e siècle, avec la colonisation espagnole.

LE TERRAIN D'ÉTUDE

Les premières observations scientifiques du continent sud-américain correspondent aux voyages de Pizarre le long des côtes dès 1525-1526 (Hocquenghem et Ortlieb, 1990). Après la chute des Incas en 1534 et les guerres civiles entre Espagnols (1543-1548), l'administration se mit en place, mais elle fut précédée par la ruée vers l'argent de Potosí en 1545.

À ses débuts en 1561, la *Real Audiencia de Charcas* était une grande entité juridique, siégeant à La Plata (l'argent, en espagnol, car la ville est proche de Potosí). Toutefois, elle jouait aussi un rôle politique et religieux marqué par l'élévation de Charcas au rang d'évêché dès 1552, car les Espagnols associaient toujours intimement le temporel et le spirituel. Elle était rattachée administrativement à la vice-royauté du Pérou, d'où son autre nom historique, le Haut-Pérou. L'Audience se transforma en le moteur économique le plus puissant du continent américain. Potosí, bâtie à la hâte à 4 000 mètres d'altitude, compta 160 000 habitants vers 1610-1650 ; elle pouvait alors se comparer à Paris ou à Londres. L'Audience se transforma au fil du temps en un pôle politique et économique qui fut le berceau de la Bolivie. Au XVI^e siècle, et jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, l'Audience s'étendait, du nord au sud, de Puno (Pérou actuel) à Buenos Aires (Argentine) et, d'ouest en est, de la côte du Pacifique (nord du Chili) aux missions jésuites du Paraguay et du Mato Grosso (Brésil). Au total, elle couvrait environ six millions de km² (figure 1).

Puis le territoire de l'Audience, son importance et celle de la ville de Potosí diminuèrent sans cesse à partir de la fin du XVIII^e siècle avec le poids croissant de Buenos Aires. Le territoire bolivien couvrait encore 2 300 000 km² en 1825, à l'indépendance, quand la nouvelle capitale changea de nom, La Plata devenant Sucre. Mais il n'est plus que de 1 100 000 km² depuis 1935, à la suite de défaites lors de conflits avec les États voisins (López Bertran, 1993).



LA MÉTHODE HISTORIQUE

Malgré leur importance démontrée par les résultats obtenus dans l'hémisphère nord depuis Lamb (1977) et Le Roy Ladurie (1983), les sources historiques n'ont pas été suffisamment exploitées en Amérique du Sud (Morlon, 1992 ; Prieto, 1994 ; Gioda et Prieto, 1997).

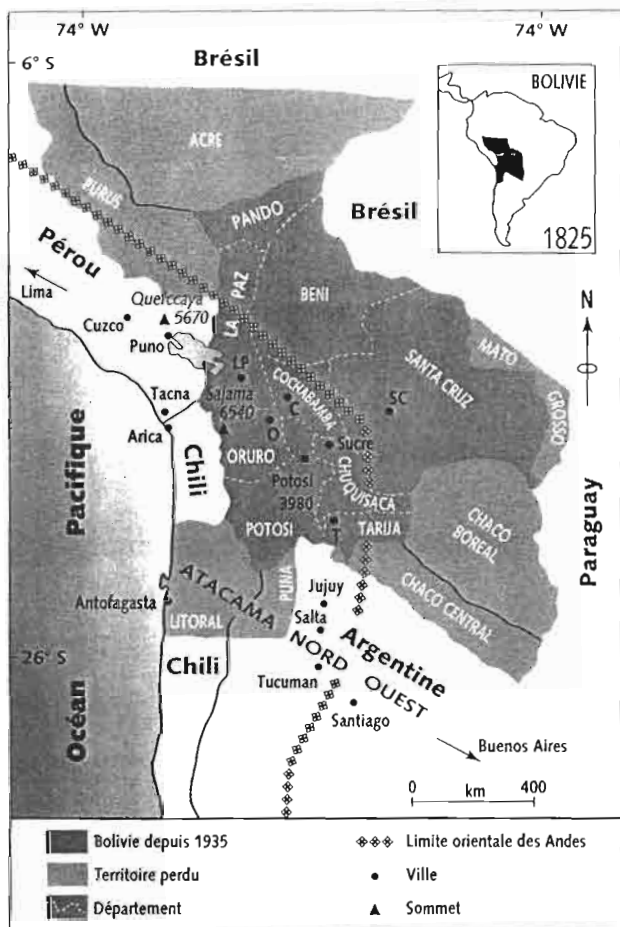
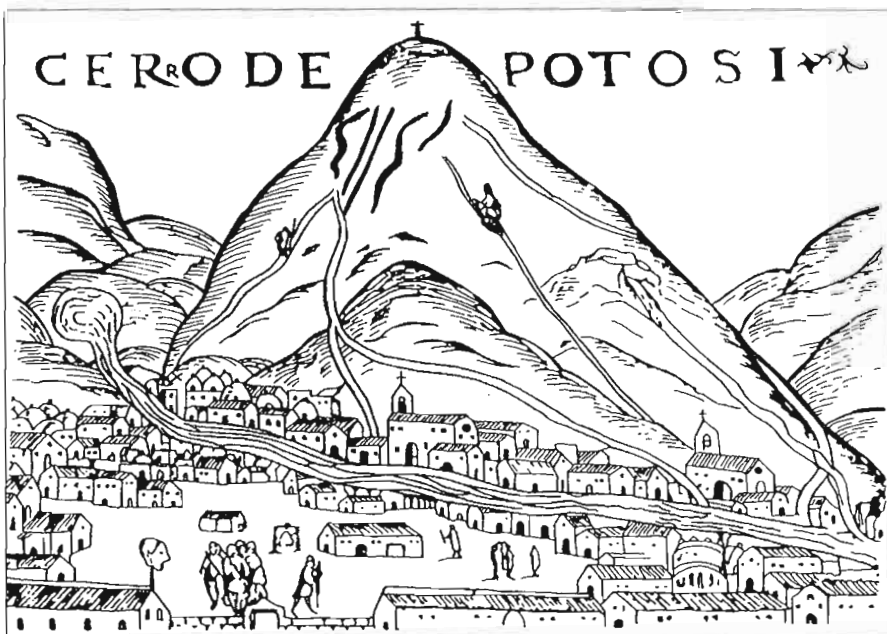


Figure 1 - Carte politique de Charcas puis de la Bolivie depuis le XVI^e siècle. Villes et départements ont souvent le même nom, d'où les abréviations LP pour La Paz, SC pour Santa Cruz, etc.

Les sources historiques sont les seules à permettre de dater précisément un épisode climatique ancien et de témoigner de son caractère marquant grâce aux observations et aux annotations de ses contemporains. Par conséquent, elles sont idéales pour caler dans le temps les reconstitutions faites par les autres techniques. Quand l'information est disponible de façon continue, les sources historiques autorisent l'écriture d'une histoire du climat aux pas de temps mensuel, annuel, décennal et séculaire. De plus, elles permettent de préciser les changements climatiques liés au Petit Âge Glaciaire et de reconstituer les impacts de phénomènes d'une durée pouvant dépasser l'année, comme El Niño en Amérique du Sud.

Les sources narratives présentent toutefois la particularité d'avoir été glanées, sans grand esprit de méthode, par les érudits des siècles passés, qui se bornèrent à relever les événements ayant frappé l'imagination des contemporains : sécheresses « effroyables », « déluges » de pluie, etc. La chronique de Potosí d'Arzán (1705-1737), somme de récits, d'évocations et de légendes, est incontestablement de ce type ; le grand écrivain vénézuélien du XX^e siècle Arturo Uslar Pietri l'appelle « Les mille et une nuits de la fantastique Amérique » (Gioda et Dory, 1998). Il existe chez la plupart des observateurs et des historiens une tendance à enregistrer seulement les extrêmes, et donc seulement les calamités climatiques. En découle le caractère subjectif, hétérogène et discontinu dans le temps d'une partie du matériel de travail qui demande à être testé, fiché, classé et organisé pour être significatif (Le Roy Ladurie, 1983).

Par conséquent, le caractère plus ou moins accentué des sécheresses ou des précipitations abondantes est déterminé par les qualificatifs que les contemporains leur ont attribué, et aussi par la fréquence de leur citation dans les documents anciens. Les thèmes intéressants dans ces documents sont les



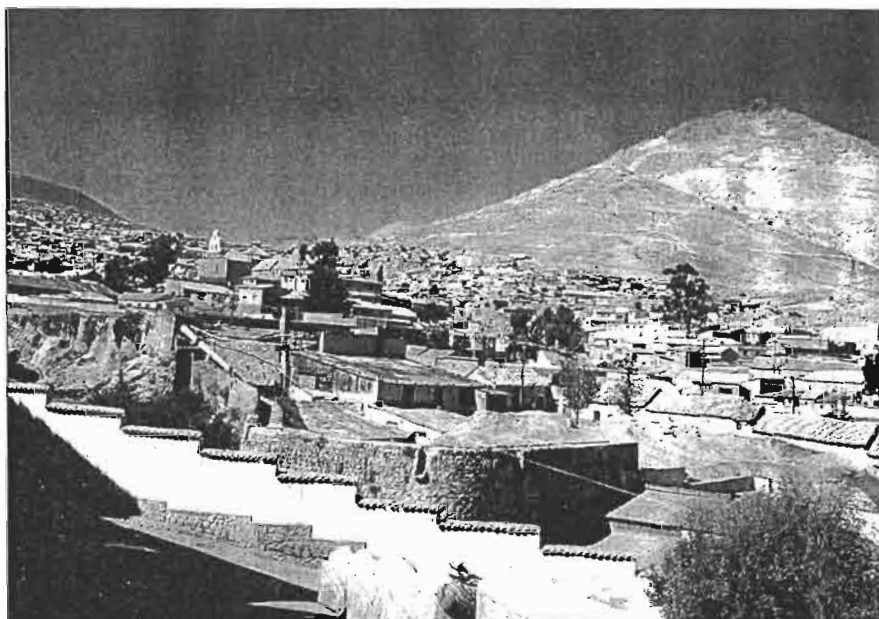
Première vue de Potosí éditée en 1553 (d'après Cieza de León, croquis daté de la fin des années 1540). Née spontanément en 1545, la ville comptait environ 14 000 âmes et 2 500 maisons dès 1547. Elle verra plus que décupler le nombre de ses habitants dans les cinquante années suivantes à cause de la ruée vers l'argent. Le Cerro de Potosí (la montagne d'argent), avec ses grands filons noirs, domine la ville.

récoltes, l'état du bétail et des pâturages, les processions et prières pour favoriser la pluie et le débit du canal de Potosí, qui traverse la ville de Potosí depuis 1576, et dont l'énergie servait à concasser le minerai d'argent (Gioda et Serrano, 1998 et 1999).

On crée ainsi cinq catégories, allant d'une année très sèche (correspondant à la valeur -2) à une année très pluvieuse (+2), en passant par les qualificatifs de sèche (-1), normale (0) et pluvieuse (+1). Une année est définie comme normale quand il existe des informations sur la vie sociale, économique et politique et qu'aucune donnée climatique directe ou indirecte, comme l'état des récoltes, n'est relevée dans les documents.

LES SOURCES HISTORIQUES

Des dépôts documentaires ont été consultés en Bolivie (*Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia* de Sucre, *Archivo Histórico de la Casa de Moneda* de Potosí, *Archivo Histórico de Cochabamba*, *Archivo Histórico de La Paz*), en Argentine (*Archivo General de la Nación* de Buenos Aires) et en Espagne (*Archivo General de Indias* de Séville *Archivo de la Real Academia de la Historia* de Madrid, *Archivo del Museo de la Marina* de Madrid, *Archivo de la Biblioteca Nacional* de Madrid).



Vue actuelle de la cité de Potosí (130 000 habitants à 4 000 mètres d'altitude). Ville historique classée depuis 1987 « Patrimoine de l'Humanité » par l'Unesco, elle a gardé tout son cachet colonial sous le triangle de la montagne d'argent. L'exceptionnelle luminosité de l'atmosphère a fait choisir cette région pour l'implantation du nouveau télescope géant européen (dans le Nord chilien). (Photo A. Gioda)

Les informations à propos de Potosí proviennent d'abord de la chronique de Bartolomé Arzáns (1705-1737) qui couvre la période qui s'étend de 1545, date de la naissance de la ville, à 1737. Les données qualitatives sur le climat tirées de cette chronique ont été complétées par les informations issues, entre autres, du guide de Potosí (Cañete, 1787) et du fonds *Audiencia de Charcas* – *Archivo General de Indias*. Les comptes rendus réguliers imposés par le roi Charles III à propos des ressources en eau et des récoltes (1784-1810) sont une source irremplaçable d'informations ; leur caractère administratif et rigoureux contraste avec les annotations ingénues et fantaisistes d'une grande partie de la chronique d'Arzáns, de 1545 jusqu'à environ 1650. De plus, des études récentes ont fourni les prix des produits agricoles sur les marchés (Tandeter et Wachtel, 1983), des explications des crises économiques (Tandeter, 1991), etc.

Toutefois, le travail sera encore affiné par l'incorporation des informations des *Acuerdos del Cabildo de Potosí* (1585-1817), qui couvrent trente-trois volumes inédits et sont les documents équivalents des actes municipaux. Leur dépouillement a débuté avec le parrainage d'Archiss en novembre 1998.



SÉCHERESSES ET ANNÉES PLUVIEUSES À POTOSÍ

La série climatique reconstituée de Potosí couvre 245 années de 1560 à 1804 (figure 2). 72 % des années sont normales. 20 % des années sont classées sèches et très sèches, et seulement 8 % pluvieuses et très pluvieuses. La classification « très sec, sec, normal, pluvieux et très pluvieux » s'applique à un climat qui est déjà considéré aride par rapport au climat actuel et dont les principales caractéristiques sont les suivantes : température moyenne annuelle de 9 °C à Potosí avec environ 140 jours de gel par an et autour de 400 mm de précipitations annuelles.

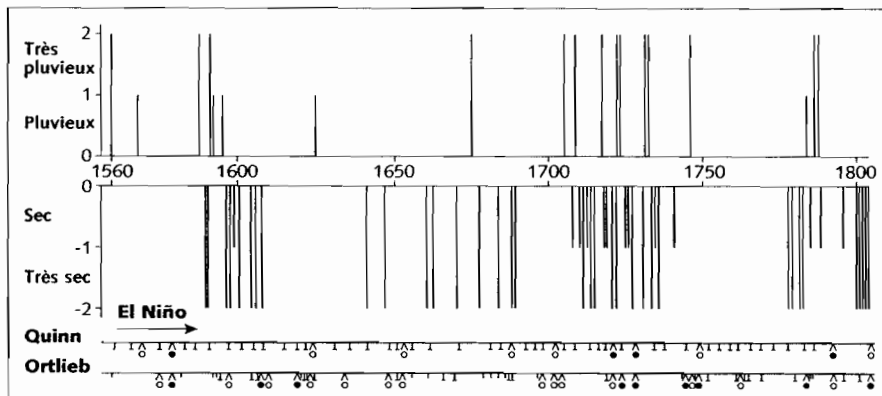


Figure 2 - Reconstitution au pas annuel du climat de Potosí entre 1560 et 1804 selon les sources historiques.

En haut, un trait vertical indique le caractère de chaque année : -2, très sec ; -1, sec ; 0, normal ; 1, pluvieux ; 2, très pluvieux.

En bas, sont reportées les chronologies des phénomènes El Niño selon Quinn (1993) et selon Ortlieb (1998). Chez Quinn, les épisodes sont répartis en trois classes : très fort (cercle noir), fort (cercle blanc) et moins fort (lettre T renversée). Chez Ortlieb, la classification est identique à deux réserves près : des épisodes qui ont eu une grande extension spatiale sont aussi considérés très forts (cercle noir) ; de nombreux événements ne sont pas suffisamment connus (petite barre verticale). Les méthodes de recherche des deux auteurs, à partir des sources historiques, sont très proches, mais le travail d'Ortlieb, plus récent, intègre également les apports de la datation d'El Niño par l'étude des coraux (îles Galapagos, Équateur).

Dans le détail, la seconde moitié du XVI^e siècle se caractérise par son climat variable mais à dominante humide, qui se note aussi dans la zone voisine de l'actuel Nord-Ouest argentin (Prieto et al., 1999) faisant partie de la même région biogéographique : la diagonale aride et semi-aride sud-américaine (González Loyarte, 1995). À partir de 1590 et jusqu'à 1610, le climat devient plus sec.

Les climats des XVII^e et XVIII^e siècles se distinguent facilement l'un de l'autre. Le premier apparaît comme plus clément grâce à une fréquence moindre des sécheresses entre 1625 et 1690. La dernière décennie du XVII^e siècle et l'ensemble du XVIII^e siècle se caractérisent par une alternance entre années pluvieuses et années sèches, ces dernières étant de loin les plus nombreuses. Dans

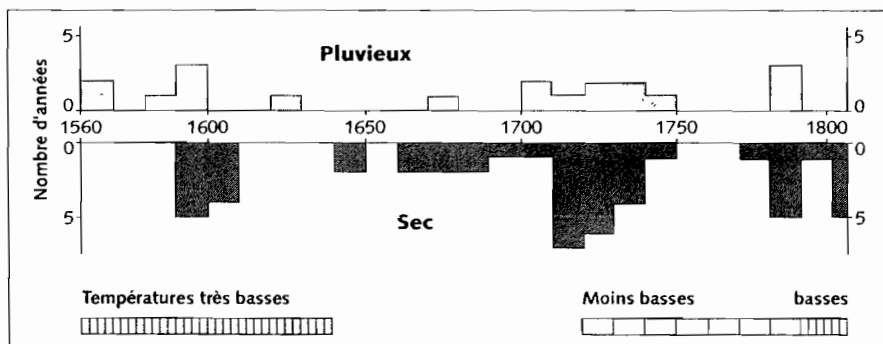
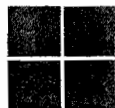


Figure 3 - Reconstitution du climat de Potosí entre 1560 et 1804 par décennie . nombre d'années de caractère donné.

En haut, le nombre d'années sèches (en gris foncé) et le nombre d'années pluvieuses (gris clair) sont indiqués pour chaque décennie.

Au bas de la figure et pour la même période, sauf entre 1641 et 1719, a été reportée l'estimation des températures à partir d'une dendrochronologie de la Patagonie septentrionale (Villalba, 1994). Plus les traits sont serrés, plus la température est basse.



les premières quarante années du XVIII^e siècle, le climat est particulièrement rude avec un grand nombre d'années sèches, spécialement durant la décennie 1730-1739 (figure 3). Prieto et Herrera (1992) avaient déjà constaté que, dans le Nord-Ouest argentin, le XVII^e siècle avait été plus pluvieux que le XVIII^e siècle dont le climat a été plus instable avec un plus grand nombre de sécheresses. À partir de 1780-1785, le climat de Potosí redevient extrêmement sec jusqu'au début du XIX^e siècle. Si notre analyse – qui s'appuie sur une série reconstituée sans lacune temporelle – s'arrête actuellement à 1804, il faut savoir que cette période de sécheresse est bien connue dans les Andes tropicales où elle s'achève autour de 1810, selon les sources historiques (Prieto et al., 1995), et vers 1820, selon la glaciologie (Thompson et al., 1986).

EL NIÑO ET LES SÉCHERESSES

El Niño, Enso et l'Oscillation australe

Le terme El Niño, « l'enfant Jésus » en espagnol, désigne un courant de sud-ouest relativement faible et chaud qui s'établit aux environs de Noël, avec une récurrence de quelques années, le long des côtes de l'Équateur et du Pérou. C'est ce sens restrictif qui a été adopté dans ce travail comme dans ceux de Quinn et al. (1987), Aceituno (1993), Quinn (1993), Ortlieb (1995, 1998, 1999)...

Dans la littérature scientifique (Quinn, 1993 ; Aceituno, 1993 ; Ortlieb, 1998), on trouve fréquemment l'acronyme Enso, pour El Niño-Southern Oscillation, qui désigne des périodes anormalement chaudes dans l'océan Pacifique tropical oriental et central, associées à des valeurs négatives de la différence de pression au niveau de la mer entre Tahiti et Darwin, au nord de l'Australie (Southern Oscillation Index).

L'expression Southern Oscillation, ou Oscillation australe en français, se rapporte plus spécifiquement à un phénomène à grande échelle qui est caractérisé par son influence sur le champ de pression planétaire. L'Oscillation australe se marque notamment par un mouvement de bascule dans le champ des différences de pression atmosphérique entre l'est et l'ouest de l'océan Pacifique tropical. Actuellement, il est admis que le phénomène d'Oscillation australe connaît deux états extrêmes : 1) un événement chaud ou El Niño ou Enso ou encore phase El Niño de Enso ; 2) un événement froid ou La Niña ou anti-El Niño ou encore phase froide de Enso (Aceituno, 1993 ; Ronchail, 1998 ; Ronchail et Gioda, 1999).

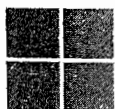
Selon Quinn (1993), qui s'appuie sur un premier travail publié en 1987, cent-vingt épisodes El Niño sont identifiés par les sources historiques, depuis l'arrivée de Pizarro dans le Pacifique en 1525 (encadré ci-contre). Neuf sont qualifiés de très forts, y compris celui de 1982-1983. Avec le dernier épisode de 1997-1998, ce chiffre est porté à dix. Le nombre d'épisodes El Niño est beaucoup plus faible selon Ortlieb (1998), qui utilise la même méthode que Quinn mais qui est plus circonspect dans l'attribution des anomalies climatiques à El Niño (figure 2).

Il est possible de distinguer différentes périodes de l'histoire du climat à Potosí et dans cette partie de la diagonale semi-aride sud-américaine. D'après Prieto et al. (1999), entre 1580 et 1641, les sécheresses coïncident avec l'apparition d'El Niño dans 40 % des cas sur l'Altiplano bolivien, dans les hautes vallées andines et dans le Nord-Ouest argentin. Puis, pour la période 1663-1710, toujours avec la méthode historique et dans ces mêmes régions, le résultat est inversé ; dans 45 % des cas, il y a concomitance de l'apparition d'El Niño avec des pluies anormalement fortes. À l'échelle annuelle, il n'y a donc pas de relations stables entre El Niño et la sécheresse. Pour la longue période allant du XVI^e siècle au début du XIX^e siècle, qui est aussi celle que nous avons étudiée à Potosí, les anomalies climatiques ne sont pas synchrones avec les épisodes El Niño dans différentes localités de l'Amérique latine qui vont, du nord au sud, du Mexique au Chili central en passant par le Nordeste brésilien (Ortlieb, 1998).

Si l'on replace l'exemple de Potosí dans le cadre plus large des Andes centrales, il faut tout d'abord souligner que la présence d'El Niño sur les côtes sud-américaines n'implique pas nécessairement des pluies torrentielles ou de fortes sécheresses. Toutefois, depuis le travail pionnier de Francou et Pizarro (1985) sur les conséquences d'El Niño, il est généralement admis qu'à l'apparition de ce courant chaud correspondent des sécheresses marquées sur l'Altiplano péruvien-bolivien et dans les vallées interandines et qu'il n'y a pas de relations significatives entre la venue de ce phénomène océanique et les hauteurs de pluie annuelles des régions basses de l'orient bolivien (Ronchail, 1995).

L'absence de relation entre l'apparition d'El Niño et le cumul annuel de précipitations se vérifie à La Paz (3 660 m) sur près d'un siècle d'observations (1898-1986) sans lacunes de l'observatoire météorologique de San Calixto (Ronchail et Gioda, 1999). Mais, même au bord du Pacifique, sur l'ancien littoral bolivien qui est aujourd'hui le Nord chilien, la conclusion était identique après une étude des pluies depuis le XIX^e siècle (Ortlieb, 1995).

Toutefois, une relation significative a été trouvée à San Calixto de La Paz, en étudiant les précipitations des deux années calendaires pendant lesquelles se développe un El Niño : le cœur de la saison des pluies (de décembre à mars) présente un déficit de 14 % par rapport à la normale (Ronchail et Gioda, 1999). Toutefois, ce résultat moyen ne doit pas masquer la variabilité très forte des conséquences des épisodes El Niño en Bolivie (Ronchail, 1998).



SÉCHERESSES ET CATASTROPHES

La mémoire est sélective. Quelquefois, des phénomènes climatiques majeurs passent inaperçus de leurs contemporains et, d'autres fois, les calamités naturelles ont un grand impact sur la mémoire collective et marquent des ruptures historiques. Il peut se dérouler rapidement une tragédie (au sens classique du terme avec la règle des trois unités de lieu, de temps et d'action) née d'un effet cumulatif : l'addition de phénomènes naturels et anthropiques anormaux qui, pris individuellement, paraissent incapables de déboucher sur une issue funeste (Ercole et Dollfus, 1995).

Toutes les grandes sécheresses à Potosí sont-elles liées à El Niño ? La réponse est négative. Nous avons entre nos mains depuis très peu de temps un premier échantillon issu des *Acuerdos del Cabildo*, allant de 1585 à 1610 inclus, bien documenté et sans lacune temporelle significative. Les années 1602 et 1605 peuvent y être qualifiées de très sèches, et cela sans que Quinn (1993), pourtant toujours très prompt à détecter un El Niño, ou qu'Ortlieb (1998) avancent l'existence d'une quelconque anomalie climatique de type Enso.

Si, entre 1525 et aujourd'hui, il y eut cent-vingt épisodes El Niño selon Quinn (1993), seuls trois d'entre eux depuis le XIX^e siècle correspondent à de grandes catastrophes sur l'actuel territoire bolivien : la grande sécheresse de 1803-1804 qui borne une époque coloniale prospère avant la lutte pour l'indépendance (1809-1825) ; celle de 1878-1879 qui constitue le cadre de la guerre du Pacifique perdue contre le Chili ; et celle de 1982-1983 en pleine crise politique et économique après la fin des dictatures (1964-1982).

La sécheresse de 1803-1804

À Potosí, en 1803 et 1804, le manque d'eau fut désastreux pour l'industrie minière car le concassage du minerai d'argent s'y faisait grâce aux roues hydrauliques installées sur le canal traversant la ville. S'y ajoutèrent une pénurie de main d'œuvre et l'arrêt, par les guerres de Napoléon, de l'approvisionnement en mercure, indispensable à la métallurgie argentifère (Tandeter, 1991). Ces phénomènes adverses déclenchèrent à Potosí une forte crise qui marqua la fin d'un cycle économique : le troisième boum de l'argent de 1750 à 1800 (Gioda et Serrano, 1998).

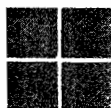
Mais, la sécheresse fut aussi extrêmement grave dans la région de Cochabamba où, d'après l'administrateur colonial Viedma, elle fut la plus forte de la période 1784-1808. Deux années consécutives sans précipitations, en 1803 et 1804, entraînaient la perte totale des récoltes, d'où une grave famine (Gioda et Dory, 1998). Dans les chaînes de la cordillère orientale et dans le piémont andin du côté du Chaco, qui correspondent à l'est des départements actuels de Chuquisaca (Sucre) et de Tarija, la sécheresse et les épidémies se conjuguèrent comme dans celui de La Paz (Tandeter, 1991).

La sécheresse de 1878-1879

Une grande partie du département de Potosí fut sinistrée en 1878-1879 (Chichas, Chayanta, Porco). Les habitants de la ville demandèrent du secours et de la farine aux Chiliens en octobre 1878, cinq mois avant la guerre qui allait les opposer à ces derniers (Platt, comm. pers.). Mais, la sécheresse fut particulièrement grave dans les départements de Sucre (Chuquisaca) et de Cochabamba où des jacqueries se déroulèrent à Arani en 1878 (Pentimalli et Rodríguez, 1988). Des magasins furent pillés dans la ville de Sucre et des centaines de corps de vagabonds jonchèrent les rues de Cochabamba. Diminuée par la faim, la population bolivienne fut la proie d'épidémies. Dans le département de Cochabamba, ce furent le typhus et le paludisme en 1878-1879 et, à Potosí, la « peste » en 1879 (Greishaber, 1980). Commencée en février 1879, la guerre du Pacifique – l'annexion par le Chili des côtes du Pérou et de la Bolivie – se déroula très vite de façon désastreuse pour les Boliviens. Dès 1880, la guerre était perdue, mais il n'y eut ni prise ni occupation durable des principales villes, à l'inverse de ce qui advint au Pérou. Néanmoins, la Bolivie vit se développer la rumeur de son total envahissement, d'où des mouvements de panique.

La sécheresse de 1982-1983

En 1982 et 1983, la sécheresse toucha très gravement les hautes terres et, tout particulièrement, la région méridionale de l'Altiplano, soit les départements de Potosí et d'Oruro. Le moment était critique en politique et en économie car il correspondait, à partir d'octobre 1982, à la transition entre la dictature du général García Meza et la démocratie (Gioda et Dory, 1997). Cette dictature (1980-1982) avait généré une vague sans précédent de corruption et désorganisé de manière durable les services de l'État. Le pays était isolé sur la scène internationale, avec peu de possibilités de mobiliser l'aide extérieure d'urgence. La sécheresse laissa 25 000 sans-abri et entraîna un abandon définitif des hautes terres par nombre de leurs habitants. Les dommages furent chiffrés à environ six cents millions de dollars américains de 1983.



LE PETIT ÂGE GLACIAIRE ET LES SÉCHERESSES

Le Petit Âge Glaciaire

En Europe, le Petit Âge Glaciaire (« Little Ice Age » en anglais) est caractérisé par l'avance des glaciers à la fin du xvi^e siècle et au xvii^e siècle. Le maximum de cette avance, la plus forte depuis l'âge post-glaciaire, se situerait dans les Alpes et en Islande au milieu du xviii^e siècle. Mais, dès l'an 1600, le maximum historique des glaciers de toutes les Alpes est atteint à la suite d'hivers froids et neigeux depuis 1550, qui se notent aussi à Riga sur la Baltique et au Japon. Un recul marqué des glaces en Europe ne se fait sentir que depuis 1890 environ (Le Roy Ladurie 1983).

Pour l'hémisphère sud dans son ensemble, 1500 est l'année couramment admise pour le début du Petit Âge Glaciaire (Bradley et Jones, 1995).

La ville de Potosí, la plus haute du monde de cette importance (160 000 habitants au début du xvii^e siècle et 130 000 aujourd'hui), constitue un observatoire privilégié pour l'étude des périodes froides à l'échelle séculaire.

Pour Le Roy Ladurie (1983), le Petit Âge Glaciaire se caractérise par une baisse des températures moyennes de l'ordre de 0,9 °C à l'échelle du globe et se situe entre 1560 et 1850, selon des sources historiques pour l'essentiel relatives à l'hémisphère nord (encadré ci-contre). Utilisant la glaciologie tropicale, Thompson et al. (1986) étendent un peu la période (1500 à 1900). Dans le cône sud de l'Amérique latine, Villalba (1994) situe le début du Petit Âge Glaciaire vers 1520, grâce à une dendrochronologie de plus de mille ans faite en Patagonie septentrionale. Malgré des techniques et des terrains d'étude différents, ces résultats sont largement convergents.

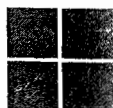
Par conséquent, toute la période coloniale de Potosí (1545-1825) est incluse dans le Petit Âge Glaciaire. Fixer la date de son début est impossible avec les sources narratives ; celles-ci se développent surtout à partir de 1560, mais la rigueur extrême du climat, soulignée par une petite avance glaciaire, se retrouve dans les récits des conquistadors du Pérou, dont celui de Pizarre dès l'année 1532 (Morlon, 1991, 1992), et dans les premières informations sur Potosí collectées par Martarelli (1890). Adopter la date de 1520 proposée par Villalba (1994) pour le commencement du Petit Âge Glaciaire sur notre terrain est donc correct.

Mais, surtout, il y a une bonne concomitance entre la longue période froide (1520-1660) détectée par Villalba – la plus rigoureuse des derniers mille ans – et les périodes sèches de Potosí (1560-1641) et du Nord-Ouest argentin (1580-1641). Les années 1560 et 1580 sont, respectivement pour ces deux régions, les premières à partir desquelles des informations des sources historiques sont aujourd'hui disponibles. Au Pérou voisin, l'an 1653, qui correspond à la fin du travail de l'historiographe Bernabé Cobo, fut choisi pour marquer la fin de cette période particulièrement froide du Petit Âge Glaciaire (Morlon, 1992). Cette date, issue de la méthode historique, est totalement compatible avec celle de 1641, choisie toujours grâce à des sources du même type pour le Nord-Ouest argentin par Prieto et al. (1999), et avec celle de 1660 qui provient, quant à elle, de la dendrochronologie d'une zone plus méridionale, la Patagonie (Villalba, 1994).

Prieto et al. (1999) suggèrent qu'une crise climatique du Petit Âge Glaciaire, centrée à la fin du xvii^e siècle, aurait pu multiplier les périodes de sécheresse. Cette hypothèse d'une bonne corrélation entre épisodes froids et épisodes secs aux latitudes tempérées a été notamment émise par Tricart (1982). Elle est corroborée par l'existence d'une séquence très froide (1780-1820) dans une grande période sèche (1720-1860) détectée dans les glaces du Quelccaya au sud du Pérou (Thompson et al., 1986). Cette courte séquence de 1780-1820 correspond bien au schéma de Tricart appliqué à l'échelle planétaire : froid extrême dans les hémisphères nord et sud aux latitudes tempérées, avance des glaciers de Patagonie méridionale et du Pérou et sécheresse généralisée dans les Andes.

Le début de la grande période sèche des Andes centrales de 1720-1860, particulièrement marquée à Potosí lors des quatre premières décennies du xviii^e siècle (figure 3), se note aussi plus au sud avec un léger décalage. À 41° S dans les Andes de la Patagonie septentrionale, c'est entre 1720 et 1790 que le climat du Petit Âge Glaciaire fut le moins rigoureux, avec en particulier des étés austraux plus chauds entre 1720 et 1760 (Villalba, 1994), ce qui n'est possible qu'avec une pluviométrie faible, car cette saison est normalement celle des pluies et des fortes couvertures nuageuses.

Enfin, l'explication des conséquences des épisodes El Niño devient plus simple en Amérique latine à partir de 1814 et surtout à partir du dernier quart du xix^e siècle, qui correspond à l'effacement progressif du Petit Âge Glaciaire (Ortlieb, 1999). À Potosí, cet effacement peut se placer vers 1835, après la fin de l'ultime grande pulsation froide qui se situe vers 1810-1820, selon la chronique détaillée des climats anciens depuis le xvii^e siècle de Martarelli (1890) et les données d'archives du xix^e siècle (Platt, comm. pers.).

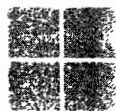


CONCLUSION

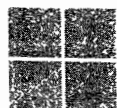
À Potosí, dans l'actuelle Bolivie, à partir de la date d'existence des premières sources historiques, c'est-à-dire la seconde moitié du XVI^e siècle, et jusqu'au début du XIX^e siècle, on constate une détérioration climatique générale caractérisée par une fréquence accrue des sécheresses. Cette longue période correspond pleinement au Petit Âge Glaciaire. Durant toute cette époque, il est impossible de percevoir à Potosí une relation stable entre, d'une part, la quantité de précipitations annuelles et, d'autre part, la présence et l'intensité du phénomène El Niño dans l'état actuel des recherches. Toutefois, quand il se produit une forte sécheresse sur l'Altiplano et dans les vallées interandines, la présence d'un épisode El Niño, pas nécessairement très accentué, est probable au large des côtes péruviennes et chiliennes. L'étude de trois grandes sécheresses récentes (1803-1804, 1878-1879 et 1982-1983) montre l'importance de l'effet cumulatif pour aboutir aux désastres : au déficit pluviométrique lié à El Niño, se conjuguèrent des conditions socio-économiques critiques et, dans les deux derniers cas, des problèmes politiques. Les grandes périodes sèches de 1560-1641 et de 1780-1820 sont associées à des pulsations particulièrement froides du Petit Âge Glaciaire, dont la rigueur à 4 000 mètres d'altitude à Potosí est attestée par les chroniques historiques, tout comme son effacement à partir de 1835.

BIBLIOGRAPHIE

- Aceituno P., 1993 : El Niño, l'Oscillation australe et Enso ; des noms qui prêtent à confusion pour une interaction complexe entre l'océan et l'atmosphère. *La Météorologie* 8^e série, 3, 44-48.
- Arzáns B., 1705-1737 (1965) : *Historia de la Villa Imperial de Potosí*. Brown University, Providence, États-Unis, 407 + 501 + 556 p.
- Baker M., 1996 : Report on the status of the Archival Climate History Survey (Archiss) project. WMO, TD n° 776, Genève, Suisse, 9 p. + 4 annexes.
- Baker M., 1998 : Relevamiento de archivos de la historia del clima – Proyecto Archiss. PHI Waterway, 13, 12-16.
- Bradley R. S. et P. D. Jones (sous la direction de), 1995 : *Climate since 1500 A.D.* Routledge, Londres, Royaume-Uni, 706 p.
- Cañete P. V., 1787 (1952) : *Guía geográfica, física, civil y legal del gobierno e intendencia de la provincia de Potosí*. Ed. Potosí., Potosí, Bolivie, 838 p.
- Duckstein L., 1998 : Use of fuzzy logic to encode archival climate research uncertainty. Unesco, IHP-V, TD n° 17, Paris, 47 p. + 4 annexes.
- Dunbar R. B., G. M. Wellington, M. W. Colgan et P. W. Glynn, 1994 : Eastern Pacific sea surface temperature since 1600 A.D. ; the ¹⁸O record of climate variability in Galapagos corals. *Paleoceanography*, 9, 291-315.
- Ercole R. (d') et O. Dollfus, 1995 : La mémoire des catastrophes. *La Recherche*, 26, 932-935.
- Francou B. et L. Pizarro, 1985 : El Niño y la sequía en los altos Andes centrales: Perú y Bolivia. *Bull. Inst. fr. études andines*, 16, 1-18.
- Gioda A. et D. Dory, 1997 : ¿Qué se sabe de El Niño en Bolivia? In : Facetas. Los Tiempos, Cochabamba et El Correo del Sur, Sucre, 2 novembre, 4-5.
- Gioda A. et M. R. Prieto, 1997 : Para una historia del clima y del ambiente en los Andes centrales. In : Anuario 1997. Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia, Sucre, 403-422
- Gioda A. et D. Dory, 1998 : El Niño, Bartolomé Arzáns y Francisco de Viedma. In : Facetas. Los Tiempos, Cochabamba et El Correo del Sur, Sucre, 8 marzo, 8-9.
- Gioda A. et C. Serrano, 1998 : L'eau et l'argent à Potosí (ancien Haut-Pérou puis Bolivie). *La Houille Blanche*, 7, 65-75.
- Gioda A. et C. Serrano, 1999 : L'argent de l'ancien Pérou. *Pour la Science*, 259, 42-47.
- González Loyarte M. M., 1995 : La diagonale aride argentine, une réalité écologique oscillante. *Sécheresse*, 6, 35-44.
- Greishaber E. P., 1980 : Survival of Indian communities in the nineteenth-century Bolivia; a regional comparison. *J. L. Amer. Stud.*, 12, 223-269.
- Hocquenghem A.-M. et L. Ortlieb, 1990 : Pizarre n'est pas arrivé au Pérou durant une année El Niño. *Bull. Inst. fr. études andines*, 19, 327-334.
- Lamb H. H., 1977 : *Climate history and the future*. Methuen, London, 835 p.



- Le Roy Ladurie E., 1983 : *Histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion, Paris, 287 + 254 p.
- López Bertran C., 1993 : *Biografía de Bolivia*. Juventud, La Paz, Bolivie, 166 p.
- Martarelli A., 1890 : *El colegio franciscano de Potosí y sus misiones*. Tipografía Italiana, Potosí, 329 p.
- Morlon P., 1991 : Variations climatiques et agriculture sur l'Altiplano du Lac Titicaca (Pérou-Bolivie) ; une approche préliminaire. *La Météorologie* 7^e série, 39, 10-29.
- Morlon P., 1992 : De las relaciones entre clima de altura y agricultura de la sierra del Perú en los textos de los siglos XVI y XVII. *Bull. Inst. fr. études andines*, 21, 929-959.
- Ortlieb L., 1995 : Eventos El Niño y episodios lluviosos en el desierto de Atacama: el registro de los últimos dos siglos. *Bull. Inst. fr. études andines*, 24, 519-539.
- Ortlieb L., 1998 : Historical reconstructions of Enso events from documentary sources from Chile, Peru, Brasil, and Mexico. Pole-Equator-Pole paleoclimate of the Americas, Science meeting, Merida, March 1998, Abstr. vol., 6 p.
- Ortlieb L., 1999 : The documentary historical record of El Niño events in Peru: an update of the Quinn record (XVI-XIX centuries). In : *El Niño and the Southern Oscillation*. Díaz H. et V. Markgraf (sous la direction de), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, sous presse.
- Pentimalli M. et G. Rodríguez, 1988 : La razones de la multitud (hambruna, motines y subsistencia: 1878-1879). *Estado y Sociedad*, 4, 15-33.
- Prieto M. R., 1994 : Reconstrucción del clima de América del Sur mediante fuentes históricas. *Revista del Museo Natural de San Rafael*, 12, 323-342.
- Prieto M. R. et R. G. Herrera, 1992 : Las perturbaciones climáticas de fines del siglo XVIII en la área andina. In : Proyecto NOA (NorOeste Argentino). Junta de Andalucía, Sevilla, Espagne, 1, 7-35.
- Prieto M. R., R. Herrera et P. Dussel, 1995 : Las variaciones climáticas del siglo XVIII en los Andes tropicales del Sur, con especial referencia al ciclo seco de 1780-1810. Actas del Sem. Inter. « Aguas, Glaciares y Cambios Climáticos en los Andes Tropicales ». Orstom-Umsa-Senamhi-Conaphi, La Paz, Bolivie, 271-272.
- Prieto M. R., R. Herrera et P. Dussel, 1999 : Clima y disponibilidad hídrica en el Sur de Bolivia y Noroeste Argentino entre 1560 y 1710. Actas del 3^o Simp. Sudamer. Paleocología, desarrollo del paisaje y del clima de la diagonal árida sudamericana en el Cuaternario Superior, Bamberg, sous presse.
- Quinn W. H., 1993 : The large-scale Enso events, the El Niño, and other important regional features. *Bull. Inst. fr. études andines*, 22, 13-34.
- Quinn W. H., V. T. Neal et S. E. Antunez de Mayolo, 1987 . El Niño occurrences over the past four and a half centuries. *J. Geophys Res.*, 92 (C13), 14449-14461.
- Ronchail J., 1995 : L'aridité sur l'Altiplano bolivien. *Sécheresse*, 6, 45-51.
- Ronchail J., 1999 : Variabilité pluviométrique lors des phases extrêmes de l'Oscillation australe du Pacifique en Bolivie (1950-1993). *Bull. Inst. fr. études andines*, 27, sous presse.
- Ronchail J. et A. Gioda, 1999 : San Calixto de La Paz: las lluvias y las fases de la Oscilación Austral durante cerca de un siglo. Actas Sem. « El Niño en Bolivia », SENAMHI, 3-5 Junio 1998, La Paz, sous presse.
- Tandeter E., 1991 : La crisis de 1800-1805 en el Alto Perú. *Data*, 1, 9-49.
- Tandeter E. et N. Wachtel, 1983 : Precios y producción agraria. Potosí y Charcas en el siglo XVIII. CERES, Buenos Aires, Argentine, 91 p.
- Thompson L. G., E. Mosley-Thompson, W. Dansgaard et P. M. Grootes, 1986 : The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap. *Science*, 234, 361-364.
- Thompson L. G., M. E. Davis, L. G. Mosley-Thompson, T. A. Sowers, K. A. Henderson, V. S. Zagorodnov, P.-N. Lin, V. N. Mikhalenko, R. K. Campen, J. F. Bolzan, J. Cole-Dai et B. Francou, 1998 : A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores. *Science*, 282, 1858-1864.
- Tricart J., 1982 : El Pantanal: un ejemplo de impacto de la geomorfología sobre el medio ambiente. *Rev. Geográfica*, 7, 13-14.
- Villalba R., 1994 : Tree-rings and glacial evidence for the Medieval Warm Epoch and the Little Ice Age in Southern South America. *Clim. Change*, 26, 183-197.



12. L'argent de l'ancien Pérou - 1999 (*avec Carlos Serrano*)

L'argent de l'ancien Pérou

ALAIN GIODA - CARLOS SERRANO

*Entre 1590 et 1600, Potosi produisit plus de 40 pour cent de l'argent mondial !
Un réseau de réservoirs et d'adduction d'eau, construit par les Espagnols,
fournissait l'énergie hydraulique nécessaire au traitement du minerai d'argent.*

Le Pérou a été l'eldorado, le pays de légende que cherchaient les conquistadors : les colonisateurs y faisaient fortune en quelques semaines. Au début de l'exploitation du gisement de Potosi, en 1545, les filons d'argent pur affleuraient au sommet du Cerro Rico, la montagne d'argent, et les nobles espagnols n'avaient qu'à se baisser pour s'enrichir. Bien évidemment, ils laissaient aux Indiens le soin de collecter et de transporter le minerai.

En moins de 30 ans, le petit chantier andin de Potosi se transforme en une ville-champignon de 120 000 habitants ; la population culmine à 160 000 personnes entre 1611 et 1650. C'est alors la plus grande cité des Amériques, qui rivalise en taille et en opulence avec les capitales européennes. La production d'argent atteint 200 tonnes pendant la seule année 1593 ; la monnaie d'argent espagnole, frappée sur place, est, pendant deux siècles, l'équivalent du dollar américain actuel pour les transactions commerciales de l'Occident.

Aujourd'hui Potosi compte environ 130 000 habitants. Bâtie à 3 980 mètres d'altitude sur les flancs du Cerro Rico (4 890 mètres), le climat y est froid et aride avec 142 jours de gel, une température moyenne de 9 °C et 400 millimètres de pluie seulement par an. Cet héritage de la colonisation espagnole est classé patrimoine de l'humanité par l'Unesco.

En étudiant les archives des colons espagnols et des administrateurs locaux, nous avons reconstitué la grandeur et la décadence des mines de Potosi, à travers les adaptations de l'extraction aux aléas climatiques et économiques,

à la raréfaction du minerai et aux changements d'organisation sociale.

De 1573 à 1650, trois facteurs assurent l'âge d'or, ou plutôt l'âge d'argent, de Potosi : l'utilisation d'un procédé de traitement de l'argent, mis au point en 1555 au Mexique, le régime de travaux forcés imposés aux Indiens (et qui ne fut aboli qu'en 1812), et une énergie hydraulique abondante utilisée jusqu'en 1872, date de l'arrivée de l'électricité et de la vapeur qui alimenteront les usines.

Épuisement du minerai et construction des barrages

Pendant les onze années glorieuses qui suivent la découverte des mines, le minerai d'argent est extrait à ciel ouvert des filons d'argent natif, cinq veines de 10 à 12 mètres d'épaisseur, qui affleurent au sommet de la montagne. Lorsque, en 1556, les filons du sommet s'épuisent, l'exploitation par galeries souterraines commence. Jusque vers 1650, les galeries seront creusées sur 600 mètres de profondeur, sans l'aide d'explosifs. À la fin du XIX^e siècle, plus de 300 entrées de mines sont connues.

Vers 1566, à la fin du premier boum minier, la production commence à baisser. Le vice-roi Francisco Toledo, administrateur des Indes espagnoles de 1569 à 1581, se rend à Potosi en 1572. Il y réunit un groupe de mineurs pour présenter une nouvelle méthode d'extraction de l'argent dans les filons moins riches, méthode qui nécessitait la construction de machines hydrauliques. Quatre entrepreneurs proposent alors de construire, à leurs

frais, une retenue d'eau pour récupérer l'eau de pluie et la stocker (la saison des précipitations ne dure que trois mois, de décembre à février).

Le projet est de tirer parti de la topographie de la région et de réunir tous les lacs naturels en un vaste réseau pour alimenter les usines de traitement du minerai. La construction des barrages commence en 1573 avec celui du lac Chalviri. Cinquante ans plus tard, une vingtaine de lacs aménagés recueillent un volume total de six millions de mètres cubes d'eau. Réparties sur six bassins versants qui couvrent 65 kilomètres carrés, les retenues sont interconnectées pour collecter la totalité des eaux dans un exutoire naturel d'environ 20 kilomètres carrés qui recueille l'écoulement intermittent des vallons de San Ildefonso et de San Sebastian. L'alimentation régulière en énergie hydraulique assure l'apogée des mines coloniales de Potosi, entre 1573 et 1650 : c'est le deuxième boum minier.

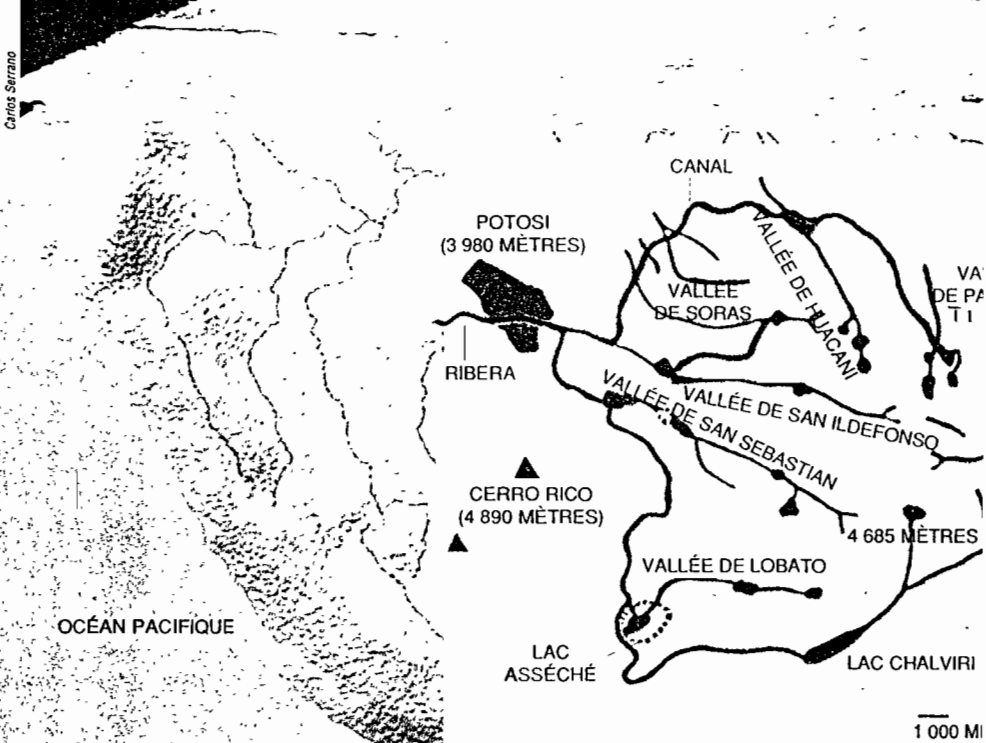
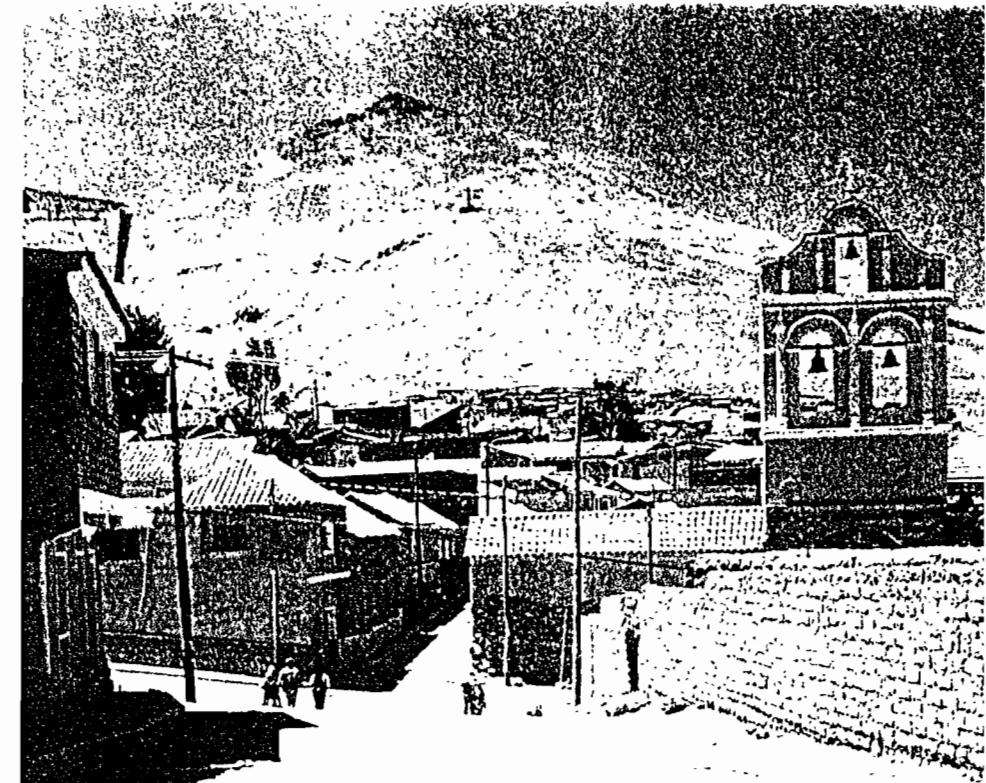
À cette époque, les ingénieurs espagnols tirent profit de deux types de lacs naturels : les lacs glaciaires et les retenues d'eau bloquées par une accumulation de moraines. Quand l'écoulement de l'eau est bloqué par un verrou glaciaire, les Espagnols libèrent l'eau du lac naturel en perçant un tunnel dans la barre rocheuse qui ferme la vallée. Les digues naturelles constituées de moraines, plus ou moins étagées selon le degré d'érosion, sont renforcées. Les Espagnols construisent ainsi de grands barrages sur les lacs Huacani et Chalviri, puis, vers 1576, d'autres retenues proches de Potosi, telles celles de San Sebastian et de San Ildefonso. Les grands

travaux d'aménagement des barrages sont achevés en 1621.

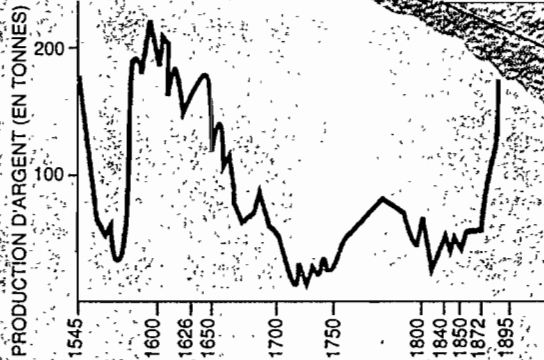
Pendant cette période, la production d'argent augmente proportionnellement au débit d'eau utilisable, jusqu'à ce que l'appauvrissement du minerai diminue fortement la rentabilité et impose la construction de nouveaux réservoirs pour traiter de plus grandes quantités de minerai. Hélas, en dépit des efforts des ingénieurs, la production d'argent sous la colonie ne retrouvera jamais son activité du début du XVII^e siècle.

Avant la construction des réservoirs, les usines sont installées à une dizaine de kilomètres de Potosi, sur la rivière Cayara. Pour éviter de trop longs transports de minerai, les Espagnols construisent des barrages plus près de la ville et creusent le canal collecteur de la Ribera de la Vera Cruz, qui traverse Potosi en suivant le lit d'un cours d'eau intermittent. Les travaux du canal de la Ribera, commencés en décembre 1574, mobilisent 200 officiers espagnols et 4 000 manœuvres indiens. La Ribera est inaugurée en mars 1577, six mois après l'achèvement des premiers réservoirs. Son débit moyen est de l'ordre de 160, voire 250 litres par seconde.

Les barrages, d'environ 200 mètres de longueur et de huit mètres d'épaisseur, sont construits dans des défilés proches de la ville, où les eaux se rassemblent. Les grands lacs de barrage mesurent plus de un kilomètre de circonférence et sont profonds de près de cinq mètres en leur centre. Sous la colonie, la quasi-totalité des eaux des barrages se jettent dans le lac San Sebastian par un système de petits canaux et de cascades. Puis l'eau atteint la Ribera où sont déployées la plupart des usines (sur une quinzaine de kilomètres le long des rives). Au début du XVII^e siècle, l'eau du



1. LES FILONS D'ARGENT MASSIF affleuraient au sommet (4 890 mètres) de la montagne d'argent, le Cerro Rico (à l'arrière-plan, sur la photographie du haut). Pour traiter des quantités plus importantes d'un minerai qui s'appauvrisait, les colons espagnols ont conçu un système de réservoirs (en bleu dans le cartouche clair) collectant les eaux venant de la montagne, lesquelles se rassemblaient dans la Ribera. Ce canal traversait la ville de Potosi ; les usines de traitement du minerai, alimentées par l'énergie hydraulique, étaient alignées le long du canal. Cinq périodes de forte production ont marqué l'exploitation des mines d'argent de Potosi : juste après la découverte des mines en 1545, entre 1573 et 1650, entre 1750 et 1800, entre 1840 et 1850 (plutôt une reprise d'activité qu'un véritable boom), entre 1872 et 1895. La production annuelle d'argent a dépassé 200 tonnes vers 1600.



POTOSI

lac San Ildefonso et de quelques sources alimente les 286 fontaines de la ville.

Quand les pluies sont abondantes au cours de la saison humide, les réserves en eau suffisent à l'alimentation des usines de purification du métal pendant six ou sept mois. Nous tenons ces informations de Luis Capoché, un Espagnol natif de Séville et propriétaire de deux usines hydrauliques. En 1583, dans un texte dédié au vice-roi des Indes Torrès y Portugal, il décrit les difficultés de l'exploitation de l'argent et l'installation d'une cinquantaine d'usines hydrauliques le long de la Ribera. Les machines qui concassaient les blocs de minerai sont mues par l'énergie des hommes et des chevaux, progressivement remplacée par l'énergie hydraulique. Les machines hydrauliques s'imposent à la fin du XVI^e siècle. En 1633, 81 concasseurs hydrauliques d'une puissance totale de 350 kilowatts fonctionnent sur la Ribera.

Le début de la décadence

Natif de Potosi, Bartolomé Arzáns (1676-1736) était maître d'école. Dès 1705, il retrace l'activité de la ville depuis sa création, en 1545. Cette chronique sera poursuivie par son fils jusqu'en 1737. Arzáns est marqué par la rupture du barrage de San Ildefonso, le 15 mars 1626, où plus de 2 000 habitants de Potosi trouvent la mort (voir l'encadré de la page 46) ; selon le pieux Arzáns, Dieu a puni l'impiété des riches habitants de Potosi.

Même si la rupture a marqué son histoire, la ville se remettra vite de cet épisode (quelques années après la catastrophe, il y a plus d'usines sur la Ribera qu'en 1626). D'autres calamités, telles rigueurs climatiques et épidémies, frappent la ville. Au cours de la seconde moitié du XVII^e siècle et de la plus grande partie du XVIII^e siècle, la population de Potosi diminue inexorablement. Environ 160 000 vers 1610, les habitants ne seront plus que 70 000 vers 1700, puis 40 000 après l'épidémie (vraisemblablement de peste) de 1719, qui tue le tiers des citadins, et 24 000 en 1778.

La baisse de l'activité minière et la chute de la population de Potosi à partir de 1650 résultent surtout de la fin de l'approvisionnement régulier en mercure bon marché en provenance du Pérou, car le procédé d'extraction par amalgame nécessite des quantités notables de ce métal (voir l'encadré

ci-dessous). Dès le milieu du XVII^e siècle, le Mexique devient le plus grand producteur d'argent des Indes espagnoles, supplantant définitivement Potosi.

Le Petit Âge glaciaire, une période anormalement froide, commence vers 1500 et perdure jusque vers 1850, presque toute la période coloniale espagnole à Potosi (1545-1825). La période 1560-1641 est plutôt sèche. Dans la région de Potosi, la vie est d'une grande dureté et la sécheresse accompagne la dépression économique. Entre 1705 et 1742, deux années sur trois sont marquées par une sécheresse dévastatrice.

Pedro Vicente Cañete, administrateur assistant du gouverneur de Potosi pendant une trentaine d'années, consigne l'histoire de la région dans

un ouvrage achevé dans les années 1780. Il retrace les réformes du despote éclairé Charles III : pendant son règne (1759-1788), les Bourbons tentent un ultime effort pour restaurer les colonies espagnoles et relancer l'exploitation des mines d'argent.

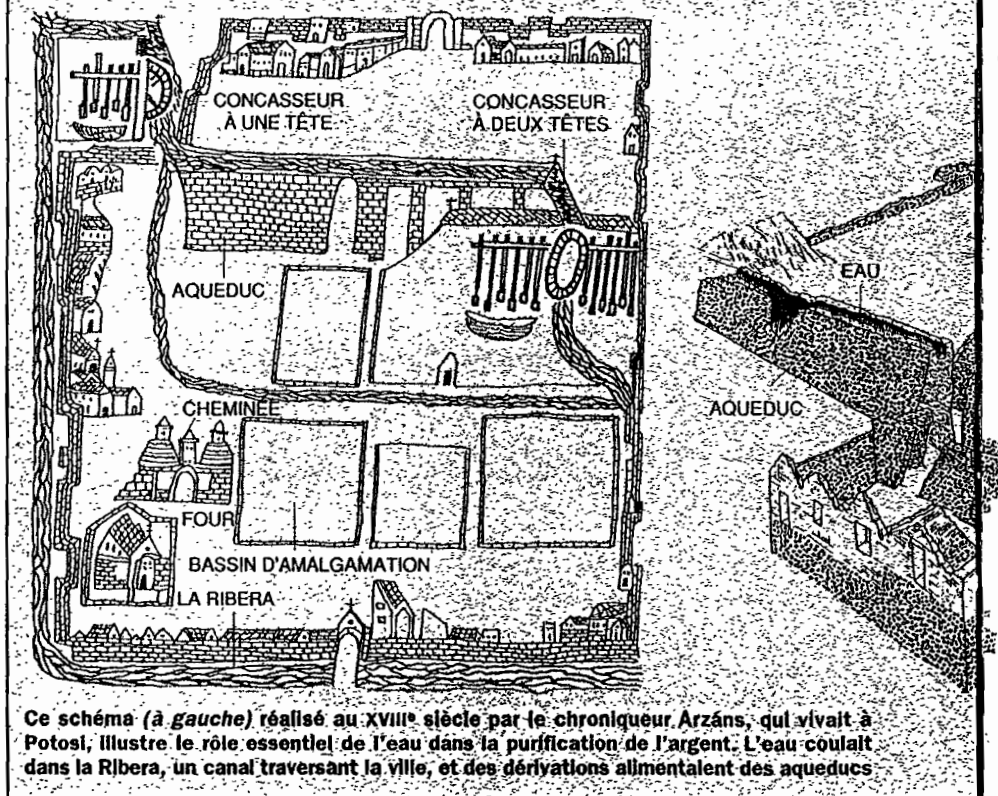
Le nombre des concasseurs installés sur la Ribera et dans la région de Potosi sur d'autres cours d'eau varie selon le degré d'exploitation des mines et la concentration des filons en argent. Dans toute la région de Potosi, on dénombre 96 concasseurs en 1601 et 140 en 1610. Sur la seule Ribera, on passe de cinq concasseurs en 1576, à 49 en 1583 et à 81 en 1633. Ensuite, les têtes ne sont plus que 34 en 1693, année caractéristique de la grande crise qui

Le procédé de purification de l'argent

Au temps de la colonie, le minerai d'argent est transporté de la mine jusqu'à la cour de l'usine, ou patio, dans des sacoches, à dos de lama, d'âne, de mulet et de cheval. Le lama est l'animal le plus utilisé, des dizaines de milliers de bêtes étant réquisitionnées par l'administration espagnole. Le minerai est sous forme de petits blocs d'une dizaine de centimètres de diamètre, il est déposé dans un coin de la cour et sèche pendant quelques jours. Les concasseurs utilisés à Potosi ressemblent à ceux inventés au début

du XVI^e siècle dans les usines de la Saxe, en Allemagne (où l'on extrayait également l'argent) : ils sont équipés de quatre à six pilons chaussés, à leur extrémité, d'une masse de fer ou de bronze.

Grâce à une série d'engrenages, ces marteaux-pilons se soulèvent les uns après les autres d'une vingtaine de centimètres avant de retomber sur le minerai. L'axe auquel sont reliés les pilons est entraîné par une roue hydraulique, de diamètre compris entre quatre et huit mètres. Les roulements et les arbres



Ce schéma (à gauche) réalisé au XVII^e siècle par le chroniqueur Arzáns, qui vivait à Potosi, illustre le rôle essentiel de l'eau dans la purification de l'argent. L'eau coulait dans la Ribera, un canal traversant la ville, et des dériviations alimentaient des aqueducs

dura de 1650 à 1750, et atteignent 79 en 1788, lors d'une phase de croissance de la métallurgie de l'argent, le troisième boum minier.

La mita

Les Indiens payèrent un lourd tribut à l'exploitation de l'argent à Potosi. En 1573, au début des grands travaux, quelque 20 000 Indiens, dont certains étaient contraints aux travaux forcés, la *mita*, auraient été mobilisés pour la construction du premier barrage, sur le lac Chalviri. On faisait venir à Potosi des travailleurs qui habitaient à plus de 600 kilomètres de là. Ces travaux forcés frappaient tous les hommes de 18 à 50 ans des communautés indigènes,

du lac Titicaca, au Nord (le Pérou actuel) jusqu'à la région de Tarija (à la frontière actuelle avec l'Argentine), au Sud.

Vers 1750, la population andine, éprouvée par les épidémies et les conditions de travail, particulièrement dures dans les mines et dans les usines, n'était plus que le quart de celle de 1533, date de l'arrivée des Espagnols (les concasseurs dégageaient une épaisse poussière, et les ouvriers manipulaient sans précaution le mercure toxique). Fuyant la *mita* dans la région voisine de Cochabamba, les métis, les petits commerçants et toutes les catégories exemptées des travaux forcés se multiplièrent. Des travailleurs libres étaient également employés dans les mines.

En 1780, les Indiens soumis aux travaux forcés n'étaient plus que 2 880, contre 13 340 appelés en 1573 et 10 460 en 1617. En 1750, le roi d'Espagne reconnaît l'ampleur des pertes humaines depuis le début de la *mita*, en confirmant qu'une vingtaine d'Indiens soumis aux travaux forcés travaillent comme ouvriers et manœuvres dans chaque usine d'argent, contre une quarantaine au début de l'exploitation hydraulique.

Selon certains historiens, c'est uniquement grâce à l'exploitation accrue de cette main-d'œuvre gratuite qu'aurait eu lieu le troisième boum minier, entre 1780 et 1800 (la *mita* ne sera abolie qu'en 1812). Toutefois, la reprise de l'activité à Potosi est fragile, à la fin du XVIII^e siècle. Certes, l'Espagne envoie des administrateurs, des experts internationaux et des missions scientifiques pour réactiver et moderniser les mines, mais les résistances sont fortes. La technique des barils, qui aurait accéléré la formation de l'amalgame, est rejetée par les entrepreneurs, qui ne veulent pas investir dans de nouvelles installations. Dans la technique des barils, au lieu de laisser l'argent s'amalgame au mercure dans des bassins, le minerai et les réactifs chimiques sont placés dans des barils qui tournent ; cette agitation augmente la vitesse de réaction, qui est achevée en 24 heures tandis qu'il faut une quinzaine de jours avec le procédé des bassins. De surcroît, à la fin du XVIII^e siècle, la main-d'œuvre est insuffisante, le mercure manque et l'approvisionnement en énergie hydraulique est déficitaire, à cause d'une sécheresse générale dans les Andes, entre 1780 et 1810.

Le début du XIX^e siècle est marqué par deux crises de production de l'argent. Entre 1800 et 1805, la Ribera tarit souvent, et l'importation du mercure extrait des mines espagnoles est interrompue par les guerres napoléoniennes de sorte que le minerai ne peut plus être traité ; ensuite, la lutte pour l'indépendance des États Sud-américains désorganise les circuits de production. La population de Potosi atteint son minimum historique durant cette période troublée. En 1807, seules 13 700 personnes vivent dans la cité. Lors de la visite du libérateur Simón Bolívar en octobre 1825, Potosi n'est plus qu'une ville-fantôme de 8 000 habitants, soit moins du dixième de la population du début du XVII^e siècle. La plupart des habitants ont fui le site à cause de la longue guerre d'indépendance de la Bolivie qui dure 16 ans

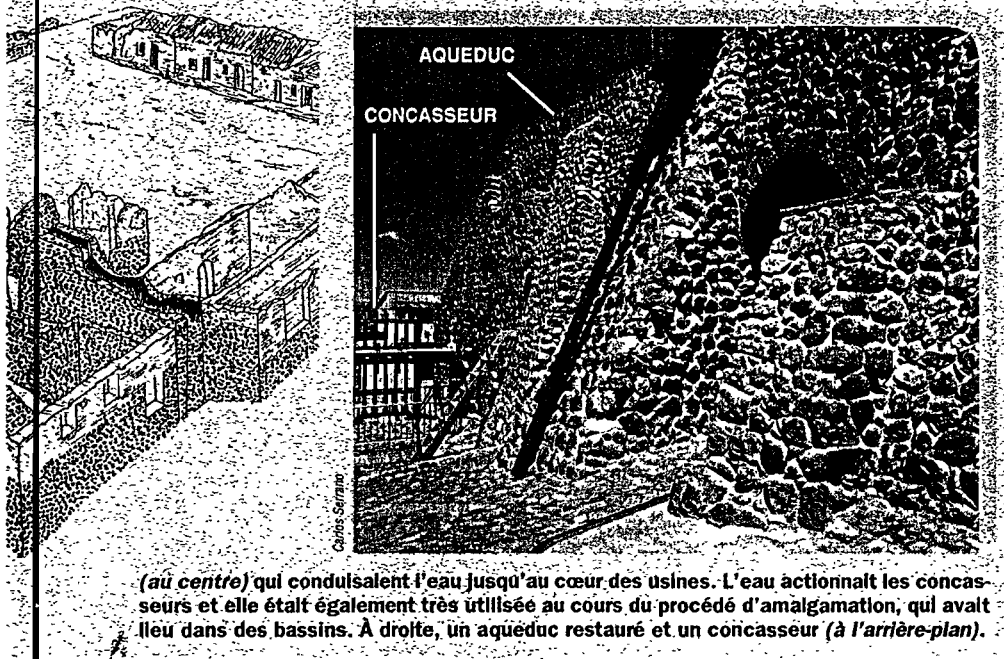
à cames sont en bois et en cuir, puis en fer, et abondamment lubrifiés par de la graisse de lama. Le minerai est broyé en grains de quelques millimètres, et chaque marteau-pilon de concasseur traite 20 tonnes par mois.

Une meule circulaire en pierre, actionnée et refroidie à l'eau, réduit ensuite le minerai en une poudre fine. L'ensemble des deux phases de pulvérisation mécanique — concassage et mouture — est nommé trituration. Le matériel est ensuite passé au crible et classé selon sa granulométrie. Le matériel le plus fin est transporté au centre du patio et placé dans des bassins carrés de deux mètres sur trois environ, contenant entre 20 et 100 caissons placés côte à côte.

L'amalgamation a lieu dans ces caissons. A la poudre de minerai, on ajoute les uns après les autres différents réactifs (notam-

ment du sulfate de cuivre, de l'étain ou du plomb, du chlorure de sodium, de la chaux) et du mercure, dont le rôle est essentiel dans le procédé. Pendant une quinzaine de jours, le mélange reste à réagir dans les caissons, qui sont alors rincés à l'eau. La gangue, plus légère, se déverse dans un canal d'évacuation, tandis que l'amalgame d'argent et de mercure reste au fond des bassins. On le recueille à la pelle. Après égouttage, l'amalgame est pressé dans des moules, puis mis au four et porté à près de 1 000 °C, où le mercure se vaporise. Dans chaque moule, on recueille de l'argent pur à 95 pour cent.

Dans cette chaîne de production, l'eau intervient à toutes les étapes. Pour chaque usine, l'eau de la Ribera est déviée vers un petit aqueduc qui déverse l'eau sur la roue hydraulique et alimente l'usine.



(au centre) qui conduisaient l'eau jusqu'au cœur des usines. L'eau actionnait les concasseurs et elle était également très utilisée au cours du procédé d'amalgamation, qui avait lieu dans des bassins. À droite, un aqueduc restauré et un concasseur (à l'arrière-plan).

La rupture du barrage de San Ildefonso, en 1626

Le barrage de San Ildefonso, achevé en 1576, est l'un des premiers ouvrages réalisés par les colonisateurs. Il est constitué de dépôts morainiques remaniés par l'homme, qui n'ont pas été suffisamment consolidés. Les barrages espagnols sont construits sans déversoir, et le niveau des lacs doit être étroitement surveillé. En cas de trop-plein, des vannes sont ouvertes, et si cela ne suffit pas, les ouvriers pratiquent à la hâte un passage pour les eaux lors de leur montée.

Le dimanche 15 mars 1626, vers 13 heures, après une saison de pluies abondantes, le lac San Ildefonso (à 4 410 mètres d'altitude) est plein. Hélas, l'incurie d'un haut fonctionnaire de la couronne amène la catastrophe. Malgré les avertissements du technicien chargé de la maintenance des lacs, l'incompétent gouverneur de la ville ne se préoccupe pas de la montée des eaux et ne fait pas ouvrir les vannes à temps. Le vent amorce le déversement, une vague déborde et une brèche s'ouvre dans la digue : toute l'eau s'y engouffre. Le barrage se rompt, et le contenu de la réserve d'eau se déverse sur Potosi. Selon certains témoins, sur 122 usines installées à Potosi et à Tarapaya, moins de la moitié résistèrent aux

flots. La moitié de la ville, quelque deux kilomètres en aval du barrage, est sous l'eau, 360 maisons d'Espagnols et 800 maisons d'indigènes sont détruites. Deux facteurs expliquent l'ampleur de la catastrophe : la fragilité des constructions et la surpopulation le long de la Ribera. Les auteurs contemporains ont décrit l'exiguïté et la précarité des maisons, qui s'effondraient par fortes pluies ou averses de grêle. De plus, à l'heure de la catastrophe, tous les habitants sont chez eux. Les roues hydrauliques de trois tonnes, entraînées par le flot, écrasent les fragiles demeures.

La catastrophe, une des plus meurtrières dans l'histoire des barrages, fit plus de 2 000 victimes immédiates. À cela s'ajouta une forte contamination chimique en mercure, en chaux vive, en sulfate de cuivre, qui se déversèrent dans la Ribera.

Après le désastre, les Espagnols reconstruisent et consolident les barrages de San Ildefonso et de San Sebastian. Le barrage de San Ildefonso a été restauré une dernière fois, en 1935-1936 ; il mesure aujourd'hui 500 mètres de longueur et, au point le plus haut, la digue enserrant l'ouvrage atteint une hauteur de huit mètres... La digue de 1626 était sans doute moins haute.

(de 1809 à 1825) et ruine l'activité minière. Potosi est tour à tour pillée, perdue ou reprise par les indépendantistes venus d'Argentine et par les royalistes espagnols.

La vapeur est salvatrice, mais le *Gold standard*...

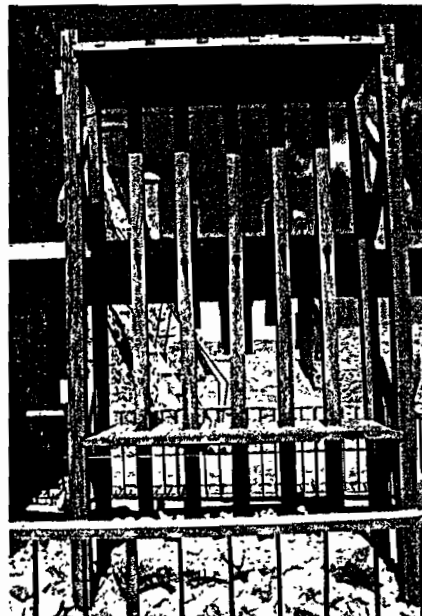
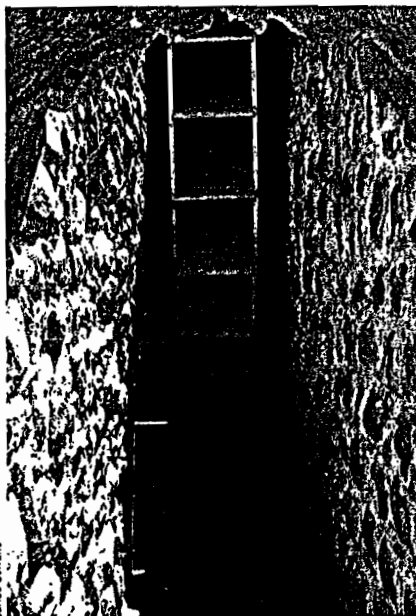
En 1825, année de l'indépendance, le Haut-Pérou prend le nom de Bolivie, et c'est le début de la période républicaine de l'exploitation de l'argent. Vers 1840,

la production s'améliore, et c'est le quatrième boum minier de l'histoire de Potosi. Le maximum de la production n'atteint cependant pas la moitié de celle du boum des années 1750-1800. L'arrivée de la vapeur et de l'électricité en 1872 correspond au cinquième boum. La force hydraulique n'est plus l'unique moteur de l'exploitation. Pourtant, le système hydraulique colonial est entretenu pour alimenter en eau la population de la fin du XIX^e siècle. Il subsiste encore quelques petits ateliers sur la

Ribera, où le minerai de contrebande et de faible teneur est concassé, mais l'outillage est obsolète. En 1892, il ne reste que 65 ateliers.

En 1891, tournant pour l'économie bolivienne : les États-Unis adoptent le *Gold Standard*, qui sonne le glas de l'argent dans le système monétaire international. La démonétisation de l'argent marque la fin de la principale demande. Les mineurs et les entrepreneurs boliviens décident alors d'exploiter l'étain, lui-même extrait du Cerro Rico et dont la demande croît jusqu'à la crise mondiale déclenchée par le krach boursier d'octobre 1929. La production record de la même année est 47 100 tonnes. Néanmoins, la demande d'étain se maintient pendant et après la crise économique des années 1930, car le métal est indispensable à la production de bronze. Qui plus est, l'étain sert alors beaucoup à la fabrication des boîtes de conserve. Le prix de l'étain ne s'effondre définitivement qu'en 1985, avec la mise en place de l'industrie du recyclage des métaux dans l'économie occidentale : l'étain recyclé, les revenus liés au métal échappent aux Boliviens.

En 1935-1936, William Rudolph, un ingénieur Nord-américain, restaure, avec 800 ouvriers, le système de barrages en cascade hérité des Espagnols. Il a été engagé par le propriétaire de mines, un Bolivien d'origine allemande, Mauricio Hochschild, l'un des trois magnats de l'étain. En 1929, le groupe Hochschild fournit 10 pour cent de la production bolivienne.



2. L'EAU UTILISÉE POUR LE CONCASSAGE coulait dans un aqueduc et actionnait les roues hydrauliques construites dans la maçonnerie (à gauche). L'axe de la roue était relié au concasseur (la poutre horizontale, sur la photographie de droite), dont les pilons frappaient le minerai. Puis on faisait subir au minerai réduit en poudre par une meule un traitement par le mercure pour récupérer l'argent.

Vers 1930, six lacs alimentent encore Potosi qui compte 35 000 habitants, soit environ le cinquième de la population de la ville, à son apogée. Néanmoins, on décide de restaurer les barrages, parce que les besoins en eau de la population du XX^e siècle sont supérieurs à ceux de la population coloniale. De plus, les sociétés qui exploitent l'étain veulent disposer d'eau durant toute l'année.

La restauration

La restauration des barrages est œuvre difficile. À Potosi, toutes les vannes d'évacuation (à l'exception de deux d'entre elles) sont en très mauvais état. Taillées à l'origine dans un tronc d'arbre, puis fondues en bronze, les vannes sont l'élément fragile de l'ingénierie coloniale. De surcroît, les remblais des barrages ont subi des infiltrations : lorsqu'il est plein, le lac Chalviri perd 80 litres par seconde.

Pour améliorer l'alimentation en eau de Potosi, on construit de nouveaux barrages, qui s'appuient sur les anciennes digues ; les fondations sont enterrées de un mètre dans la roche saine. Le lac Chalviri pose une difficulté particulière, parce qu'il ne peut pas être vidangé : on édifie un nouveau barrage légèrement à l'aval de celui de la colonie, et l'espace entre les deux est comblé par du béton, l'ensemble formant une seule digue de cinq mètres de large. Enfin, les barrages ne sont généralement pas assez élevés pour retenir toute l'eau en cas de fortes pluies : l'eau déborde et s'écoule en cascades qui dégradent les ouvrages. Aussi la crête des barrages sans déversoir est-elle relevée, et les tunnels d'évacuation sont-ils reconstruits.

Toutefois, tout ne peut être restauré et nombre de lacs de la colonie disparaissent à jamais. De plus, la forte sédimentation de certains lacs posait un problème insoluble : le lac San Sebastian, remblayé sur une épaisseur de 95 centimètres, avait perdu 80 000 mètres cubes de capacité de stockage. Les lacs coloniaux, n'ont pas été restaurés depuis 1936 ; ils continuent à alimenter la population et les industries de Potosi. Une trentaine d'usines fonctionnent encore, produisant zinc, plomb, argent et étain.

Aujourd'hui, les machines hydrauliques en bois de Potosi fonctionnent à nouveau, moyennant la substitution des pièces usées et le remplacement de quelques composants par des éléments en fer. Essentiellement conçues à la fin du XVI^e siècle, elles ne sont devenues

L'argent de Potosi et l'économie française

L'argent de Potosi était soit frappé sur place (à partir de 1575), soit expédié en Europe (dès 1545, en passant par Lima). Il apparaît massivement dans les émissions monétaires françaises de 1575, date de la réforme monétaire d'Henri III, et surtout du début du deuxième boum des mines de Potosi, après les améliorations apportées à l'exploitation de l'argent par le vice-roi Tolédo. Toutefois, les guerres de religion nuisent à la production de monnaie.

En revanche, au cours de la décennie 1580, grâce à l'afflux d'argent de Potosi quasi pur, la production des pièces frappées dans les hôtels de monnaie de la façade atlantique double.

Comme en Espagne, le métal précieux en provenance de Potosi s'ajoute au métal circulant et augmente la masse monétaire.

À la fin du XVI^e et au début du XVII^e siècles, l'arrivée massive d'argent de Potosi en Europe a eu une influence notable sur l'économie : les émissions monétaires espagnoles décuplent.

En France, l'émission monétaire des ateliers atlantiques baisse à partir de 1590, notamment en raison des guerres de la Ligue. La banqueroute de l'Espagne, en 1596-1597, empêche l'importation d'argent espagnol, ce qui provoque une pénurie dans le Sud de la France et une augmentation du prix du métal. L'avènement d'Henri IV amène une décennie (1600-1610) de paix : les frappes monétaires reprennent.

Pourtant, c'est la fin de la « phase Potosi » en France, et la décrue de la frappe de monnaie avec le métal issu des hautes Andes péruviennes.



obsolètes qu'en 1872, au début de la modernisation de l'industrie minière. Leur grande robustesse et leur réparation aisée furent un obstacle au changement technique, et elles favorisèrent indirectement la décadence de Potosi.

Néanmoins, Potosi reste, dans le cœur de ses habitants et des Espagnols, ainsi qu'aux yeux des historiens, la fabuleuse cité impériale du Nouveau Monde, celle où les chevaux des nobles avaient caparaçon d'argent et harnais couverts d'émeraudes, celle qui fit rêver Cervantès. En 1590, ce dernier rédigea une demande pour être nommé gouverneur de la cité de La Paz, voisine de Potosi. Dans *Don Quichotte*, il cite les mines de Potosi comme le symbole de

la richesse absolue. Au contraire, après l'indépendance des États Sud-américains, Potosi devint pour les Boliviens et pour les Péruviens le symbole de l'exploitation des Indiens, de l'humiliation des colonisés et du pillage des ressources minières par les étrangers. Le travail forcé de générations d'indigènes, de 1573 à 1812, dans les mines et les usines d'argent, reste le noir visage de Potosi. D'ailleurs, les Indiens célébraient leur départ vers la montagne d'argent comme une offrande à la déesse de la Terre, comme un voyage sacrificiel et sans retour. Olympe généreuse pour les colonisateurs, Potosi fut aussi l'enfer, dans les entrailles de la Terre, pour nombre d'Indiens.

Alain GIODA étudie l'histoire du climat des Andes, dans le cadre du programme Neiges et glaciers tropicaux, à l'IRD (Institut de recherche pour le développement) et au SENAMHI (Service national bolivien de météorologie et d'hydrologie), à Cochabamba. Carlos SERRANO, professeur à l'Université autonome Tomas Frias de Potosi, a dirigé le Laboratoire de concentration des minéraux jusqu'en 1998.

Pedro V. CAÑETE (1787), *Guía histórica, geográfica, física, civil y legal del gobierno e intendencia de la provincia de Potosi*, sous la direction de A. Alba, Editorial Potosi, 1952.

Luis CAPOCHE (1583), *Relación general de la villa imperial de Potosi*, sous la direction de L. Hanke, tome 122, Atlas, Madrid, 1959.

Bartolomé ARZANS (1705-1737), *Historia de la villa imperial de Potosi*, sous la direction de L. Hanke et G. Mendoza, Brown University, Providence, 1965.

Emmanuel LE ROY LADURIE et al., *Sur les traces de l'argent de Potosi*, in *Annales ESC*, n° 2, pp. 483-505, Librairie Armand Colin, mars-avril 1990.

Carlos SERRANO, Julio PELÁEZ, *Potosi y sus lagunas*, in *Revista de Investigaciones Históricas (Potosi)*, pp. 14-130, 1995-1997.

13. Archives, histoire du climat et pluviométrie : un exemple sud-américain. -
2002 (*avec Yann L'Hôte*)

Archives, histoire du climat et pluviométrie : un exemple sud-américain

*Archival climate history survey and instrumental records :
a south-american example*

par Alain Gioda, Yann L'Hôte¹

U.R. 32 Geatice, IRD, Montpellier

¹ Maison des Sciences de l'Eau,

IRD, B.P. 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5

E-mail : gioda_ird@yahoo.com

The aim of this research is to reconstruct a regional history of climate, and particularly rainy seasons, using first of all printed chronicles, travellers and explorers diaries and press information. We secondly study archival documents to have a closer point of view of history. Potosi, the silver city of Eldorado (Peru then actually Bolivia, the Andes, 4000 m a.s.l.) is a good field study because of its richness from 1545 (the year of the first human settlement) which was characterized by coin control by Spain, the importance of the hydraulic and mill power in the mining industry built in an arid and cold environment, and a strong administrative domination by Spaniards and the Church of the city and its neighbourhood. The quality of all these different proxy data is estimated using instrumental records especially rainfall long-time series. Archival climate reconstruction from Town Hall reports (1585-1816) has a similar distribution of second half XXth meteorological records. On the other hand, climate history periods (reconstructed from printed chronicles, such as travellers and explorers diaries) have generally a different statistical distribution with a higher number of droughts and catastrophic natural events that could mean rather a lower quality of reconstruction than a climatic change.

I ■ INTRODUCTION

L'étude des pluies anciennes et des longues séries pluviométriques a fait l'objet de diverses compilations en France sous les auspices de Météo France, du Ministère de l'Environnement et de la Société Hydrotechnique de France [1-3]. Inversement, malgré son caractère innovant¹ et sa qualité indiscutée, le sillon en histoire du climat, ouvert par Le Roy Ladurie en 1967, s'est arrêté en France, selon son auteur [4-5]². Toutefois, la nouvelle science de l'histoire du climat, co-fondée aussi par l'Anglais Hubert H. Lamb [7] pour être juste, a été mise en œuvre ailleurs que chez nous. C'est le cas en Europe [8-13] et dans le Monde [14-16], particulièrement en Amérique Latine [17-22]. Dans ce contexte, il n'est pas surprenant que notre exemple soit sud-américain. La reconstruction des variations climatiques dans l'histoire, à partir d'archives et de données non numériques, nécessite une phase incontournable de calibrage sur des données instrumentales les plus longues et les plus fiables possibles. Le travail, sur la

reconstruction de Potosi reste à achever mais nous avons toutefois essayé d'expliquer la méthode pour qu'il soit facile de la transposer dans un autre domaine géographique avec des modifications mineures.

II ■ L'EXEMPLE DE POTOSI

● II.1 Le terrain d'étude : Potosi et l'argent du Pérou (actuellement Bolivie)

Le centre-ville de Potosi est bâti à 3 980 m d'altitude en Bolivie méridionale dans les Hautes Andes. Ses coordonnées géographiques sont les suivantes : lat. 19° 34' 18" S. ; long. 65° 34' 25" O.

Potosi, la ville de l'argent (Ag) des Andes, se prête bien à l'histoire du climat car on y trouve ensemble la richesse dès 1545³, le contrôle des frappes monétaires par l'Espagne, l'importance de l'énergie hydraulique pour l'industrie minière dans un milieu aride, le quadrillage de l'espace et l'archivage soigneux des pièces par l'Etat et les religieux. De plus, nous faisons l'hypothèse que la très haute altitude de la ville peut être un facteur la rendant plus sensible aux aléas du change-

1. Nous ne remonterons pas aux textes déjà anciens d'A. Angot de 1883 comme « Etudes sur les vendanges en France » des *Annales du Bureau Central Météorologique de France* ou de M. Garnier tel « Influence des conditions météorologiques sur le rendement de l'orge de printemps » (*La Météorologie*, 1956, pp. 335-361).

2. L'étude en cours de la reconstruction des crues de l'Ardèche bénéficie, toutefois, de l'apport d'un historien [6].

3. Entre 1590 et 1600, Potosi produisait plus de 40 % de l'argent du Monde ! Entre 1545 et 1825, la production totale d'argent de Potosi, essentiellement destinée aux frappes monétaires, est chiffrée à 32 000 t.

ment climatique aux différentes échelles de temps. La production d'argent déclinera sensiblement au profit du Mexique à partir de 1650 mais la ville restera toujours importante en Amérique du Sud, avec des petits boums en 1750-1800 et dans les années 1840 puis avec un autre pic important de 1872 jusqu'en 1895. L'année 1891 est celle charnière de la démonétisation de l'argent avec l'adoption par les Etats-Unis du *Gold Standard* [23, 24]. Néanmoins, l'argent sera supplanté à Potosi par l'étain (Sn) jusqu'en 1985 avec deux gros boums en 1924-29 et 1940-45 et une production-record bolivienne en 1929 (47 100 t/an)⁴. Ce changement fut possible partiellement parce que le grand gisement de Potosi est poly-métallique avec de l'argent, de l'étain, mais aussi du zinc (Zn), du plomb (Pb), etc. Tout au long de son histoire, des sources documentaires importantes au sujet de Potosi existent donc. y compris la presse très active dès 1850 en ville, et, même à partir de 1825, dans la cité voisine de Chuquisaca (aujourd'hui, Sucre et antérieurement connue encore sous les noms de La Plata et Charcas).

La reconstruction climatique se fera grâce à une histoire régressive c'est-à-dire en partant des données instrumentales pour caler sur celles-ci une histoire du climat s'appuyant sur des informations qualitatives ou encore pré-instrumentales (*proxy data* en anglais).

II.2 La série pluviométrique de la ville voisine de Sucre et celle de Potosi

L'esprit des Lumières trouvera des échos assez vite au Pérou à Lima, la capitale de l'Amérique coloniale espagnole, et, parmi les premiers textes climatologiques de qualité, il faut citer ceux d'Unanue publiés au début du XIX^e s. [25]. Toutefois, dans les Andes, c'est la révolution industrielle des années 1870-80 qui autorise des phénomènes concomitants (et pas toujours liés) qui marquent le désenclavement de la région et son accès à la modernité : introduction de la vapeur et de l'électricité, naissance de sociétés savantes, retour des jésuites, etc. Sucre, alors la capitale effective du pays, bénéficie de la première station météorologique installée en 1882, vite intégrée dans l'Institut de médecine, car cette dernière science était alors très intéressée par le climat et ses relations avec la santé. Le petit groupe de scientifiques de Sucre [26] devance les jésuites qui inaugurent la station du collège de San Calixto à La Paz en 1891 dans le cadre d'un vaste programme scientifique à l'échelle mondiale en météorologie et sismographie [27]. Malheureusement, la station de Sucre connaît des vicissitudes dans son histoire, à l'inverse de celle de La Paz [28]. D'excellent entre 1882 et 1904, sous la direction de Valentín Abecia, son suivi devient médiocre ensuite avant une nouvelle période de bon fonctionnement quand le jésuite Francisco Cerro remplace *de facto* par cette station par celle du collège de Santo Corazón en 1914, distante de 300 m seulement de la première [29]. Sa gestion sera difficile entre 1927 et 1940 avant que la station de référence soit intégrée au Service National Bolivien de Météorologie (l'actuel SENAMHI) en 1942. En 1966, les jésuites du collège de Santo Corazón de Sucre ferment la station (Père Udías, comm. pers.). Toutefois, l'accent était mis depuis des années sur celle de l'aéroport, située à 3 km de la précédente et quelques 200 m plus haut, à la cote 2850.

À Potosi, les premières observations sont de l'Anglais Edmund Temple entre mai et décembre 1826 mais elles

s'arrêteront quand ce dernier commencera son voyage de retour vers l'Europe. Eudoro Calbimonte fit, plus tard, des observations météorologiques entre janvier et avril 1900 en liaison avec la Société de Géographie de La Paz. Ensuite, les compagnies minières et ferroviaires (à partir de 1934 pour ces dernières) s'y intéresseront à la climatologie de Potosi mais rien de continu avant l'installation de la station de Los Pinos du Service national météorologique (SENAMHI) qui démarre en 1942 puis celle de l'aéroport en 1956. Nous travaillerons sur la période 1972-1998 de la station de l'aéroport, la meilleure quant à la qualité des données dans le cadre de cet exemple (tableau 1). Cet échantillon de pluies servira pour délimiter les 5 classes issues du dépouillement des chroniques historiques depuis 1545, date de l'implantation du premier campement minier de Potosi.

La série des pluies annuelles (du 1^{er} juillet à 30 juin) de Potosi est homogène, stationnaire et suit une loi de distribution « racine carrée normale » dont les résultats sont très voisins d'une loi normale symétrique (loi de Gauss).

Enfin, malgré une distance de plus de 100 km à vol d'oiseau, une différence d'altitude d'environ 1100 m, des chaînes de hautes montagne les séparant et des étages écologiques distincts (la *puna* ou steppe froide de Potosi et la forêt xérophile à épineux de Sucre), les deux stations sont corrélées de façon significative ($r^2 = 66\%$) en pluviométrie annuelle durant la période récente entre 1972-73 et 1997-98.

II.3 Reconstruction du climat de Potosi à partir de la presse et des bibliothèques

Avant 1825 et l'indépendance de la Bolivie, il n'y a pas eu d'imprimerie dans cette région des Andes à part une presse portative ayant fonctionné quelques années dans la région du Lac Titicaca. Les mineurs n'étaient pas des intellectuels en général ce qui n'empêchait pas de riches bibliothèques privées à Potosi [30]. Néanmoins, tout texte pour être imprimé devait passer devant le Tribunal de l'Inquisition, la capitale administrative était la lointaine Lima sur la côte du Pérou, les voyages en Espagne du fret pouvaient durer jusqu'à deux ans comme la transmission des nouvelles (sic) si bien que la plupart des grands écrits sur Potosi ont dû attendre les XIX^e et XX^e s. pour être édités. La liste des chroniqueurs, comme celle des explorateurs, est longue mais les œuvres de Bartolomé Arzán [31] et Pedro Vicente Cañete [32] du XVIII^e s. sont les plus connues. Arzán (1676 ?-1736), sans doute un petit maître d'école né à Potosi, donne énormément d'informations d'ordre climatique. Néanmoins, ces dernières souffrent de la comparaison avec celles des scientifiques européens du XVIII^e s. ; par exemple, chez Arzán, les calamités climatiques sont d'origine divine et donc ses idées sont très en retard par rapport à la conception moderne du cycle de l'eau [33]. Enfin, au XIX^e s., le texte du franciscain Martarelli est important en histoire du climat avec des pages sur le changement des espèces de plantes dans les potagers de cette ville à 4 000 m d'altitude, entre le XVI^e s. et les années 1880, à la suite de la fin du Petit Age Glaciaire [34]. Potosi fut, un peu comme Venise, une ville mythique vivant de l'eau (indispensable pour l'amalgamation de l'agent puis la flottation des minéraux), très riche lors des boums ou très pauvre entre ces derniers et donc ayant alimenté une littérature abondante. La presse en Bolivie, depuis la parution régulière du premier journal « El Condor de Bolivia » en 1825, est active car elle sera, au moins au début, le moyen de faire passer les idées républicaines et de celles du dictateur de passage dans l'élite

⁴ La Bolivie sera le 2^e producteur mondial d'étain au XX^e s. jusqu'en 1976, avec fréquemment 20 % et plus du marché.

Tableau 1. Valeurs statistiques de la série pluviométrique annuelle de Potosi-aéroport (1972-73 à 1997-98), afin de servir de limites de classes aux résultats du dépouillement des archives et des documents en histoire du climat de la ville de Potosi.

↓ Ligne	Limites →	Très sec à Sec	Sec à Normal	Médiane	Normal à Humide	Humide à Très Humide
1	Fréquence	10 %	20 %	50 %	80 %	90 %
2	Echantillon	238	252	368	475	537
3	Loi normale	221	271	367	464	514
4	Loi racine carrée normale	231	272	359	459	516
5	Moyenne des lignes 2 à 4	230	265	363	466	522

économique (les analphabètes et les locuteurs en langues indiennes restant majoritaires jusqu'au XX^e s.). Toutefois, la description des calamités naturelles puis la météorologie s'y tailleront progressivement une petite place.

● II.4 Reconstruction du climat de Potosi à partir des archives

Il faut signaler que nous avons écarté pour l'instant les années n'ayant pas d'indication implicite quant à leur caractère plus ou moins pluvieux c'est-à-dire celles qualifiées seulement de froides, bonnes ou mauvaises.

Nous reproduisons une partie du tableau du climat du XVIII^e s. reconstruit à partir du dépouillement des archives et chroniques historiques de la ville de Potosi et d'autres villes et régions de Bolivie (tableau 2).

III ■ COMPARAISON DES RÉSULTATS

La première partie du tableau 3 fournit, pour chaque siècle, le pourcentage des années allant du très sec au très humide, selon 5 classes. Le constat le plus évident est qu'il a été recensé dans l'échantillon deux fois plus d'années très sèches et sèches (23,1 %) que d'humides et très humides (10,9 %). Plus encore, les années très sèches sont fort nombreuses (15,6 %), d'où une distorsion possible qui sera analysée plus loin.

Sachant que la série des pluies annuelles de 1972-73 à 1997-98 suit une loi « racine carré normale » mais aussi que dans les limites qui nous intéressent (5 à 10 ans qui ne sont pas les valeurs extrêmes), les résultats de celle-ci sont très proches de ceux d'une loi normale simple, cette dernière a été adoptée pour la modélisation.

La seconde partie du tableau 3 (lignes 8 à 10) donne le dénombrement théorique, suivant les caractéristiques statistiques retenues (10, 20, 80 et 90 %).

Nous avons ensuite cherché, par extrapolation aux données anciennes, quelles caractéristiques statistiques d'un dénombrement classique correspondent aux limites des classes retenues dans l'autre dénombrement fait à partir de l'histoire du climat.

— Le pourcentage de 66 % d'années normales (aux lignes 6 et 7) n'est pas sans rappeler la valeur théorique encadrant la médiane (lignes 9 et 10), si on choisit les bornes à 20 et 80 % de l'échantillon, soit des fréquences d'apparition quinquennales sèches et humides dans un classement croissant.

— Afin de séparer en histoire du climat les valeurs extrêmes (très...) de celles qualifiées simplement de sèches ou d'humides, les fréquences 10 et 90 % (décennales) semblent correctes parce qu'elles individualisent, avec des pourcentages relativement proches (ligne 6), les années sèches (7,5 %), humides (5,6 %) et très humides (5,3 %). Seulement, le taux des années très sèches, comme déjà signalé, est sensiblement différent (15,6 %).

Au total, le modèle est correct principalement pour décrire les deux critères des 20 et 80 % qui séparent les années normales des super-classes des années globalement sèches (qui regroupent les caractères sec et très sec) et humides (qui regroupent les caractères humide et très humide). En chiffres absolus non fournis dans le tableau 3, 237 années de ce type furent observées en histoire du climat à Potosi contre 215 calculées par le modèle. Pour les deux autres limites (10 et 90 %), on retiendra des séparations en groupes d'individus sensiblement égaux entre eux.

IV ■ DISCUSSION SUR L'HOMOGENÉITÉ DES DONNÉES D'HISTOIRE DU CLIMAT

Il s'agit de l'analyse des données de pluies de type pré-instrumental.

Un premier échantillon fut publié en 2000 et il correspondait à la reconstruction des saisons pluvieuses à Potosi de 1585-86 à 1814-15 [21]. Il est à noter que nous éliminons donc toutes les données de presse dans cet exemple. Cette longue série avait été faite uniquement à partir des données d'archives, en utilisant les expertises de María del Rosario Prieto qui travaille en histoire du climat sud-américain depuis les années 1980 entre Mendoza, Buenos Aires (Argentine), Madrid et Séville (Espagne) [17, 19, 20] et d'Ana Forenza qui déchiffre, classe et catalogue les documents de la colonie espagnole depuis plus de 30 années en Bolivie.

La série analysée dans ce travail est un peu différente car elle va de 1545 à 1930 et donc elle comprend aussi les informations issues des archives religieuses et de la presse. Néanmoins pour l'essentiel, les deux types suivants d'archives publiques ont été consultés pour bâtir cette série comme l'antérieure, celle de 1585-86 à 1814-15 :

1) les Ordonnances Royales de Charles III, appelées exactement « *Relaciones sextrimestrales de aguas, cosechas y demás particulares* » (AGI en abrégé car elles se trouvent pour l'essentiel à l'*Archivo General de Indias* de Séville mais aussi à l'*Archivo General de la Nación* à Buenos Aires).

Tableau 2. Extrait de la reconstruction du climat du XVIII^e s.

Année	Potosi	Q	Sucre	Q	Cordillera	Q	Cbba	Q	Altiplano	Q
1777	N		?		N		?		?	
1778	N		?		Très Sec	1	?		?	
1779	N		?		N		?		?	
1780	Très Sec	2	?		N		?		?	
1781	Très Sec	2	?		N		?		?	
1782	N		?		N		?		?	
1783	Très Sec	2	?		N		?		?	
1784	Très Sec	3	Humide	3	N		Très Sec	3	Sec	3
1785	Humide	3	Sec	3	N		Humide	3	P. en retard	3
1786	Sec, Froid	3	Sec	3	Sec, Froid	3	Sec	3	Sec, Froid	3
1787	Très Sec	3	Sec	3	N		Très Sec	3	Humide	3
1788	T. Humide	3	T. Humide	3	Très Sec	3	T. Humide	3	T. Humide	3
1789	Humide	3	P., Sec, Froid	3	Très Sec	3	N		Humide	3
1790	Sec, T. Froid	3	Sec, Froid	3	Sec	3	Humide	3	Sec	3
1791	N		?		Très Sec	3	Humide	3	?	
1792	N		?		Très Sec	3	Sec	3	?	
1793	N		?		Très Sec	3	Sec	3	?	
1794	N		?		N		Humide	3	?	
1795	N		?		N		N		?	
1796	Bon	3	Sec	3	Bon	3	Humide	3	Bon	3
1797	Bon	3	?		N		Mauvais	3	T. Humide	3
1798	Sec	3	?		N		Humide	3	Très Sec	3
1799	N		?		N		N		?	
1800	N		?		N		Très Sec	3	?	

Les colonnes Q donnent la qualité de l'information climatologique classée en ordre croissant de 1 (la moins bonne) à 3 (la meilleure). Dans les cases, N correspond à une année Normale et (?) à une année ou à une région pour lesquelles l'étude des chroniques reste à faire. En abrégé, Cbba pour Cochabamba ; P. pour pluies.

2) et surtout les actes municipaux de Potosí (AACP en abrégé pour « *Actas de los Acuerdos del Cabildo de Potosí* »)⁵.

Il a été reconstitué numériquement la série complète, en indiquant les données absentes, les types d'années (TS pour très sec, S sec, N normal, H humide, TH très humide). Les saisons des pluies à Potosí (363 mm/an en moyenne dans la seconde moitié du XX^e s. entre 1972 et 1997) et sa proche région sont classées en ces cinq classes⁶. Il a été fait les

⁵ Les archives de l'Eglise sont très précieuses car elles couvrent, avec les paroisses rurales, les campagnes qui vivent de cultures non irriguées et d'élevage. Elles se distinguent par leur spécificité avec les comptes-rendus de prières « *pro pluvium* » en cas de sécheresses qui comportent, comme en Espagne, toute une gradation selon la rigueur de ces dernières : neuvaines, processions... [10]. Dans le cadre de ce travail, ces archives ont été assez peu utilisées car elles ne subsistent en abondance dans la Bolivie rurale qu'à partir du XIX^e s.

⁶ Les pluies y sont concentrées durant 3 ou 4 mois de décembre ou janvier à mars. En Bolivie andine, le début de la saison des pluies s'étale d'août à

cumuls des différents types de saisons des pluies et enfin nous avons noté l'origine de l'information. Venait-elle d'une autre source que les actes municipaux de Potosí (AACP) ? Le but était de répondre à la double question suivante. La distribution en années normales et les autres est-elle logique, correcte... ? N'y a-t-il pas des distorsions des résultats selon les différentes origines des données ?

La conclusion principale est que les 101 années, reconstituées à partir des actes municipaux, fournissent une répartition telle que nous pouvions l'attendre, selon les données instrumentales des stations météorologiques du XX^e s. en Bolivie, à savoir environ 70 % d'années normales et 30 % d'autres. Ce n'est pas le cas avec les 81 années reconstituées à partir d'autres sources (35 % d'années normales et 65 % d'autres). En toute rigueur, les deux populations, la première issue des

novembre mais cette saison est plus beaucoup plus courte, voire absente au sud dans la région de Potosí, qu'elle ne l'est plus au nord, dans la zone de La Paz

Tableau 3. Archives écrites de la ville de Potosí. comparaison entre le tableau de fréquences relatives des années d'un caractère donné et un modèle statistique simple

Ligne ↓	Caractère de l'année → ↓ Série séculaire	Très Sec	Sec	Normal	Humide	T Humide	Nombre d'années retenues
Tableau de fréquences relatives des caractères des années, en pourcentage (%)							
1	Climat XVI ^e (1545-1600)	1,9	5,7	84,9	7,5	0,0	53
2	Climat XVII ^e (1601-1700)	18,0	3,0	73,0	6,0	0,0	100
3	Climat XVIII ^e (1701-1800)	24,5	7,1	55,1	1,0	12,2	98
4	Climat XIX ^e (1801-1900)	11,1	13,8	66,3	6,3	2,5	80
5	Climat XX ^e (1901-1930)	14,3	10,7	42,9	14,3	17,9	28
6	Total des 5 séries	15,6 %	7,5 %	66,0 %	5,6 %	5,3 %	359
7	5 caractères groupés en 3	23,1 %		66,0 %	10,9 %		---
Modèle théorique, en pourcentage (%)							
8	Fréquence au non dépassement	10 %	20 %	20 < F < 80 %	80 %	90 %	Total
9	Totaux théoriques en %	10 %	10 %	60 %	10 %	10 %	100 %
10	Tot. théor. Groupés en %	20 %		60 %	20 %		100 %

actes municipaux de Potosí, la seconde d'autres archives ne devraient pas être mélangées.

L'autre conclusion forte serait de taxer de partialité (avec un penchant vers les épisodes anormaux et particulièrement les sécheresses) les compilateurs des autres sources. Il s'agit des fonctionnaires obéissant aux Ordonnances Royales de Charles III à la fin du XVIII^e s. et, dans une moindre mesure de Bartolomé Arzáns, le chroniqueur de Potosí entre 1545 et 1736 [31]. Enfin, la reconstruction, faite à partir de Tandeter et Wachtel (deux historiens contemporains) [35] et qui fut utilisée pour les années autour du milieu du XVIII^e s., apparaît la moins partiale parmi les sources différentes des actes municipaux de Potosí.

Dans le détail, le dépouillement de la période 1780-1801 a donné 11 saisons des pluies anormales pour seulement 2 normales. Il s'agit, pour l'essentiel, de données recueillies à l'Archivo General de Indias. Arzáns, de son côté, a fourni 16 définitions de saisons des pluies normales contre 30 autres ce qui paraît illogique. Parmi les saisons des pluies anormales, il n'y a guère plus d'humides à très humides (17) que de sèches à très sèches (13). D'où, l'hypothèse qu'il y aurait une distorsion des informations durant la période 1780-1801 qui était donc caractérisée par 11 années anormales contre 2 normales ce qui a été confirmé par un essai du logiciel Chronos-

tat [36] sur l'ensemble de la série 1585-1586 à 1814-1815. Nous obtenons alors, avec la segmentation d'Hubert [38-39], une rupture — correspondant à une anomalie de la distribution (et non pas du climat !) — avec trop d'années sèches lors de la période 1777-1804 pendant laquelle les principales sources d'informations sont soit les Ordonnances Royales de Charles III (les « *Relaciones sextrimestrales de aguas, cosechas y demás particulares* ») soit d'autres données de cette époque de renaissance du pouvoir royal (connue comme les réformes des Bourbons d'Espagne).

Toutefois, un traitement statistique est seulement descriptif et il faut pondérer ses conclusions. En effet, il y a bien eu une crise climatique au tout début du XIX^e s. (1800-1801) qui est connue dans presque toute la Bolivie [40] et en Argentine septentrionale [20]. Dans la région de Potosí, la sécheresse de 1803-1804 fut particulièrement grave [19].

V ■ CONCLUSIONS PROVISOIRES

Les pluies anciennes, avant les débuts de la météorologie dans les décennies 1880 et 1890, restent mal connues dans les Andes centrales. Notre approche en histoire du climat est rigoureuse même si elle semble, dans un premier temps, nier le changement climatique aux différentes échelles de temps

(séculaire, décennal, annuel) par l'application d'un modèle simple de statistiques qui pose comme *a priori* la stationnarité des séries. Ce modèle a pu être appliqué aux données dépouillées à partir des archives de Potosi de près de 4 siècles. Les résultats sont les suivants

— la distribution de l'échantillon et de ses caractères climatiques peut être assimilée à une loi de Gauss ou une loi symétrique quasi normale ;

— les limites encadrant le caractère normal (défini par l'absence d'informations de caractère climatique lors d'une saison des pluies alors que d'autres types de données d'actualités économiques, politiques ou sociales se rencontrent en abondance durant la même période) d'une année ont des fréquences symétriques quinquennales (20 % et 80 %) ;

— connaissant le climat aride de Potosi et la grande importance de l'eau dans l'exploitation et la transformation des minéraux, les hommes du XVI^e au XIX^e s. semblent avoir été plus sensibles aux années avec des sécheresses plus ou moins fortes qu'aux années avec des pluies excédentaires. De toute façon, l'agriculture qui a besoin de bonnes pluies ne jouait et ne joue qu'un rôle marginal dans cette zone aride et minière.

Toutefois, il se note des variations importantes causées par le collage de données d'origine distincte qu'il est difficile d'homogénéiser. Ainsi, lorsque des comptes-rendus réguliers et spécifiques sur les récoltes et les eaux sont exigés par le pouvoir central de Madrid, comme entre 1785 et 1809, les phénomènes extrêmes se multiplient. Nous constatons le même phénomène, à un degré moindre, avec les chroniqueurs de la ville qui rédigent son histoire en exagérant l'occurrence des calamités climatiques. Le dépouillement systématique des archives municipales entre 1585 et 1816, quand elles existent encore (ce qui est le cas pour la plupart des années), donne une répartition des sécheresses et des saisons des pluies proche de l'actuelle. Comme il y a des périodes de recoupement entre les différentes populations de données, nous pencherons à qualifier les archives municipales comme les plus crédibles des sources historiques. Cela prouverait, à ce stade de la reconstruction du climat de Potosi, que la distribution dans le temps des différentes années (sèche, normale ou humide) est restée presque inchangée dans l'histoire mais, par contre, nous ne savons pas encore si l'intensité des saisons des pluies ou des sécheresses a pu varier.

HOMMAGE ET REMERCIEMENTS

Ce travail est dédié à la mémoire de J.-P. Carbonnel, Directeur de Recherche au CNRS, l'organisateur des études en histoire de l'eau en France.

Les données ont été collectées grâce au programme NGT (IRD) et au projet ARCHISS (Archival Climate History Survey) parrainé par l'UNESCO-PHI (Montevideo). Elles l'ont été par A. Forenza (archiviste e.r., ABNB, Sucre), C. Serrano (professeur des mines, INHIGEO, Potosi) et J. Gavignet (élève ISTOM). M.R. Prieto (historienne, CRICYT, Mendoza) et T. Platt (ethnologue, Université de Saint-Andrews) nous ont aussi communiqué le résultat de recherches inédites.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] COLLECTIF (1991). — *Les données pluviométriques anciennes*. Météo France & Ministère de l'Environnement, Météorologie Nationale, Paris
- [2] L'HÔTE Y (1991). — Historique de la mesure des pluies. In : *Les données pluviométriques anciennes*. Météo France & Ministère de l'Environnement, Paris, pp. 8-12
- [3] SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE (2001). — *Actes du Colloque « Variations climatiques et hydrologie »*, 169^e Session de Comité Scientifique et Technique de la Société Hydrotechnique de France, 12-13 décembre, Paris.
- [4] LE ROY LADURIE E. (1983). — *Histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion, Paris, 1967 (2^e éd., 2 vol.).
- [5] LE ROY LADURIE E. (2000). — Préface de la réédition de Maurice Champion. *Les inondations en France du VI^e siècle à nos jours*, 1858-1864. CEMAGREF, Paris, 2^e éd., 6 vol.
- [6] LANG M., RECKING A., NAULET R., CŒUR D. (2001). — Etude de cas : l'analyse des pluies et crues extrêmes observées depuis 200 ans dans un bassin cévenol, l'Ardèche. In : « *Variations climatiques et hydrologie* », 169^e Session de Comité Scientifique et Technique de la Société Hydrotechnique de France, 12-13 décembre, Paris (une autre communication est prévue lors de ce colloque d'octobre 2002)
- [7] LAMB H.H. (1988). — *Weather, Climate and Human Affairs. A Book of Essays and Other Papers*. Routledge, London
- [8] ALLXANDRE P (1987). — *Histoire du climat de l'Europe au Moyen Age. Contribution à l'histoire des variations climatiques de 1000 à 1425, d'après les sources narratives de l'Europe occidentale*. E.H.E.S.S., Paris
- [9] PEISTER C. (1988). — Fluctuations climatiques et prix céréaliers en Europe du XVI^e au XX^e siècles. *Annales E.S.C.*, 43^e année, n° 1, pp 25-53.
- [10] MARTIN-VIDE JAVIER, BARRIENDOS MARIANO V. (1995). — The Use of Rogation Ceremony Records in Climatic Reconstruction : A Case Study from Catalonia (Spain). *Climatic Change*, vol. 30, pp 201-221.
- [11] DEMAREE G., OGILVIE A.E.J., ZHANG DE'ER (1998). — Further Documentary Evidences of the Northern Hemispheric Coverage of the Great Dry Fog of 1783. *Climatic Change*, vol. 39, pp. 727-730
- [12] BOKWA A. (éd.) (2000). — Actes de la Conférence « *Images and Reconstructions of Weather and Climate over the Last Millennium* », 20-22 September 2000, Jagiellonian University, Krakow, Poland, In : *Prace Geograficzne*, vol. 106 & 107.
- [13] GROVE A.T. (DICK), RACKHAM O. (2001). — *The Nature of Mediterranean Europe. An Ecological History*. Yale University Press, New Haven & London.
- [14] BAKER M (1996). — *Report on the Status of the Archival Climate History Survey (ARCHISS) Project*. TD-776, WMO, Genève
- [15] DIAZ H. (éd.) (1999). — Abstracts of the « *Conference on Reconstructing Climatic Variability from Historical Sources and other Proxy Records* », December 1-3, 1999, Manzanillo, Mexico, NOAA & U.S. NSF.
- [16] JONES P.D., OGILVIE A.E.J., DAVIES T.D., BRIFFA K.R. (éds) (2001). — *History and Climate. Memories of the Future ?*. Kluwer/Plenum, New York
- [17] PRIETO M DEL ROSARIO, HERRERA R. (1998). — Southmost South America Climate and Glaciers in the 16th Century through the Observations of Spanish Navigators. In *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. J Rabassa & M. Salemmie (éds.), A A Balkema, Rotterdam & Brookfield, pp 153-179
- [18] DUCKSTEIN L. (1998). — *Use of Fuzzy Logic to Encode Archival Climate Research Uncertainty*. IHP-V. TD-17, UNESCO, Paris
- [19] GIODA ALAIN, PRIETO M DEL ROSARIO (1999). — Histoire des sécheresses andines. Potosi, El Niño, le Petit Age Glaciaire. *La Météorologie*, 8^e série, n° 27, pp 33-42.
- [20] PRIETO M DEL ROSARIO, HERRERA RICARDO, DUSSLI P. (2000). — *Archival Evidence for Some Aspects of Historical Climate Variability in Argentina and Bolivia during the 17th and 18th Centuries*. In : Southern Hemisphere Paleo- and Neoclimates. P.P Smolka & W Volkheimer (éds), Springer, New York, pp. 127-142

- [21] GIODA A., PRIETO M. DEL ROSARIO, FORENZA A. (2000) — Archival Climate History Survey in the Central Andes (Potosí, 16th-17th centuries). In. « *Millennium Images and Reconstructions of Weather and Climate during the Last Millennium* », 20-22 September 2002, Krakow, *Prace Geograficzne*, vol. 107, pp. 107-112.
- [22] OMM (2001). — *Rapport final abrégé, résolutions et recommandation de la Commission de Climatologie. 13^e session, 21-30 novembre 2001, Genève*. OMM-n° 938, Genève (avec ARCHISS, pp. 13-14).
- [23] GIODA A., SERRANO C. (1998). — L'eau et l'argent à Potosí (ancien Haut-Pérou puis Bolivie) *La Houille Blanche*, n° 7, pp. 65-75.
- [24] GIODA A., SERRANO C. (1999). — L'argent de l'ancien Pérou *Pour la Science*, n° 259, pp. 42-47.
- [25] UÑANUE H. (1806). — *Observaciones sobre el clima de Lima y sus influencias en los eres organizados en especial el hombre* Imprenta Real de los Niños Huérfanos, Lima.
- [26] ABECIA V. (1905). — *Observaciones meteorológicas hechas en Sucre, capital de Bolivia (1882-1904)*. Instituto Médico, Sucre.
- [27] UDIAS A., S.J. (1996) — Jesuits' Contribution to Meteorology *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 77, pp. 2307-2315
- [28] GIODA A., RONCHAIL J., L'HÔTE Y., POUYAUD B., DRAKE L.A., S.J. — Analyse et variabilité temporelle d'une longue série de pluies des Andes en relation avec l'Oscillation Australe (La Paz, 3 658 m, 1891-2000). *Sécheresse*, accepté en mars 2002.
- [29] CERRO F., S.J. — *Boletín del Observatorio Meteorológico dirigido por los Padres de la Compañía de Jesús*. Sucre, 1915-1942
- [30] INCH M. (2000). — Bibliotecas privadas y libros en venta en Potosí y su entorno (1767-1822). *Paramillo* (Caracas), vol. 19, pp. 1-241.
- [31] ARZANS B. (1705-1737) — *Historia de la Villa Imperial de Potosí* L. Hanke & G. Mendoza, (éds.), Brown University, Providence, 3 t., 1965.
- [32] CAÑETE P.V. (1787). — *Guía histórica, geográfica, física, civil y legal del gobierno e intendencia de la provincia de Potosí*. A. Alba (éd.), Editorial Potosí, Potosí, 1952.
- [33] L'HÔTE Y. (1990). — Historique du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologiques en Europe. *Hydrologie Continentale*, vol. 5, n° 1, pp. 13-27.
- [34] MARTARELLI A., OMF (1890). — *El colegio franciscano de Potosí y sus misiones. Noticias históricas*. Tipografía Italiana, Potosí.
- [35] TANDETER E., WACHTEL N. (1983). — Conjonctures inverses. Le mouvement des prix à Potosí pendant le XVIII^e siècle. *Annales E.S.C.*, 38^e année, n° 3, pp. 549-613.
- [36] KHROSTAT version 1.0 (1998). — *Logiciel développé par l'Orstom UR 2-21, l'Ecole des Mines de Paris et l'UMR GBE de l'Université Montpellier II*, 1998.
- [37] HUBERT P., CARBONNEL J.-P., CHAOUCHE A. (1989) — Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest *J. of Hydrology*, vol. 110, pp. 349-367
- [38] HUBERT P., SERVAT E., PATUREL J.-E., KOUAMÉ B., BENDJOUDI H., CARBONNEL J.-P. et al. (1998) — La procédure de segmentation, dix ans après. *AIHS* n° 252, pp. 267-273.
- [39] LUBES-NIEL H., MASSON J.-M., PATUREL J.-E., SERVAT E. (1998). — Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 11, pp. 383-408.
- [40] TANDETER E. (1991). — La crisis de 1800-1805 en el Alto Perú. *Data* (La Paz), n° 1, pp. 9-49.

Documents d'archives consultés

Archivo y Biblioteca Arquidiócesanos « Monseñor Taborga » (ABAS), Sucre
Pour l'essentiel, le fonds « Parroquias » (Forenza, Gioda et Gavignet)

Archivo de la Casa de Moneda, Potosí
Hémérothèque avec les journaux du département de Potosí « Alas », « El Tiempo » (Serrano).
Archivo Departamental (Tristan Platt), fonds « Minas » (Serrano).

Archivo General de Indias (AGI), Séville
Fonds « Charcas » et « Relaciones sextrimestrales de aguas, cosechas y demás particulares » (Prieto).

Archivo General de la Nación (AGN), Buenos Aires
« Relaciones sextrimestrales de aguas, cosechas y demás particulares » en particulier (Prieto).

Archivo Municipal, Casa de Cultura, Cochabamba
Hémérothèque avec spécialement le journal « El Heraldo » (Gioda).

Archivo Nacional de Bolivia (ANB) - Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia (ABNB), Sucre
Colección Ernesto RÜCK - « Actas de los Acuerdos del Cabildo de Potosí », 33 vol., 1585-1816 (Forenza).
Hémérothèque avec les journaux du département de Chuquisaca (Sucre) « El Condor de Bolivia » et de Potosí non conservés aux archives de la Casa de Moneda (Gioda et Gavignet).
Colloque SHF "Hydraulique des Millénaires" - Grenoble - octobre 2002 - Gioda et L'Hôte - Archives, histoire du climat et pluviométrie

14. Travail encadré

***Gustavo Garza* - 2002. Frecuencias y duración de sequías de la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX.**

Frecuencia y duración de sequías en la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX

Gustavo Gerardo Garza Merodio*

Recibido: 16 de enero de 2002
Aceptado en versión final 16 julio de 2002

Resumen. El estudio del clima en su comportamiento secular por medio del análisis sistemático de las fuentes documentales se inscribe entre los denominados *proxy-records*, registros utilizados con el fin de reconocer el comportamiento climático en periodos largos. Esta posibilidad ha sido poco utilizada en México hasta fines del siglo XX, siendo que, los antecedentes de este tipo de trabajo no tuvieron como finalidad el considerar el comportamiento climático en la larga duración a nivel regional, sino buscaron correlacionar eventos socioeconómicos con ciertas anomalías climáticas. A su vez, no se basaron en series documentales continuas y homogéneas en su información, tal y como son las actas de los cabildos civil y eclesiástico; acervos que al estudiarse con detenimiento y desde el inicio de su registro hasta el triunfo definitivo de la república liberal, permitieron el reconocimiento del comportamiento de sequías a lo largo de doscientos setenta años (1600-1870) para la cuenca de México. De los diversos hechos y fenómenos climáticos, la sequía es el único plausible de ser reconocido fehacientemente de acuerdo con el tipo de información encontrada en la Ciudad de México, en tanto que el mecanismo fundamental de información, las rogativas, son registradas en forma constante únicamente cuando se trata de capítulos de sequía. Las rogativas eran ceremonias realizadas con el fin de solicitar el fin de una vicisitud ambiental o mórbica, que en el caso de la capital mexicana, se realizaban a favor de la Virgen de los Remedios en la mayor parte de los casos.

Palabras clave: Climatología histórica, *proxy-records*, rogativas, comportamiento climático regional

Frequency and lasting of droughts in the Basin of Mexico from late 16th Century to Mid 19th Century

Abstract. The long lasting study of climate through the systematic analysis of documentary sources is among the so called *proxy-records*, registrations used in order to recognize the climatic behaviour during several centuries. This methodological possibility has been hardly practiced in Mexico until the late Twentieth Century, thus, the background in this kind of research was not meant to distinguish the climatic behaviour in a regional scale during large periods of droughts time, in fact, it aimed to relate certain socioeconomic events with climatic anomalies. At the same time, it was a research not based in continuous and homogeneous documentary sources, condition accomplished by the rogation ceremonies records registered in the books of the civil and ecclesiastic files; these archives were carefully inspected since the beginning of their recording until the decade of 1860, when they ended as an institutional performance, their duration as part of the public and religious records along two hundred and seventy years (1600-1870) gave the opportunity to knowledge droughts in the basin of Mexico. Of the different climatic phenomena, they were the only ones that had the chance to be reliable acknowledge according to the type of information found in Mexico City, since the fundamental mechanism of data, rogation ceremonies, were constantly recorded only during the drought chapters. The rogation ceremonies were carried out with the expectancy of giving end to an environmental or morbid vicissitude. In Mexico City these ceremonies were dedicated, most of the times, to the Virgin of "Los Remedios".

Key words Historical climatology, *proxy-records*, rogation ceremonies, regional climatic behaviour.

INTRODUCCIÓN

La frecuencia y duración de sequías en la Ciudad de México y, por ende, en la cuenca homónima (en tanto que se considera la manifestación de este tipo de anomalía climática en una escala, al menos interregional,

dimensión que queda registrada en algunas de las fuentes documentales consultadas), fueron obtenidas por medio de la consulta, fundamentalmente, de las ceremonias denominadas rogativas, asentadas en las actas de los cabildos civil y religioso de la Ciudad de México. Esta metodología se inscribe

*Instituto de Geografía, UNAM, Cd. Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: gustavogarza@hotmail.com

dentro de la Climatología Histórica, área del conocimiento para la que son indispensables los denominados *proxy-records*, entre los que destacan, además de la consulta de fuentes documentales, la dendrocronología, la palinología y el paleomagnetismo, por mencionar algunos.

Dentro de las posibilidades documentales de pesquisa, la utilización de las rogativas o rogaciones es la más precisa, dado el carácter continuo y homogéneo de la información que proporciona este tipo de extracto. La climatología histórica es una especialidad paleoclimática que se basa en la utilización de los denominados *proxy records*, dentro de éstos, las rogativas o rogaciones han llegado a ser, por su veracidad, el registro documental más confiable. La disciplina tuvo muchas aproximaciones a lo largo de la historia y parte de sus posibilidades se basan precisamente en la investigación de fuentes generadas por las primeras mediciones instrumentales o registros de acontecimientos climáticos más o menos catalogados en los que, desafortunadamente, no se encuentra un principio de sistematización de la información.

Sin embargo, no es sino hasta la década de 1960 cuando la climatología histórica se convierte en una actividad plenamente científica, gracias a las aportaciones de autores franceses, pertenecientes a la escuela de los Anales, entre los que destaca Le Roy Ladurie. Ha tardado alrededor de veinte años en consolidarse esta área del conocimiento en los países de Europa central, en donde destacan desde los años ochenta las labores conducidas por Alexandre (1987) y Pfister (1988). Por otro lado, transcurrió casi una década más en comenzar a dar resultados en el ámbito mediterráneo, gracias a las aportaciones de Barriendos (1994) y Rodrigo (1994), lo que permitió la posibilidad de aproximar el conocimiento del comportamiento climático secular, por medio del análisis de fuentes documentales, al conjun-

to de países que en algún momento estuvieron bajo el dominio de la monarquía hispánica.

ANTECEDENTES

La climatología histórica, como quehacer científico, cuenta con distintos ámbitos de desarrollo hacia las décadas de 1960 y 1970. Por un lado, destaca la obra de Emmanuel Le Roy Ladurie, *La historia del clima después del año mil* (1967), que continúa vigente a casi cuarenta años de su publicación. El "laboratorio" de Le Roy, los glaciares franceses y suizos, le permitió reconstruir por medio de los registros de avance y retroceso de las masas de hielo el comportamiento climático de los últimos diez siglos. Pocos años después comenzó a difundirse la labor de Hubert H. Lamb (1972, 1977, 1982 y 1988), cuya producción bibliográfica fue muy prolífica e indispensable en la comprensión de la disciplina en su conjunto y en correlación con sucesos antrópicos.

Dadas las características del clima europeo occidental, expuesto en lo fundamental en las borrascas procedentes del Atlántico, se ha podido lograr la correlación entre el avance de los glaciares (Messerli *et al.*, 1978), y episodios húmedos extremos en Cataluña, donde los Pirineos han carecido de glaciares de valle desde hace milenios, esto gracias a la labor realizada por medio del estudio de las rogativas (Barriendos y Martín, 1998).

En el ámbito mediterráneo, es muy importante y de alcances por lograr, la obra dirigida por el doctor Mariano Barriendos Vallvé, quien ha construido series climáticas en las que se reflejan las anomalías que ha sufrido su natal Cataluña desde el siglo XV hasta el XIX. En España se han conseguido once series, aunque el estudio detallado de sus índices climáticos se encuentra todavía en desarrollo. Los primeros resultados permi-

tieron identificar la variación de los rangos durante la "Pequeña Edad de Hielo" (LIA –por sus siglas en inglés–), siendo aún más definidos los índices cuando se comparan las relaciones de sequía con la sucesión de inundaciones. Este mismo autor destaca en sus referencias para Europa occidental el trabajo logrado en Italia a lo largo de la última década del siglo XX; algunos de los trabajos de Camuffo y Enzi (1991,1992) Camuffo *et al.* (2000), son próximos en lo metodológico a la pesquisa presentada en estas páginas y el conjunto de la obra de estos autores se encuentra ampliamente reconocida en la literatura especializada.

Para México, es importante destacar la tarea dirigida por Enrique Florescano (1969, 2000); sin embargo, al no recurrir a fuentes documentales homogéneas y continuas, y al haber acudido a acervos relacionados con los precios de los granos y la supuesta actuación fenológica, no se puede decir que se cumplan los requisitos necesarios para establecer comportamientos o anomalías climáticas.

Las rogativas en el ámbito mediterráneo

La rogativa es una ceremonia religiosa que puede vincularse en ocasiones a situaciones ambientales anómalas, permitiendo una elevada resolución espacial y temporal. La veracidad de la información obtenida se asegura al consultar dos fuentes documentales distintas, pero coincidentes en la información que proporcionan (Martín y Barriandos, 1995), en tanto que las autoridades civiles y eclesiásticas se vinculaban para realizar las procesiones propias de los eventos climáticos más sobresalientes. Por lo general, tanto los cabildos civiles como eclesiásticos, crearon y conservaron los sumarios de las rogativas, lo que permite en nuestros días acceder a gran cantidad de extractos relacionados con este tema.

En Europa se ha logrado determinar, incluso,

la participación de los gremios urbanos y rurales, sin embargo, al menos en el caso de la Ciudad de México, no se ha podido reconocer la participación de tales colectivos, lo que permite percatarse de diferencias administrativas en el proceso de las ceremonias (en la capital novohispana y decimonónica se estipula, en casi todos los casos, que el conjunto del "público" desea, por las vicisitudes vividas, el consuelo e intercesión de la Virgen de los Remedios).

La fiabilidad de esta información no se desprende sólo de la existencia de dos fuentes documentales distintas, sino a su vez, de los costos económicos y de prestigio que significaba la realización de un ceremonial de este tipo (*ibid.*), en el que incluso la Inquisición podría llegar a actuar, si se daba el caso de una ceremonia desordenada o inadecuada.

Rogativas en la Ciudad de México

Las rogativas por causas climáticas tienen su mejor expresión en el reconocimiento de los capítulos de sequía, en tanto que la duración e intensidad de los diversos episodios se reflejan en cada ocasión. Los aspectos formales de cada ceremonia están íntimamente relacionados con el folklore local, con actos específicos de la liturgia y con la utilización de advocaciones específicas o reliquias locales. Para el México central se ha comprobado la posibilidad de consulta a una resolución de entre 1 000 y 2 000 km², al seguir el patrón de organización territorial impuesto a partir de finales del siglo XVI. Por ejemplo, para el estado de Hidalgo (20 813 km²) se ha determinado, de acuerdo con la jerarquía de sus cabeceras virreinales, la posibilidad de consulta en los acervos de quince localidades.

Por lo general, se han establecido cinco niveles de intensidad en el caso de sequías, según el ceremonial conducido. Para el caso de la Ciudad de México se han propuesto

capítulos de sequía de menor a mayor intensidad de acuerdo con el siguiente orden:

- I. Oraciones en silencio en una sola iglesia.
- II. Oraciones en voz alta en una o varias iglesias.
- III. Novenario sin procesión en el santuario de la Virgen de los Remedios o en la Catedral.
- IV. Novenario y procesión en el santuario o procesión, sin novenario, en la capital.
- V. Traslado de la Virgen de los Remedios a la capital y solemne procesión de la parroquia de la Santa Veracruz a la Catedral.

De entre los distintos extractos documentales considerados para demostrar el tipo de ceremonial y circunstancia ambiental en la realización de rogativas de nivel elevado, se trae a colación la siguiente, fechada el 17 de junio de 1761, en tanto que denota el carácter interregional de las sequías en el México centro-meridional y centro-septentrional:

... Procurador General dijo que respecto a experimentarse, no sólo en esta capital y comarca, sino en toda la Tierra Adentro, falta de lluvias, por lo que podría sobrevenir escasez de semillas y la más principal de maíz y también la de mortandad de ganados por la mucha seca y enfermedades y aunque ha llovido algo, ha sido en manchones y en diversas haciendas el daño de granizo, en que los labradores han perdido mucho trigo; con muchos otros accidentes que pueden sobrevenir, por lo que se haga una depresación o novenario a la milagrosísima imagen de Nuestra Señora de los Remedios, trasladándose de su santuario a esta Santa Iglesia Catedral y concluido se restituya a su santuario, descubriéndose el Divino y Santísimo Sacramento y haciéndose plegarias en todas las iglesias...

Anterior a la labor llevada a cabo a lo largo del año 2001, únicamente existía en México el antecedente en el estudio de rogativas con fines de reconstrucción climática, la investigación conducida por quien esto suscribe en 1998 (Garza y Barriendos, 1998). En ella solamente se accedió a los sucintos ramos de Los Remedios (Archivo del Distrito Federal) y Desagüe (Archivo General de la Nación), basándose el grueso de los datos consultados en la consulta de bibliografía contemporánea en la que se da cuenta de las rogativas de nivel V a la virgen de Los Remedios, entre 1590 y 1810. A pesar de no cumplir el indispensable requisito de haberse logrado la serie climática por medio de la consulta de una fuente continua y homogénea, la información provino, por lo general, de literatura dedicada a resaltar las bondades de la imagen de Los Remedios u otras advocaciones, con la excepción de los diarios de Guijo (1648-1664) y Robles (1665-1703), cuyas obras buscaban compendiar las eventualidades de la capital novohispana en su conjunto. Por ello que se puede argüir que, en su mayor parte, se trata de información homogénea, y el carácter continuo se consiguió al cubrirse en lo cronológico un acontecimiento definido de antemano.

RESULTADOS PARA LA CUENCA DE MÉXICO

Antes de comentar los resultados obtenidos después de la primer consulta integral y sistemática de acervos documentales con el fin de obtener datos climáticos, se desea comentar las calibraciones realizadas a partir de la comparación de la investigación precedente (arriba mencionada) y la realizada gracias al apoyo del programa UNESCO-ARCHISS. En este sentido, se corroboró la presencia de la fuerte anomalía de fines del siglo XVIII (Kington, 1988; Prieto y Herrera, 1992), que ayudó a complementar el faltante habido en las actas del cabildo civil, correspondiente a la etapa comprendida entre los años de 1644 a 1691.

Por medio del análisis sistemático de dos distintas fuentes documentales, continuas y homogéneas en su información, se logró definir la frecuencia y duración de sequías en la cuenca de México desde la última década del siglo XVI hasta el año de 1869. Los datos obtenidos, en los que se especifica el nivel de ceremonia conducida, permiten reconocer con precisión las fechas exactas en que se manifestó un capítulo de sequía y determinar si se prolongó por más de un año, lo que permite verificar su intensidad como su duración; así, el reconocer la intensidad con que se manifiesta un fenómeno de sequía permite calibrar la duración y características de un capítulo pluriannual de este fenómeno.

Toda esta información es indispensable en la construcción de los índices climáticos correspondientes a las sequías habidas en la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del siglo antepasado.

La escala del tipo de información obtenida se sitúa en el nivel regional, tanto por lo aseverado en textos concurrentes y precedentes dentro de esta línea de investigación, como por quedar así asentado en los documentos consultados que generalizan el efecto del capítulo de sequía para el conjunto de la cuenca de México, y en ocasiones llegan a mencionar su manifestación en los valles de Toluca, Puebla, El Bajío y el centro norte de la nación mexicana.

Uno de los resultados más interesantes, obtenidos por medio de la información proporcionada por los documentos provenientes de la ejecución de una rogativa, fue el reconocer que, lo que Grove (en prensa) ha clasificado como el fenómeno del Niño (ENSO) más relevante del pasado milenio y causante de la revolución francesa (fuerte anomalía ya reconocida en la literatura especializada desde hace casi un lustro), posiblemente sea parte de la pulsación más prolongada y fuerte de la denominada Pequeña Edad de Hielo para las latitudes tropicales del hemis-

ferio norte. A lo largo de más de sesenta años, los capítulos de sequía se encuentran asociados a fuertes heladas, fenómeno poco identificado con anterioridad o posteriormente.

Para la cuenca de México se detectó que de los años que propone Grove (1788-1795), correspondientes al mencionado ENSO, sólo en su inicio son coincidentes con ceremonias *pro pluvia* de nivel V. Existiendo capítulos de sequía entre las décadas de 1740 y 1800 más prolongados e intensos, es decir, los padecidos de 1761 a 1767 y de 1770 a 1776 (Tabla 1). La incógnita al respecto requiere de mucho trabajo para ser resuelta, en tanto que la LIA ha sido muy poco estudiada en el continente americano a la latitud del México central.

A su vez, al haberse podido fechar con precisión el nivel de ceremonia conducida, se logró en lo fundamental el reconocer la intensidad y duración del capítulo de sequía en forma anual y si llegó a conformar una anomalía más prolongada, información indispensable para la construcción de los índices climáticos correspondientes a las sequías habidas en la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del siglo antepasado.

La Figura 1 representa el resumen de la cantidad de rogativas pro-pluvia realizadas dentro del lapso de tiempo estudiado y durante los meses que fueron conducidas, su desglose anual permite obtener los resultados referidos al inicio de este párrafo.

ÍNDICES CLIMÁTICOS Y POTENCIALIDAD EN MÉXICO

El estado de investigación en los países que conformaron la monarquía hispánica se encuentra a principios del siglo XXI en un nivel tan embrionario, que los análisis y las interpretaciones que se han hecho a partir de los índices climáticos obtenidos es muy somera, prácticamente circunstancial; es decir, se

Frecuencia y duración de sequías en la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX

Tabla 1 Frecuencia y duración de las principales anomalías climáticas detectadas para la cuenca de México entre 1530 y 1869 (elaboración propia, obtenidas a partir de información proveniente de los cabildos civil y religioso de la Ciudad de México)

	SEQUÍA	HELADA	PRECIPITACIÓN
1555-1557	septiembre de 1555 a junio de 1557		
1597-1598	primavera de 1597 a primavera de 1598		
1604-1607			verano de 1604 a octubre de 1607
1615-1618	verano de 1615 a julio de 1618		
1620-1624	otoño de 1620 a primavera de 1624		
1627-1629			verano de 1627 a octubre de 1629
1639-1644	primavera de 1639 a primavera de 1644		
1661-1663	primavera de 1661 a primavera de 1663		
1692-1696	primavera de 1692 a primavera de 1696		primavera de 1692 a primavera de 1696
1701-1704	primavera de 1701 a primavera de 1704		
1711-1713	primavera de 1711 a primavera de 1713		
1717-1720	primavera de 1717 a julio de 1720		
1733-1735	agosto de 1733 a agosto de 1735		
1739-1744	invierno-primavera de 1739 a primavera de 1744		
1749-1751	verano de 1749 a primavera de 1751		
1753-1756	verano de 1753 a mayo de 1756		
1761-1767	primavera de 1761 a mayo de 1767		
1770-1776	primavera de 1770 a primavera de 1776		
1778-1780	abril de 1778 a mayo de 1780		
1785-1790	primavera de 1785 a primavera de 1790		
1798-1804	primavera de 1798 a mayo de 1804		
1808-1810	primavera de 1808 a junio de 1810		
1817-1818	mayo de 1817 a mayo de 1818		
1825-1829	mayo de 1825 a primavera de 1829		
1838-1841	primavera de 1838 a julio de 1841		

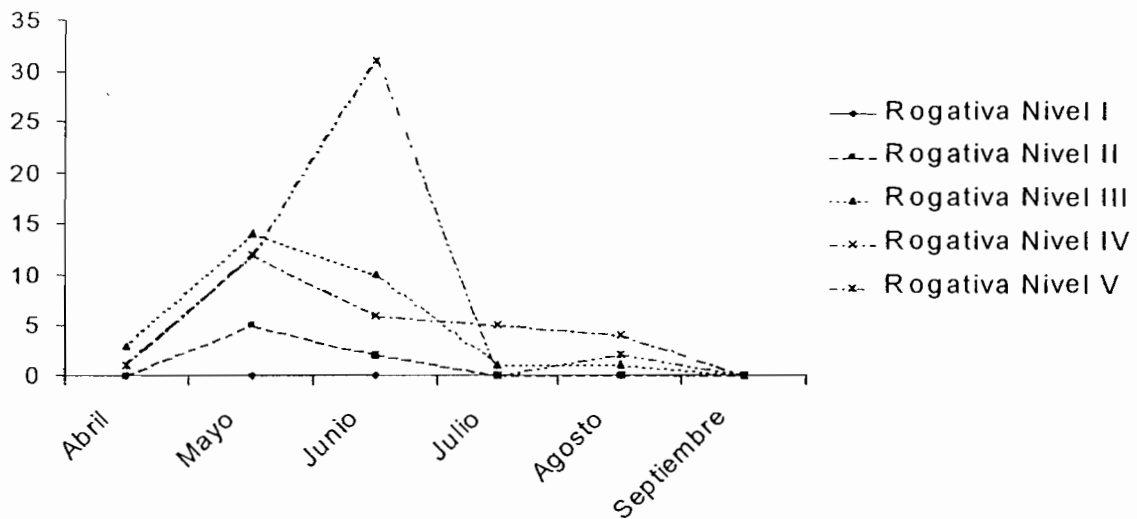


Figura 1. Gráfica con las rogativas realizadas por mes entre 1600-1869 (elaboración propia, obtenido a partir de información proveniente de los cabildos civil y religioso de la Ciudad de México)

han hecho series de índices directos de sequía a partir de las rogativas detectadas, ponderando las de mayor gravedad e índices a partir del registro de frecuencia de episodios de inundación, destacándose en lo posible las más graves, y se define si éstas comportaron daños menores, destrucción parcial o total de inmuebles y desaparición o transformación de elementos del relieve (Barriendos y Martín, 1998). Todo lo anterior no ha permitido obtener índices climáticos que puedan ser asimilables a través de las series instrumentales modernas. Esta labor es imposible de llevar a cabo en la cuenca de México, ya que como se ha mencionado, en este ámbito sólo ha sido posible identificar series de sequías.

En este sentido, no se descarta la posibilidad de que en otras regiones de México sea posible lograr la obtención de series de inundaciones y de sequías en una sola localidad. Sin embargo, en caso de obtenerse, requerirán de un arduo trabajo, en el que tendría lugar el solapamiento de los datos históricos y las series instrumentales modernas, lo que

podría dar lugar a series reconstruidas en un formato asimilado al de los datos modernos (grados centígrados en temperatura, milímetros en precipitación, etc.). Pero esta labor es meramente hipotética, en tanto que, en España, nuestro referente más cercano en este tipo de pesquisa, se intentó obtener a mediados de la década de los noventa, un solo índice de excesos y déficits hídricos (como ya se ha logrado en el centro de Europa), empleando valores positivos y negativos, con pruebas realizadas por medio de resoluciones anuales, en las que debido a la variabilidad del clima mediterráneo, se ha corrido el riesgo de que un mismo valor anual "esconda" circunstancias de signo contrario. Ha sucedido en algunos casos, el que los valores negativos o positivos, al sumarse aritméticamente, han anulado el signo de las anomalías climáticas y, así, un año con contrastes brutales puede quedar con un valor "0". En estos casos se estima que el total de la precipitación se acerca a la media, pero su calidad o distribución intranual ha resultado demasiado diversa.

Con lo obtenido en México hasta ahora, es posible dar lugar a la "normalización" de las series de rogativas, al analizar su comportamiento interno (frecuencia de fenómenos extremos, determinación de patrones en diferentes escalas temporales, por ejemplo, las oscilaciones en capítulos extremos de sequía de unos cuarenta años de duración, las cuales se perciben cuando se aplican las medias móviles de 30 años). Ello ha permitido identificar las pulsaciones extremas ocurridas dentro de la denominada Pequeña Edad de Hielo y, a su vez, extrapolar el comportamiento en eventos extremos en distintas coordenadas. Se ha podido verificar que las anomalías que para el México central y meridional significan sequías extremas, para la mayor parte de la península ibérica representan capítulos de prominente precipitación. Así, poco a poco se puede ir entretejiendo una red que permita la comprensión de tendencias y hechos climáticos en la larga duración y en un nivel, al menos, hemisférico (Figura 2).

Así, con lo logrado hasta este momento, se ha propuesto, en el Instituto de Geografía de la UNAM, la integración de los datos obtenidos por medios del estudio de las rogativas en la Ciudad de México, con los provenientes de las series instrumentales (en el caso de México, las habidas antes del movimiento revolucionario y las posteriores a la década de 1920). Lo que podría permitir la comprensión del comportamiento y frecuencia de sequías en un lapso cercano a los cuatrocientos años, labor inédita en nuestro país.

Después de la experiencia de investigación con estas finalidades, se asume como una herramienta muy plausible para el resto de México, centrándose el siguiente esfuerzo de pesquisa en las ciudades de Guadalajara, Morelia, Puebla, Querétaro y San Cristóbal de las Casas; en estas localidades se cree factible el contar con series continuas y homogéneas desde fines del siglo XVI hasta la década de 1860. Esto en una siguiente etapa de investigación, en tanto que las

Número de rogativas por períodos de treinta años

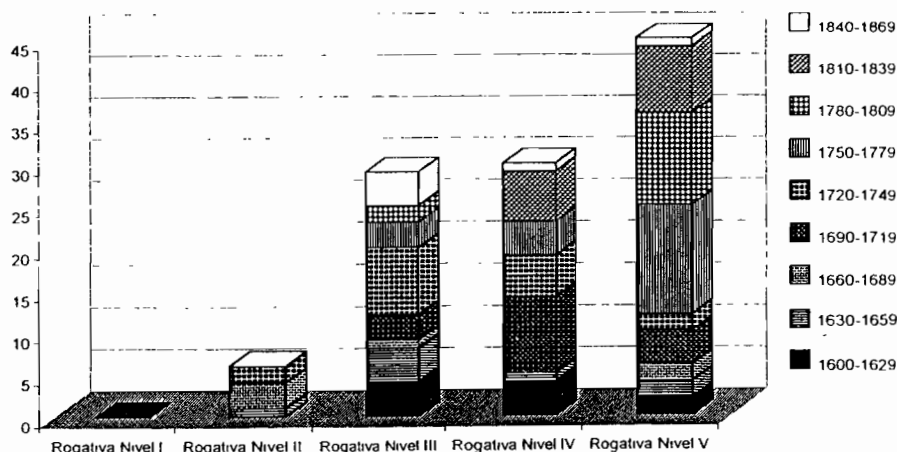


Figura 2 Gráfica con la cantidad de rogativas *pro pluvia* de distintos niveles, habidas en los treintenos comprendidos entre 1600-1869 (elaboración propia, obtenido a partir de información proveniente de los cabildos civil y religioso de la Ciudad de México)

coincidencias en la administración civil y eclesiástica del conjunto de tierras que estuvieron bajo el dominio español, favorece y asegura un alto grado de comparación entre múltiples series basadas en *proxy-data*.

La correlación climática con el comportamiento mórbico-epidémico; propuesta de una línea de investigación asociada

Asimismo, antes de concluir la presente exposición, se estima indispensable comentar una línea de investigación que impulsa en estos momentos el doctor Barriendos, concerniente al reconocimiento y comparación temporal de patrones mórbicos y anomalías climáticas. Para Barcelona, este autor ha podido establecer una correlación directa entre ambos fenómenos a lo largo del siglo XVIII y principios del XIX. Para la Ciudad de México se ha logrado una primera aproximación, al haberse estudiado los años comprendidos entre 1785 y 1800, lapso en el que los médicos de la capital novohispana mencionan la propagación de fiebres recurrentes y poco frecuentes con anterioridad y mismas que, a reserva de ahondar en el trabajo documental, parecen ser comunes a lo largo del siglo XIX y principios del XX (Barriendos y Garza, en revisión).

AGRADECIMIENTOS

La posibilidad de llevar a cabo un estudio continuo y sistemático de fuentes documentales no hubiese sido posible sin el apoyo del programa ARCHISS-UNESCO. Para su director en América Latina, el Dr. Alain Gioda, el más profundo reconocimiento por su constante confianza y aliento. Asimismo, se desea agradecer al Dr. Manuel Ramos Medina, director del Centro de Estudios de Historia de México de CONDUMEX, por haber aconsejado y permitido la utilización del material microfilmado de su institución

REFERENCIAS

- ❏ Archivo de la Catedral de México; Actas de Cabildo: Consulta en material microfilmado perteneciente al Centro de Estudios de Historia de México de CONDUMEX libros 1 al 87 (1536-1869), años faltantes: 1702 a 1705 y 1858 a 1860.
- ❏ Archivo del Distrito Federal, Actas de Cabildo del Antiguo Ayuntamiento de la Ciudad de México: consulta en material impreso de 1524 a 1643 y de 1692 a 1723 (volúmenes 629a a 668a y 371-A a 372-A); consulta de expedientes originales de 1723 a 1869 (volúmenes 49-A a 192-A), años faltantes: 1644 a 1691, 1694 a 1697, 1807 y 1853.
- ❏ Archivo General de la Nación; Ramo de Desagüe, vols 4, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22 y 25.
- ❏ Barriendos Vallvé, M (1994), *El clima histórico de Cataluña. Aproximación a sus características generales (siglos XV-XIX)*. tesis doctoral, Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, Universitat de Barcelona, Barcelona, España.
- ❏ Barriendos Vallvé, M. y J. Martín Vide (1998), "Secular climatic oscillations as indicated by catastrophic floods in the Spanish Mediterranean Coastal Area (14th-19th Centuries)". *Climatic Change*, no., 38, pp. 473-491
- ❏ Camuffo, D. y S. Enzi (1991), "Locust invasion and climatic factors from the Middle Ages to 1800", *Theoretical and Applied Climatology*, 43, pp. 43-73.
- ❏ Camuffo, D y S Enzi (1992) "Reconstructing the climate of Northern Italy from archive sources", en Bradley, R. S y P.D Jones (eds.), *Climate since 1500 A.D.*, Routledge, Londres
- ❏ Camuffo, D., C. Cocheo y S. Enzi (2000), "Seasonality of instability phenomena (hailstorms and thunderstorms) in Padova, Northern Italy, from Archival and instrumental sources from AD 1300 to 1989", *The Holocene*, 10 5, pp 651-658
- ❏ Florescano, E (1969), *Precios del maíz y crisis agrícolas en México*, El Colegio de México, México

- ☐ Florescano, E (2000), *Breve historia de la sequía en México*, CONACULTA, México
- ☐ Garza Merodio, G y M Barriendos Vallvé (1998), "El clima en la historia", *Ciencias*, núm 51, UNAM, México, pp 22-25
- ☐ Guijo, G de (1952), *Diario 1648-1664*, 2 tomos, Porrúa, México
- ☐ Kington, J. (1988), *The weather of the 1780s over Europe*, Cambridge University Press, Cambridge
- ☐ Lamb, H. H (1972), *Climate. past, present and future (I). Fundamentals and climate now*, Methuen, Londres
- ☐ Lamb, H. H. (1977), *Climate: past, present and future (II) Climate history and the future*, Methuen, Londres.
- ☐ Lamb, H. H. (1982), *Climate, history and the modern world*, Methuen, Londres
- ☐ Lamb, H. H. (1988), *Weather, climate and human affairs*, Routledge, Londres
- ☐ Le Roy Ladurie, E. (1967), *Histoire du climat depuis l'an mil*, Flammarion, Paris
- ☐ Meserli, B. et al. (1978), "Fluctuations of climate and glaciers in the Bernese Oberland, Switzerland, and their geoecological significance", *Arctic and Alpine Research*, 10, pp. 247-260
- ☐ Martín Vide, J y M. Barriendos Vallvé (1995), "The use of rogation ceremony records in climatic reconstruction a case study from Catalonia (Spain)", *Climatic Change*, 30, pp 201-221
- ☐ Pfister, C. (1988), *Klimageschichte der Schweiz, 1525-1860, Das klima der schweiz von 1525-1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft* Paul Haupt, Berna
- ☐ Prieto, M. R. y R. Herrera (1992), "Las perturbaciones climáticas de fines del siglo XVIII en el área andina", en *VVAA: el noroeste argentino como región histórica. Integración y desintegración regional. Estudio del país interior* Junta de Andalucía, Sevilla, España
- ☐ Robles, A de (1946), *Diario de sucesos notables 1665-1703*, 3 tomos, Porrúa, México
- ☐ Rodrigo, F. S. (1994), *Cambio climático natural La pequeña Edad del Hielo en Andalucía Reconstrucción del clima histórico a partir de fuentes documentales*, tesis Doctoral, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada, España.

INVESTIGACIONES GEOGRÁFICAS

Editor Académico
Atlántida Coll-Hurtado

Editor Técnico
Martha Pavón López

Revisor de estilo y redacción
Eva Saavedra Silva

Consejo Editorial

Horacio Capel Sáez - Universidad de Barcelona, España
Aurora García Ballesteros - Universidad Complutense de Madrid, España
Ernesto Jáuregui Ostos - Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México
Doreen B. Massey - The Open University, Reino Unido
Sarah E. Metcalfe - University of Edinburgh, Reino Unido
Milton Santos † - Universidad de São Paulo, Brasil
Moshe Inbar - University of Haifa, Israel
Carlos Valenzuela - International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Países Bajos y Universidad Mayor de San Simón, Bolivia
Ann Varley - University College of London, Inglaterra
Menno Vellinga - Universidad de Utrecht, Países Bajos
Herman Th. Verstappen - International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Países Bajos
Alfred Zinck - International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Países Bajos

Comité Editorial

Adrián Guillermo Aguilar Martínez
Concepción Basilio Romero
Atlántida Coll-Hurtado
José Lugo Hubp
Laura Luna González
José Omar Moncada Maya
Marío Arturo Ortíz Pérez
Martha Pavón López
Álvaro Sánchez Crispín
María Teresa Sánchez Salazar

Indexado: *Geographical Abstracts; Periódica; Current Geographical Publications, GeoDatos, Elsevier BIOBASE y Elsevier Geo Abstracts, ASFA.*

Incluida en el Índice de Revistas Científicas Mexicanas de Excelencia (CONACyT)

Primera edición, agosto de 2002
DR © Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geografía

Impreso y Hecho en México
ISSN 0188-4611

Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto de Geografía de la UNAM, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, México, D. F., Apdo. Postal 20-850, con un tiraje de 500 ejemplares. Los artículos publicados son responsabilidad de los autores. El material publicado puede reproducirse parcial o totalmente, siempre y cuando se dé crédito tanto a los autores como a la revista. Núm. de Certificado de Licitud de Título (7357), Núm. de Certificado de Licitud de Contenido (5306), Núm. de Reserva al Título en Derechos de Autor (en trámite).

Investigaciones Geográficas no cuenta con suscripción. Distribución y venta, Instituto de Geografía, UNAM, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, México, D. F., Apdo. Postal 20-850, teléfono (52)56 22 4338 y fax (52)56 16 0539. Para mayor información. E-mail edito@igiris.igeograf.unam.mx

Página WEB: <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/boletin.html>

15. Résumé : José María Bozo y la meteorología de La Paz (1828-1832) - 2000
(avec Ana Forenza)

Archivo y Biblioteca Nacionales
de Bolivia

ANUARIO
2000



Sucre

Sucre – Bolivia
2000

**JOSÉ MARÍA BOZO Y LA METEOROLOGÍA
DE LA PAZ (1828-1832)¹**

"Como las aves, como las ovejas, como las abejas, como los bueyes trabajan para otros, así vosotros patriotas de la independencia, trabajasteis para otros. Para los que peleaban por ser esclavos". Bozo, Diario, 1828-32, f. 86^v.

Alain GIODA
Hidrólogo. IRD – SENAMHI, C.P. 2352,
Cochabamba
Ana FORENZA
Archivista, C.P. 1125, Sucre

Resumen

Primeramente presentaremos una corta biografía del autor (quien trabajó conocimiento con D'Orbigny en 1830) de esta pieza única, el Diario, conservada en el Archivo Nacional de Bolivia, que permite seguir, casi día a día, el clima de La Paz entre enero de 1828 y junio de 1832. Luego, se mostrarán algunos ejemplos de análisis del Diario y,

¹ Este trabajo fue presentado en el marco del Seminario ARCHISS-Cono Sur (26-27-28 de Octubre de 1999) en la Universidad Andina Simón Bolívar de Sucre. El Seminario ARCHISS (Archival Climate History Survey) fue auspiciado por la Unesco (Programa Hidrológico Internacional), ABNB, UASB, IRD, SENAMHI y la Alianza Francesa de Sucre.

finalmente, presentaremos una interpretación de sus datos ubicándolos en el contexto de las observaciones meteorológicas modernas de San Calixto, sabiendo que el Diario de Bozo fue escrito en parte durante un fenómeno climático importante: El Niño de 1827-29.

Introducción

Tres características del Diario de Bozo son importantes para reconstruir el clima de Bolivia a pesar de la brevedad de sus observaciones que no pasan de 4 años y medio.

- a) Es el primer testimonio fiable de la meteorología boliviana, redactado con un gran rigor al inicio de la República. Sólo reúne observaciones meteorológicas y no datos cifrados. Se parece un poco a los cuadernos de bitácora de los navegantes.
- b) Fue escrito durante un período de convulsión política - los inicios de la República - durante el cual las informaciones de tipo serial son raras en historia, fuera del "Cóndor de Bolivia" (un periódico de Chuquisaca, hoy en día Sucre, publicado entre 1825 y 1828 y que da algunas informaciones climáticas) y de "El Boliviano" (otro periódico entre 1829 y 1841).
- c) Permite conocer el impacto eventual en la región de La Paz del fenómeno El Niño de 1827-28-29 que afectó a Chile central y que también fue reconocido en 1828, a lo largo de las costas del norte de Perú.

La existencia de este primer testimonio científico nacional en la joven república boliviana no podía provenir sino de una personalidad fuerte que cortó violentamente con la mediocridad general de la vida intelectual local y que se opuso al militarismo a través del sarcasmo y del humor.

1. José María (Diógenes) Bozo, un talento ignorado

José María Bozo (Santa Cruz 1780 - †La Paz 1864) fue un varón en extremo original y curioso, como también un personaje notable del inicio de la República; abogado de la Audiencia de Charcas en 1806, clérigo de la prima tonsura en La Plata (hoy Sucre) en 1807 y sobre todo diputado de Santa Cruz en el Congreso Constituyente de Bolivia de 1826-27.

Realista durante su juventud, luego republicano de impronta liberal, indigenista toda su vida, Bozo era radical por principio y odiaba todo lo que es dominación y superioridad (Gutiérrez, 1879; Vázquez-Machicado, 1988a).

Su amor por la naturaleza, su verdadera vocación, se concretó en 1814; Bozo resolvió ir en busca de ella, por huir de la revolución con la llegada a Santa Cruz de militares argentinos encabezados por Warnes, y se marchó a la misión franciscana de Ilobulo, entre los indios Yuracarés del Chaparé. Allí permaneció año y medio. Durante este tiempo estudió la botánica y se ocupó de curar a los misionarios, utilizando hierbas de los campos. Dos veces viajó a Mojos para traer plantas, conocimientos útiles, y además plantó 1500 árboles en una chacra, todo lo cual dejó en donación a las misiones en 1815. Fray Francisco de la Cueva, Superior de la Misión de Ilobulo, certifica que Bozo durante toda su permanencia en este lugar

"ha observado una vida irreprochable, ejemplar y utilísima a estas gentes [los indios]. Jamás se lo veía ocioso, sino o estudiando, o con el trabajo de sus manos y sudor de su rostro cultivando aquellas plantas útiles, que algún día pudieran contribuir a la subsistencia, comodidad y recurso en sus enfermedades de esta Nación, de sus conversores y de los que pudieran acercarse por acá" (en Vázquez-Machicado, 1988a: 529).

Después de una breve estancia en Cochabamba donde posiblemente se encontró con el gran naturalista de Bohemia, Tadeo Haënke, que se habría retirado a su hacienda de Yuracarés hasta su fallecimiento en 1817 (Groussac, 1900), Bozo se traslada a La Paz en enero de 1816.

Aparte de su tarea en botánica y meteorología, Bozo (1816; 1822; 1828-32) desempeñó con un fuerte espíritu de independencia cargos en la judicatura y en la instrucción como profesor universitario. Bozo era de gran seriedad científica. Se estimaba muy en alto su gran saber y ello le valió su profesorado de derecho, sus vocalías examinadoras y el ser miembro de varias comisiones codificadoras.

José María Bozo manifiesta, en su trabajo de abogado, un marcado sentimiento social -sin duda consecuencia en parte de su formación religiosa profunda-, sentimiento poco compartido al inicio de la República. Así, en 1817, *"el Dr. Don José María Bozo fue Defensor General de los pobres, nombrado por el ayuntamiento de la - - -"*

16. Résumé : History of Climate, Jesuits and Meteorology in Ecuador with special reference to the El Niño of 1925 - 2005 (*avec Alfredo Terneus*)



1st Alexander von Humboldt International Conference

on

The El Niño phenomenon and its global impact



CIIFEN

International Research Center on El Niño

Guayaquil, Ecuador, 16-20 May, 2005

Receipt of Abstracts: October 11, 2004

Pre-Registration: January 31, 2005

-
- General Contact
 - Objectives and Topics of the Conference
 - Keynote Speakers
 - The Alexander von Humboldt Medal for Researchers
 - Scientific Committee, Organizing Committee
 - Calendar of Events
 - Conference Programme
 - Submission of Abstracts
 - Proceedings
 - Registration & Accommodation
 - Venue/Conference Room/Posters
 - Travel
-



European Geosciences Union

International Research Center on El Niño

History of Climate, Jesuits, and Meteorology in Ecuador with special reference to the El Niño of 1925

A. Terneus, ARCHISS Group, Calle Guaranda 131, Quito, Ecuador

A. Gioda, UR 32 Great Ice, IRD, B. P. 64501, 34394 Montpellier, France
gioda@msem.univ-montp2.fr

Abstract

The initial part of this study is focused on the history of climate from the Colonial era (17th century-1824) based in Quito on rogation ceremonies and municipal proceedings. After the first meteorological data collected in Ecuador by scientists in mission (La Condamine, 1738, and Humboldt, 1802), attempts to build a national meteorological network from the 1860's, were closely linked to President Gabriel Garcia Moreno and the Jesuits. The El Niño phenomenon in 1925 was the first important meteorological episode recorded with scientific instrumentation in Ecuador, and newspaper archives also provide an important complementary source of information about the impact of this extreme event.

Conclusions

At this stage of our research using historical documents, it appears that there were more extreme events, especially droughts, during the 17th century than the 18th century.

Continuous observations in meteorology began from 1891 in Quito after the first attempts by explorers (such as La Condamine, 1738) and the Jesuits (1864-1876). Records documenting the 1925 El Niño phenomenon show on the Ecuadorian coast greater precipitation than the 1982-83 episode. If such an event was to occur today, with the greater population and infrastructural densities, the impact would be certainly more catastrophic.

Main References

Archival sources in Quito for meteorological research:

National History Archives

Astronomic Observatory

Aurelio Espinosa Pólit Library

Library of the Pontifical Catholic University of Ecuador

Acosta Solís, M.: Breves anotaciones sobre la historia de la climatología del Ecuador, Imprenta Ecuador, Quito, 1944.

Aguilar, F. C., s. j.: Boletín meteorológico – Resumen de las observaciones meteorológicas hechas en el Colegio Nacional de Quito, desde le 7 de junio de 1864 hasta el 7 de junio de 1865, Imprenta Nacional, Quito, 1865.

Aguilar, F. C., s. j.: Boletín meteorológico del observatorio del Colegio Nacional de Quito. Segundo año 1866, Imprenta Nacional, Quito, 1868.

Alenten, J. B.: Historia y descripción del Observatorio Astronómico de Quito, Imprenta Nacional, Quito, 1877.

El Telégrafo: Las inundaciones en la via férrea, n°14.280, 23 de marzo, Newspaper, Guayaquil, Ecuador, 1925.

17. Petit Age de Glace, lichens et archives religieuses - 2004 (*avec Vincent Jomelli, Antoine Rabatel et Gaston Demarée*)

Petit âge de glace, lichens et archives religieuses

Alain GIODA, Vincent JOMELLI et Antoine RABATEL

Pendant au moins 300 ans, un épisode de refroidissement général fut entrecoupé par des épisodes caniculaires. Les archives climatiques, ici étudiées plus spécialement dans les Andes, sont les lichens et les écrits des jésuites et des franciscains.

L'historien Emmanuel Le Roy Ladurie propose dans son *Histoire du climat depuis l'an mil*, de limiter le petit âge de glace en Europe à la période entre 1550 et 1850. Le terme « petit âge de glace » a été inventé en 1939 par le Nord-américain François-Émile Matthes pour décrire « une époque de glaciation modérée qui suivit la période la plus douce de l'Holocène (la période la plus récente de l'ère quaternaire) ». Il décela ce radoucissement en étudiant les moraines des glaciers de la Sierra Nevada, en Californie : peu érodées, les moraines frontales de ces glaciers étaient donc récentes et témoignaient d'une avancée suivie d'un recul des glaciers. Comme de telles formations existent aussi dans les Andes (*voir la figure 1*), devait-on en déduire l'existence d'un autre petit âge de glace ? Les petits âges étaient-ils concomitants ? L'étude de cette alternance de climats avec ses pics de températures pourrait apporter des enseignements aux fluctuations actuelles du climat.

Ces moraines, et donc l'âge des événements climatiques, appartiennent à une époque antérieure à l'invention des instruments de mesures. De plus, les moraines sont au-dessus de la limite des arbres, et la dendrochronologie (*voir l'ar-*

ticle de David Houbrechts dans ce numéro) n'est pas applicable. Par ailleurs, au début du petit âge de glace, au XVI^e siècle, la météorologie scientifique n'était pas encore en place. Nous nous sommes donc tournés vers les textes religieux et les lichens.

Les archives religieuses

Les archives de la Chambre des comptes de la Savoie avaient déjà permis de retracer une histoire de la Mer de glace. Dans les Andes, dans le sillage des conquistadors venus pour trouver or, argent et pierres précieuses, de nombreuses villes minières ont été fondées, parfois à plus de 4 000 mètres d'altitude : par exemple, Cerro de Pasco, au Pérou, et Potosi, en Bolivie.

Dans ces cités rapidement devenues richissimes (les nobles Espagnols possesseurs d'une prébende y faisaient fortune en quelques semaines), l'empire très catholique des Habsbourg encouragea l'action des ordres religieux. Les jésuites, derniers arrivés en 1568, jouirent d'une large autonomie surtout au Paraguay et en Chine. Ils furent aidés par leur solide formation universitaire et le développement de la science moderne à partir de l'astronomie. Grâce à cette excellence, ils purent étudier avec précision l'été caniculaire, à Pékin,

en 1743 (*voir l'encadré de la page 102*). Cette anomalie climatique eut lieu pendant le petit âge de glace dont les trois périodes de températures minimales se situent, dans la région méridionale chinoise, entre 1470 et 1520, puis entre 1620 et 1740 et enfin, entre 1840 et 1890.

Jusqu'au règne de Charles III (1716 ; 1788), qui débuta en 1759, les historiens et les scientifiques étaient presque exclusivement des religieux dont le plus grand fut l'astronome Buenaventura Suarez au Paraguay. Avec les *Lumières* introduites par ce roi espagnol, des laïques et des étrangers, dont l'Allemand Alexander von Humboldt (1769 ; 1859), remplacèrent ces religieux, notamment après l'expulsion des jésuites d'Amérique, en 1767, sur ordre de la couronne.

Avec les nouveaux États nés du démembrement des empires espagnol et portugais, à partir de 1814, les jésuites revinrent dans le jeu scientifique. Un réseau d'observatoires astronomiques, météorologiques et géophysiques jésuites revit le jour au XIX^e siècle quand le petit âge de glace s'effaçait dans l'histoire. On trouvait ces observatoires à Cuba, au Mexique, en Colombie, en Bolivie, mais aussi aux Philippines, en Chine, en Inde dans l'actuel Bangladesh, à Madagascar, en Rhodésie devenue le Zimbabwe...



V. Jomelli

1. LE GLACIER MÉRIDIONAL DU CHARQUINI, près de La Paz, en Bolivie, culmine à une altitude de 5398 mètres. Les moraines frontales (les bourrelets rocheux) correspondent à des avancées du glacier pendant le petit âge de glace. Le retrait de la moraine la plus externe (à

gauche) serait daté de 1630-1670 par lichénométrie. Ensuite (*de gauche à droite*), les datations proposées des différentes moraines vont de 1730, 1775, 1790... jusqu'à 1930, marquant le recul du glacier qui a probablement connu des pulsations intermédiaires.

Si le phénomène fut d'abord identifié dans l'hémisphère Nord, les études se multiplièrent pour retrouver toutes ses traces dans le paysage et dans les archives. L'idée que le petit âge de glace était un phénomène mondial a été soutenue, depuis les années 1950, par le géographe Jean Grove, à partir d'indices trouvés en Norvège, au Groenland, dans les Alpes et en Chine.

Un phénomène mondial : le petit âge de glace

L'hypothèse a été reprise en 2001 par Diane Dalziel, de l'Université d'Arizona. Elle a été confirmée par notre expérience

Sud-américaine qui a pour cadre les Andes, la plus grande chaîne de montagnes de direction méridienne de la Terre avec ses 8 500 kilomètres de long.

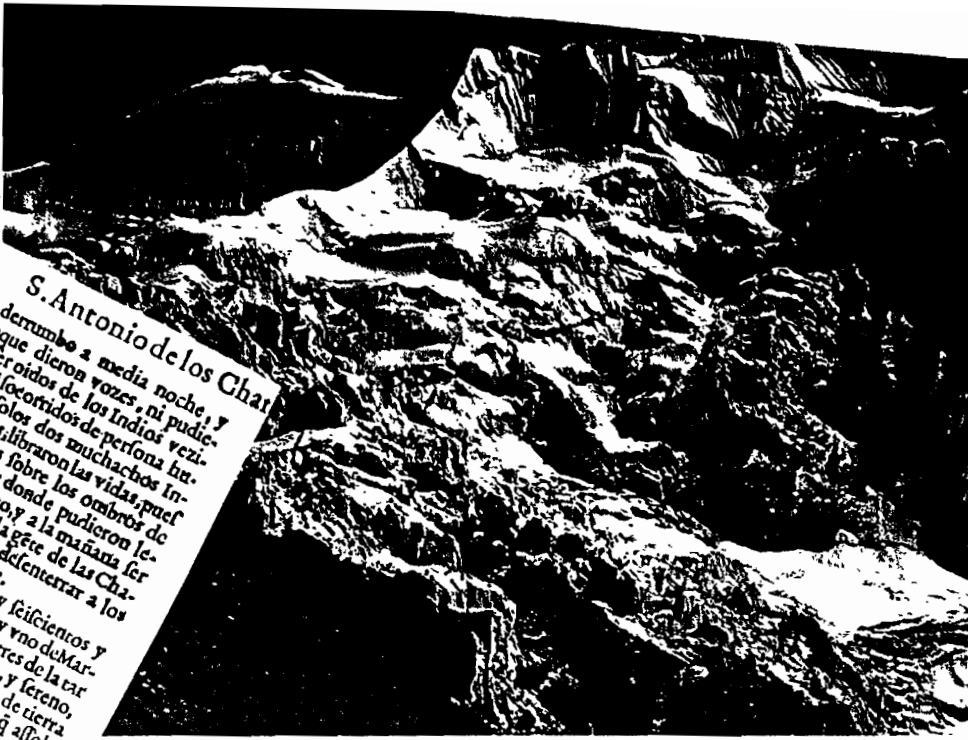
Grâce au dépouillement des journaux de bord des navigateurs, l'historienne argentine Rosario Prieto a montré que le détroit de Magellan, qui coupe l'extrémité méridionale des Andes, était encombré par les icebergs entre 1520 et 1670. Ensuite, les archives de Potosi décrivent deux périodes de froid extrême : entre 1560 et 1641, puis entre 1780 et 1820. Cette dernière période correspond à celle identifiée par des mesures de carottage isotopiques dans les glaces du volcan

Quelccaya, du Sud du Pérou, par l'équipe du Nord-américain Lonnie Thompson.

Les textes franciscains constituent également un fonds documentaire utile à l'étude des froidures en Bolivie (*voir la figure 2*). Ainsi, Diego de Mendoza mentionne dans sa *Cronica de la Provincia de Charcas* qu'un grand bloc de glace s'est détaché du glacier de l'Illimani, qui culmine à 6 450 mètres d'altitude, le 13 mai 1647. Cette chute au cœur du petit âge de glace résulte d'un tremblement de terre récemment daté par Angel Vega, de l'Observatoire jésuite de sismologie de La Paz. Son épicentre était au Chili, où

...sucedió lo mesmo, húdiédo
e todo el pueblo, y habitantes y
quarentay siete, se desgajó del cer
ro gráde de la cordillera, catorze
leguas de Chuquiabo, llamado
Illimani, ran grá pedazo de nie-
ve, de fde la cúbre del cerro a zia el
Oriente (toda empedermida de
los muchos siglos q ania estana
coagelada, y de los vapores de la
misma tierra, estana denegrída
en partes, y en partes azul) dió ca-
si media legua de salto, por auer
encórrado al caer en vna peña vi-
ua y dió en vnas caferías de In-
dios, q estana en sus embriague-
zes, maró mas de veinte personas,
entre andolos en sus mismas ca-
sas, sin poder tener recario, por ser
el

S. Antonio de los Chas
el derumbo a media noche, y
aunque dieron voces, ni pudie-
ron ser oídos de los Indios vezi-
nos, ni foxorridos de persona vezi-
mana: solos dos muchachos In-
diolos libraron las vidas, pues
de pies sobre los ombros de
uno, de donde pudieron ler-
gírse, y a la mañana ser-
y desenterrar a los
... de mil y seiscientos y
... a treinta y vno de Mar-
... estando el día claro, y sereno,
huvo tan gran temblor de tierra
en la ciudad del Cuzco, q assaló
lo mas de ella; duró poco mas de
dos Credos rezados, pero con tan

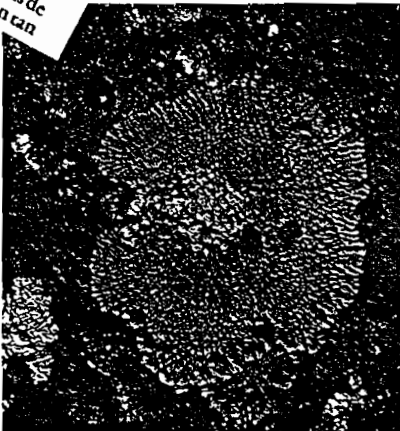


2. LA CRONICA DE LA PROVINCIA DE CHARCAS, du franciscain Diego de Mendoza, décrit la chute d'un sérac (un bloc de glace) survenue le 13 mai 1647 dans le glacier de l'illimani (6450 mètres d'altitude), en Bolivie. Près de là, plus de 20 Indiens ont péri dans la catastrophe. Ce type d'accident est caractéristique des périodes d'avancées de glaciers qui s'approchent des hameaux et des villages.

relation entre la taille du lichen et son âge est déterminée directement en suivant, pendant plusieurs années, la croissance de nombreux individus.

Dans la cordillère Blanche du Pérou, des moraines du petit âge de glace ont été datées par les lichens. Une première avancée des glaciers aurait été identifiée entre 1580 et 1660 : elle correspond aux moraines situées jusqu'à 600 mètres en aval du front actuel des glaciers. Une seconde avancée daterait du début du XIX^e siècle.

En Bolivie, les études des lichens dans le glacier Charquini (voir la figure 1) montreraient que le front a atteint sa position la plus avancée entre 1650 et 1670. Le petit âge de glace semble donc relativement synchrone au Pérou et en Bolivie, des observations effectuées sur d'autres glaciers indiquant une avancée maximale autour de 1640. Toutefois, ce maximum dans les Andes tropicales serait décalé par rapport à ce qui a été observé en Europe où la poussée majeure est, selon les régions alpines, tantôt datée de la fin du XVI^e et du début du XVII^e siècle, avec de fortes chutes des températures moyennes,

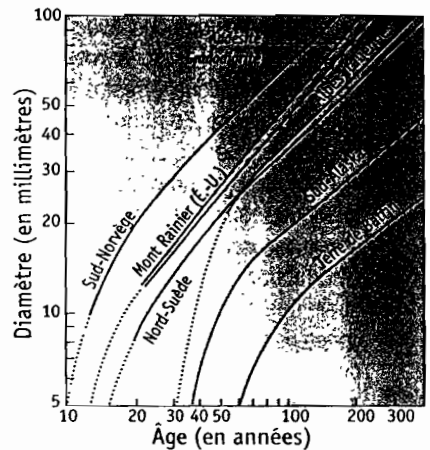


3. LES LICHENS (à gauche) croissent sur les surfaces rocheuses de façon régulière. Leur diamètre est donc une fonction du temps, mais aussi de la nature du support. Connaissant les caractéristiques régionales de cette croissance (à droite), on peut dater la mise à nu des roches.

ou tantôt datée du début du XIX^e siècle. Encore fragiles en raison du petit nombre de cas étudiés, les résultats de la lichénométrie andine sont toutefois en accord avec ceux des analyses des variations isotopiques de l'oxygène 18 des carottes de glace des sommets voisins.

Les résultats obtenus montrent l'intérêt des études comparatives des traces du petit âge de glace, notamment dans les Andes. On sait aujourd'hui, d'une part, qu'il n'était pas synchrone à l'échelle de la Terre et, d'autre part, que des années très chaudes ponctuèrent cette période.

Les causes du petit âge de glace et de ses variations sont à rechercher du côté de la variabilité de l'activité solaire. Ce petit âge de glace constitue l'ultime période où l'influence de l'activité humaine n'apparaît pas dans les méca-



nismes du climat et il est aussi un important avantage pour son étude, proche de notre temps. Le petit âge de glace est donc une période cruciale pour la compréhension des changements climatiques naturels... et des variations actuelles.

Alain GIODA travaille à l'Institut de recherche pour le développement, à Montpellier, et anime le projet ARCHISS (Archival Climate History Survey) en Amérique latine. Vincent JOMELLI est géomorphologue à l'UMR CNRS 8591, à Meudon. Antoine RABATEL étudie à l'IRD, à La Paz.

P. NAVEAU, V. JOMELLI, D. COOLEY et A. RABATEL, *Modeling Uncertainties in Lichenometry Studies*, in *Quaternary Research*, (à paraître), 2004.

J. M. GROVE, *The Little Ice Age*, éd. Routledge, London & New York, 1988 & 2004.

V. UDIAS, *Searching the Heavens and the Earth: The History of Jesuit Observatories*, éd. Kluwer, Rotterdam, 2003.

18. Water, civilizations and governance - 2003/2004 (*avec Mike Baker*)

Water, civilizations and governance

ALAIN GIODA¹ & MIKE BAKER²

1 Greatice, IRD, B.P. 64501, 34394 Montpellier cx 5, France

2 ARCHISS, Moutas, 26110 Venterol, France
gioda@msem.univ-montp2.fr

Abstract Water science, initially applied, has evolved in an interactive mode with civilization. Although it is difficult today to imagine civilization in a non-urban context, with the expansion of cities in the 20th century civilization began in small groupings of families, in caves or other shelters. The disappearance of civilizations is usually on a secular scale similar to that of major droughts, which have tended to destroy purely agrarian societies. However, subsidies in industrialized countries, and technical progress have decreased such outcomes. Progress produces other problems such as in the construction of large dams, their societal and ecological effects, and sometimes of their rupture. Such catastrophes bring with them the pressures of global communication systems and of rumour. They also lead to criticism of engineers and scientists, who are increasingly pressurized to produce results of practical importance. Such a role of governance in water science is not always beneficial.

Key words Andes; China; civilizations; dams; disasters; Egypt; Mesopotamia; rivers; Rome; scientific progress

INTRODUCTION

One of the first historical references to water science in relation to governance is to the semi-legendary Chinese Emperor Yu the Great (about 4200–4000 years ago), who “mastered the waters” of the Yangtze and is considered to be the patron of hydraulic engineers. Some attempts have been made to date the beginning of civilization, inasmuch as it involves a series of processes, many are unrecorded, from animal-like simian ancestors to the present but this has so far proved impossible. However, some authors link it to the beginnings of collections of man-made shelters and of primitive, sometimes irrigated, agriculture and as populations grew, irrigation became more and more important and widespread. It seems probable that some of the first rules of governance were linked to water use and the protection of water quality, as the size of communities grew and pressures on free access to water increased. This led to the introduction of channels and pipes and later to methods for measuring the amount of water delivered. With the growth of civilization the Earth became divided into territories, nations and States. Today there are more than 200 international river basins, some of which are a cause for conflict; especially when upstream States divert or store water affecting downstream flow rates, or when downstream States are more powerful than upstream ones. Commercialization of water and projects such as the Global Water System Project are likely to not only affect the independence of hydraulic engineers, but also the independence of hydrologists and other scientists.

THE RISE OF CIVILIZATION IN RURAL AND URBAN AREAS

Although there is a tendency today to associate civilization with urban complexes, it began with the first groupings of hunters, fishers and nomads. Today such groups continue to exist in extreme environments such as hot and cold deserts and high mountain areas: a demonstration of how human beings are able to adapt.

However, the major advances have come from large groups in urban areas which have evolved with human ability to harness water and to convey it to where it is most needed. With this ability has come the growth of cities and of water use/abuse. The recorded beginnings of urban civilization started about 6000 years ago in Sumer. A study of these historical civilizations shows that they initially evolved in proximity to rivers or lakes. Several authors have linked rivers in tandem with civilizations: China–Yangtze, Egypt–Nile, Harrapa–Indus, Mesopotamia–Euphrates and Tigris (Garbrecht, 1987; Viollet, 2000), but some, such as the Tiwanaku-Lake Titicaca, are less often cited. With these civilizations, except for Tiwanaku, writing began to evolve and the first written records of civilization along with hydraulics and applied hydrology (the nilometers 4500–4000 years ago).

In *De Aquis Urbis Romae* Frontinus, chairman of the Roman water supply administration (AD 97–103), indicated that for about four and a half centuries the people were satisfied with the water drawn from the Tiber, but then aqueducts had to be built to carry water to the city (Garbrecht, 1987). He also drew attention to the adjutages that assisted the authorities in calculating the amount of water delivered. He associated his Emperor Nerva (AD 96–98) with plans that led to the improvements in the day-to-day health of the people and the cleanliness of the city: an early example of the role of governance in water science.

History shows that the control of water and of water works has served different purposes, sometimes utilitarian, sometimes for pleasure, sport, etc. The use of water was fundamental in the early measurement of time, an essential for governance, with clepsydra or water clocks which were invented independently in Mesopotamia and Egypt (about 4000 years ago).

Since historical times water has had a role in purification and as civilization and religions have developed, so have their interactions with water science. Water in the form of the Great Flood was believed to have purified the Earth and today, water continues to play a special role in some religions from birth and baptism to death. One should not ignore the role of the religious hierarchy in governance and, in historical times, in the special uses of water.

The influence and size of towns and cities governs the major use of water in civilizations and empires. Urban authorities play a major role in decisions on water use, but the main part is always used in agriculture. When these empires cease to exist, because of natural or human events, the sophisticated systems of irrigation and of water conveyance disappear or fall out of use: sometimes to be renovated several hundreds of years later, as with khanats today.

ROLE OF WATER IN THE DEVELOPMENT AND DISAPPEARANCE OF CIVILIZATION

As indicated earlier water has played a fundamental role in the development of civilization(s). It still plays an important role today, which is why there are frequent

suggestions for the development of projects to transport water from a region where water is plentiful to one where it is sparse, often without sufficient consideration of the ecological, hydrological and meteorological effects at both ends of the transfer. One is tempted to ask: can humankind learn from real or potential ecological disasters? The political effects of the *Nuclear Winter* study of the Scientific Committee on Problems of the Environment SCOPE (1985 & 1986), give us some hope. The water-civilization interface is still important today. In 2002 six of the ten largest natural catastrophes were floods and of the ten catastrophes with greatest economic losses, four were floods and two droughts accounting for about 75% of more than 42 000 million US\$ lost (Cornford, 2003). However, there has been a slight tendency to decrease over recent years as mitigation measures have an effect and as systems of international assistance become more efficacious. Over time a number of American civilizations such as those of the Maya, Mochica, Tiwanaku, etc. have disappeared and these have led to studies with varying, occasionally opposing, explanations.

The archaeologist Posnansky (1911) considered that Tiwanaku centre (10th/7th centuries BC to AD 10th/13th centuries) on the banks of Lake Titicaca had been submerged by the waters of the lake during a flood. Eighty years later Ortloff & Kolata (1993) put forward as the reason for the disappearance of this civilization a long drought in the 11th to the 14th centuries, based on the reconstruction of the climate made using ice cores from Peruvian glaciers. The lack of water caused the originally abundant agricultural production, on which the civilization was based, to decrease. So in less than a century both drought and floods have been put forward as reasons for the disappearance of a civilization. However, we can expect that the comparatively new discipline of paleoclimatology will lead to some improvements in our knowledge of past civilizations and their development and disappearance. However, it is difficult to imagine that the disappearance of one town or city can lead to the disappearance of a civilization. For example, the disappearance of Pompei and Herculaneum in AD 79 did not lead to the disappearance of the Roman civilization. Some archaeologists and climatologists tend to grant climate an over-exalted role in the stability of civilizations, especially those that developed in “marginal” environments (with little precipitation, low or high temperatures or at high altitude) which place constraints on the development of a civilization (Weiss & Bradley, 2001). Certainly the El Niño/La Niña episodes have played a negative role, especially in Southern and Central America, in restraining the rapidity of cultural development. Although the Little Ice Age led to the withdrawal of the Vikings from Greenland, it did not end their civilization. On the other hand it seems probable that the Easter Island civilization became extinct because of population pressure on the limited natural resources.

WATER SCIENCE AND MODERN CIVILIZATION

Civilization and water science are both affected by the growth of communication. Initially there were positive effects of transmission of information: (a) about the growth of civilization and the interactions between different cultures; and (b) about developments in hydrology and hydraulics. With the explosion of information on-line has come not only an increase in the amount of information available but also the problem of selecting it and its verification. It is well known that different sites on the

World Wide Web provide access to general and scientific information, but no indication of its reliability.

With the general information one has to take care to eliminate the effects of exaggeration and error. For example the catastrophe of Potosi (The Andes) in 1626 was responsible for about 2000 deaths (Gioda *et al.*, 2002) which was magnified to 4000 following a study by Rudolph published in 1936 and his estimation has been copied and recopied by several authors such as Jansen (1980) and Schnitter (1994), without checking the original sources and looking for advances in Latin American history (Fig. 1). The rupture of the dam at Vaiont in the north of Italy in 1963 was responsible for 2060 deaths, but because of a printer's error this became 2600 (Jansen, 1980), a figure which is in general use in place of the correct one. One of the most recent disasters is that of Nîmes in the south of France on 3 October 1998. The number of deaths was initially given as 200 but as time passed the official figure was reduced

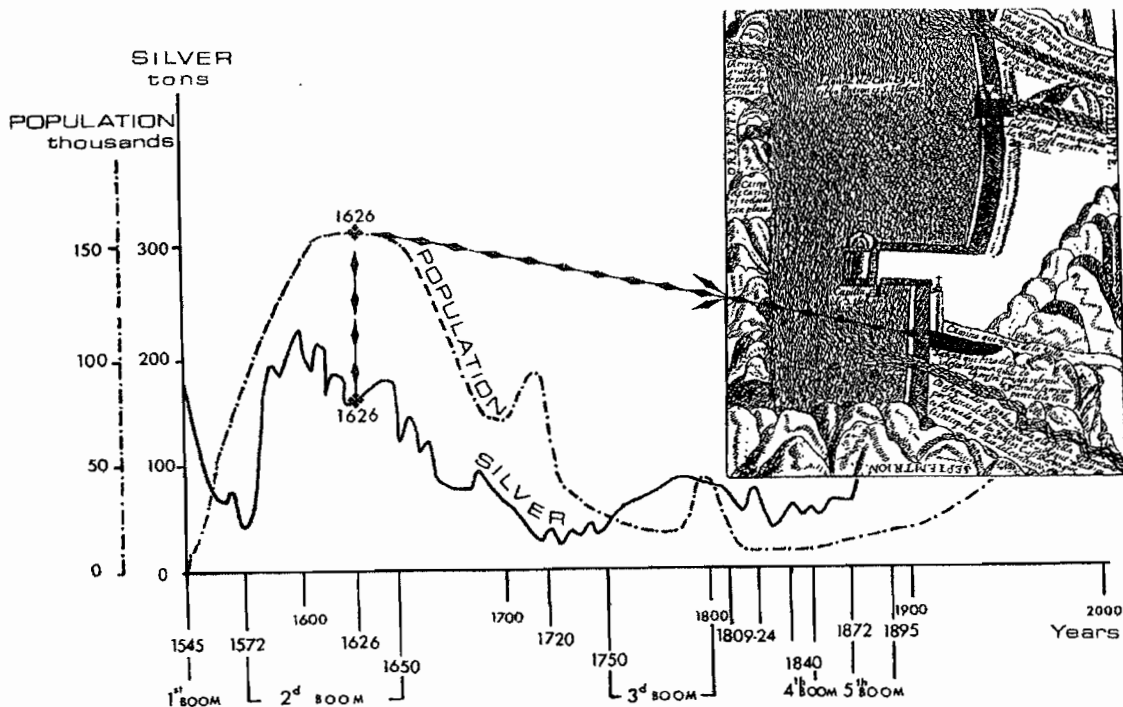


Fig 1 Rise and fall of the Silver city: Potosi (the Andes). The clearly seen second boom was made necessary by the need of the amalgamation process for large amounts of water and therefore of dams. The catastrophe of 1626 (approximately 2000 victims) is not visible on the population curve because there were about 150 000 inhabitants at that time and the loss represented only 1.3% of the population. The traces of the catastrophe were still visible 75 years later, as can be seen on the drawing by Arzáns by the black line below the dam rebuilt in 1628. However, production in 1626 was greater than the preceding year, but in general it had been decreasing progressively since 1605. The decline of Potosi was caused first by the competition from Mexican-made silver and then to the end of the supply of cheap mercury from Peru. It would therefore be erroneous to indicate today that "Potosi never completely recovered from the disaster" (Schnitter, 1994) and still less that "The town of Potosi had suffered irreparable damage" (Jansen, 1980). With regard to the governor, the *corregidor*, who had refused to lower the water level of the lake and was therefore responsible for the catastrophe; he remained in office without any difficulty until the end of his mandate in 1628. As to the Viceroy of the Indies in Lima he proved his efficiency by rapidly re-establishing the production of silver.

to nine, but more than 1300 cars and 50 buses were submerged and 90 km of sewers were blocked or destroyed (Anonymous, 1989; M. Debordes, University of Montpellier II, personal communication). There is of course an attempt to profit from such exaggerations on the part of officialdom to benefit to the maximum from State or regional help and on the part of the individual to claim the maximum compensation from insurance companies. The poor, especially in the developing countries, must recover from disasters as best they can. The adaptation to catastrophes appears to be less and less evident in industrialized civilization (Weiss & Bradley, 2001).

Time tends to erase the memory of such catastrophes, as can be seen by some of the reactions to the recent drought in Europe. From reports in the media the current drought would seem to be unique. Following a big event le Centre de Création Industrielle organized an exhibition in Paris in 1980: *Le fil de l'eau*, "Heat wave, prairies dried up, water rationed. During 1976 the French people discover drought. What was thought to be reserved for Africa and Asia astonishes the French. The evolution of our civilization should lead the managers of water to modify the conception and size of infrastructures as well as rules for their operation. We no longer accept, psychologically, insufficiencies in the distribution of drinking water!" The author of the exhibition drew attention to the effects of drought and of the shortness of the period of weather prediction.

There is no mention of the need to use less water. Tow icebergs from the Antarctic, pipe water from the north or the east, drill boreholes deeper and deeper, but nothing about the need not to exceed the carrying capacity of the natural ecosystem. However, Lundqvist (1996) comes to the point after indicating that "industrialization and civilization have increased the human per capita influence... The quicker the population grows, the more disastrous are the environmental effect... Reduction of the population to a level where it can exist in harmony with the environment is the only way to a sustainable world".

PROGRESS IN WATER SCIENCE AND CIVILIZATION

Epicurus (341–270 BC) suggested that science was a fundamental aspect of culture, could help free society from superstition and tyranny and is an active element in social conflicts and therefore in the struggle for power. Even at this period of civilization views differed. Aristotle (384–322 BC), a contemporary of Epicurus, was probably the first to identify features that were common to both nature and politics. He is better known to the water science community for his erroneous views on the origin of rain that persisted for almost 2000 years until Pierre Perrault in 1674 wrote the first book on scientific hydrology: *De l'origine des fontaines*.

Science and scientists for several centuries were considered an exclusive part of civilization and less subject to pressures of governance from political and other leaders and more isolated from certain ethical pressures until the 20th century. In the last century however pure scientists are being forced by political and other groups to be more sensitive to both ethical and economic issues: a difficult task, made more difficult by the disillusionment with science after the explosion of the first atomic bomb and some of the applications of science in agriculture, nutrition and health. Water science has been affected to a lesser extent but occasionally the results of

catastrophes or carelessness are beyond concealment (Ackerman *et al.*, 1973). A recent case was the failure in 1998 of the Aznalcollar tailings dam in the region of the Donana National Park in Spain. Designated by Unesco an International Biosphere Reserve in 1980 and put on the World Heritage List in 1994, the Park was nonetheless affected by some of the 5 million cubic metres of metallic slurry released by the rupture of the dam (García-Guinea *et al.*, 1998). In spite of such events water science tends to be in good standing and hydrologists are less subject to the pressures of today's civilization. However, economic pressures are more and more prevalent and one should not overlook a comment of Lovelock (1998): "Sadly science is no longer a calling where scientists are the guardians of knowledge, but has become a narrowly specialized employment". As scientists we have to find again *Paradise Lost* as engineers seek *Paradise Regained* following Milton's quest (Gioda, 1999).

CONCLUSIONS

"Is water the basis of civilization?" "Yes—because without water there would be no life as we know it and therefore no possibility for civilization to develop". "Is water science the basis of civilization?" "Yes, especially for water scientists because it is their major interest and source of livelihood". However, care should be taken because there can be a conflict between the two with a loss of independence caused by the need to survive in the conditions of today with research budgets often tied to the need for results of practical and/or commercial importance. Returning to Yu the Great: according to legend Yu made an alliance with the God of the Yangtze and in order to be able to control the waters gave up half of his body as a pledge of his good faith. Having directed the water of the Yangtze to the sea, he re-organized the world limping, as a hemiplegic, across it in all directions. The legend does not indicate how Yu ended his "bargain" but it suggests that we should be careful in whom we pledge even half of our bodies and minds.

Acknowledgements Valuable information was obtained from the Roman period archaeologist Philippe Leveau (University of Provence, Aix), the mining historian Carlos Serrano (INHIGEO, Potosi) and the Andean agronomist Pierre Morlon (INRA, Dijon). The authors record with appreciation the support given to them by Unesco-IHP and WMO in the framework of the Archival Climate History Survey (ARCHISS) Project A. Gioda thanks the Comité National Français de Géodésie et Géophysique (CNFGG) for assistance in his mission to Rome.

REFERENCES

- Ackerman, W. C., White, G. & Worthington, E. B. (eds) (1973) *Man-made Lakes: Their Problems and Environmental Effects*. AGU, Washington, USA.
- Anonymous (1989) La rumeur. In: *Nîmes, le 3 octobre 1988*, 75–79. Ville de Nîmes, Notre Dame, Nîmes, France.
- Cornford, S. G. (2003) The socio-economic impacts of weather events in 2002. *WMO Bull.* 52(3), 269–295.
- Garbrecht, G. (1987) Hydraulic engineering, hydrology and hydraulics in the Antiquity. *ICID Bull.* 36(1), 1–10.
- García-Guinea, J., Martínez-Frías, J. & Harffy, M. (1998) The Arznalcollar tailings dam burst and its ecological impact in

- Southern Spain. *Nature Resour.* 34(4), 45–47.
- Gioda, A. (1999) A short history of water. *Nature Resour.* 35(1), 42–48.
- Gioda, A., Serrano, C. & Forenza, A. (2002) Les ruptures de barrages dans le monde: un nouveau bilan de Potosi (1626, Bolivie). *La Houille Blanche*, 4/5, 165–170.
- Jansen, R. A. (1980) *Dams and Public Safety*. Water & Power Resources Service, US Dept. Interior, Washington, USA.
- Lovelock, J. (1998) A book for all seasons. *Science* 280, 832–833.
- Lundqvist, J. (1996) Quaternary climatic fluctuations, global environment changes and the impact of Man. *Nature Resour.* 32(4), 30–37.
- Ortloff, C. R. & Kolata, A. L. (1993) Climate and collapse: archaeological perspectives on the decline of the Tiwanaku State. *J. Archaeol. Sci.* 20, 195–221.
- Posnansky, A. (1911) *El clima del Altiplano y la extensión del lago Titicaca con la relación a Tihuanacu en épocas prehistóricas*. Ismael Argote, La Paz, Bolivia.
- Schnitter, N. J. (1994) *A History of Dams. The Useful Pyramids*. AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- SCOPE (1985 & 1986) *Environmental consequences of nuclear war*. 1. Physical, 1985; 2. Ecological and environmental effects, 1986. Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Viollet, P. (2000) *L'hydraulique dans les civilisations antiques*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Weiss, H. & Bradley, R. S. (2001) What drives societal collapse? *Science* 291, 609–610.

19. Les ruptures de barrages dans le monde : un nouveau bilan de Potosi (1626, Bolivie) - 2002 (avec Carlos Serrano et Ana Forenza)

Les ruptures de barrages dans le monde : un nouveau bilan de Potosi (1626, Bolivie)

*Dam collapses in the world : a new estimation of the Potosi disaster
(1626, Bolivia)*

par Alain Gioda

Maison des Sciences de l'Eau, IRD, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5
E-mail : gioda_ird@yahoo.com
U.R. 32 Greatice, IRD, Montpellier

Carlos Serrano

INHIGEO (Commission Internationale d'Histoire des Géosciences), Potosi, Bolivie

Ana Forenza

ABNB (Archives et Bibliothèque Nationales de Bolivie) e.r., Sucre, Bolivie

The Potosi (San Ildefonso) dam collapse on March 15, 1626 was one of the major hydraulic disasters in the world with 4,000 human lives lost, following Jansen (1980) and Schmitter (1994). However, these Authors only consulted a paper by Rudolph, an engineer who in the 1930s rebuilt and restored the Spanish dams (1573-1621) in Potosi. Rudolph's paper (1936) had been written just using the Arzans's draft (1711) about the silver mining capital of the XVIth-XVIIth centuries (the Central Andes, Bolivia previously, Peru). With more archival and bibliographic references, we propose a new estimation of the dam disaster with 2,000 lives lost or a little bit more. A catastrophic pollution by mercury (Hg) happened immediately after the dam burst because tons of the toxic chemical element (which was indispensable to silver amalgamation) are flooded into the Potosi canal. Following our estimation, 19 t of mercury were likely swept into Pilcomayo tributaries (Río de la Plata basin). The mercury contamination was very high (48 mg/l Hg) knowing the dam storage capacity (400,000 m³) and that all the water was spilled in about 2 hours.

I ■ INTRODUCTION

Les catastrophes dues aux ruptures de barrages sont nombreuses dans le tiers-monde : seulement entre 1960 et 1980, 7 accidents ont fait plus de 5 150 victimes [1]. La mise à jour de la reconstitution du désastre de Potosi en 1626, paraît dans ce contexte utile à des fins de prévention.

II ■ LES RUPTURES DE BARRAGES CATASTROPHIQUES DANS LE MONDE

Jansen (1980, p. 95) a dressé le *tableau 1*, à l'échelle du Globe, dans lequel la catastrophe de Potosi apparaît parmi les plus graves en pertes humaines (la 1^{re} ou 2^e par sa magnitude) mais aussi l'une des moins connues [1]. Il chiffre le désastre à 4 000 victimes mais, ajoute-t-il, il y en eut probablement un nombre moindre. Toutefois, Jansen (pp. 183-184) ne dit pas exactement pourquoi il porte ce jugement : "Accounts of the number of the human lives lost in this remote mining district

ran as high as 4,000. There is apparently no way to verify such estimates, but the maximum figures may been exaggerated. However, another indicator of the severity of losses was the extensive property damage. Roughly 95 percent of the many mills along the stream were reported to have been destroyed or badly damaged".

A la lumière d'anciens textes publiés et d'une révision des archives, nous essayerons de clarifier certains points de la catastrophe.

III ■ LE TERRAIN D'ÉTUDE : LES ANDES, POTOSI ET SES BARRAGES

Les coordonnées de Potosi dans les Andes centrales sont les suivantes : lat. 19°34'18" S. ; long. 65°34'25" O. En 1626, Potosi faisait partie du Pérou colonial espagnol dont le

Tableau 1. Bilans des pertes humaines, en ordre décroissant, des ruptures de barrage depuis le XVII^e s. [1].

N° nom du barrage	Pays	Année	Pertes humaines
1. Machhu II	Inde	1979	+ de 2 000
2. San Ildefonso (ou Potosi)	Bolivie	1626	Nombre inconnu*
3. Varont	Italie	1963	2 600
4. South Fork (ou Johnstown)	USA	1889	2 209
5. Panshet-Khadakwasla	Inde	1961	Nombre inconnu
6. Orós	Brésil	1960	Nombre inconnu**
7. Puentes	Espagne	1802	608
8. Kuala Lumpur	Malaisie	1961	600
8. Gleno	Italie	1923	600
10. Saint Francis	USA	1928	450
11. Malpasset (ou Fréjus)	France	1959	421
11. Hoyokiri	Corée du Sud	1961	250
13. Quebrada La Chapa	Colombie	1963	250
14. Bradfield (ou Dale Dyke)	Angleterre	1864	238
15. El Habra	Algérie	1881	209
16. Sempor	Indonésie	1967	200

* 4 000 victimes mais probablement moins (N. d. A : souligné par nous-même)

** 1 000 victimes mais probablement nombre surestimé

vice-roi siégeait à Lima¹. La création spontanée de la ville (3 980 m d'altitude) est la conséquence directe de la découverte en 1545 du plus grand gisement argentifère et polymétallique (étain, zinc, plomb...) du Monde qui a demandé, pour le traitement du minerai et l'amalgamation de l'argent, une énergie hydraulique considérable. Cela nécessita la construction de plus de 20 barrages dont l'eau servait aussi à l'alimentation urbaine et des habitants [2-3-4]. Les lacs coloniaux sont localisés dans six vallons, situés à l'est de la montagne d'argent, le Cerro Rico (4 870 m). Environ 600 KW étaient installés, d'où un site industriel parmi les plus grands du Monde [3].

Le barrage-poids de San Ildefonso - appelé aussi de Caricari, Kari-kari, du Roi (*del Rey*) ou de Potosi dans certaines références - était le plus proche de la ville de Potosi (2 km) qu'il dominait d'environ 400 m. L'ouvrage de quelques mètres de haut et centaines de mètres de long avait été construit, entre 1574 et 1576, en matériel morainique, très abondant localement et vite compacté, qui céda à la pression des hautes eaux. Les principaux points à retenir sont les suivants :

- volume de la retenue, 400 000 m³ ;
- vidange, 270 000 ou 400 000 m³ (cette dernière valeur est plus vraisemblable) ;
- date et heures de la vidange, le dimanche 15 mars 1626, 13-15 heures ;
- débit moyen pendant les 2 heures de la vidange, 60 m³/s ;
- débit de pointe, 150 m³/s ;

¹ La création de la république de Bolivie date de 1825

- avec une section mouillée de 50 m² et une vitesse d'écoulement de 3 m/s [3]².

IV ■ DES BILANS TRÈS CONTRASTÉS ET LEUR EXPLICATION

Le tableau 2 résume les différentes estimations publiées et inédites de la catastrophe, depuis le XVII^e s., qui sont très variables puisqu'elles vont de 350 à 40 000 victimes !

Il y eut 2 grands types de bilans : les uns donnant une estimation basse ; les autres furent très lourds en pertes humaines. C'est que Potosi était alors une des plus grandes villes de l'Occident (environ 150 000 habitants vers 1610) et peut-être la plus riche (bien plus opulente que Paris et Londres à cette époque), d'où de nombreuses sources écrites. Selon que les uns ou les autres étaient plus ou moins impliqués dans la catastrophe, il y eut des estimations plus ou moins basses

Parmi tous ceux qui tentèrent de minorer le bilan de la catastrophe, le gouverneur de la ville Bartolomé Astete de Ulloa est le premier [6]. De son temps soit durant toute la première moitié du XVII^e s., il réussit à officialiser cette estimation basse vis-à-vis de Lima. Le résultat fut qu'il continua à exercer son mandat malgré la lourde responsabilité d'avoir négligé les avertissements donnés par le technicien inquiet du remplissage au ras bord de la retenue avant la catastrophe. A la fin de son mandat en 1628, le gouverneur

² Le barrage fut reconstruit tout de suite après la catastrophe et achevé en 1628 [22]. Il fut rebâti, encore une fois en 1935-36, à la cote 4 409 m par William Rudolph pour alimenter l'industrie minière de l'étain dont l'exploitation remplaça massivement celle de l'argent autour de 1895 [5].

Astete de Ulloa avança, parmi ses mérites, son travail et abnégation lors de la reconstruction de la ville¹ [ANB, lettre datée du 24 janvier 1628].

À l'inverse, le petit peuple de Potosi fut durablement touché dans ses biens et dans sa mémoire collective or, au XVII^e s., il donna, à l'Amérique latine, son premier grand écrivain Bartolomé Arzáns (1636 ?-1736) qui rédigea, sous deux formes différentes [9-10], une chronique de sa ville. De ce côté-là, l'estimation des victimes est plus de 10 fois supérieure à celle du gouverneur Astete de Ulloa avec respectivement 4 000 morts [9-16] contre 350 et de nombreux disparus (*sic*) [6]. Dans le détail, « *Los Anales* » [9] d'Arzáns sont aujourd'hui considérés comme le brouillon de « *La Historia...* » [10] dont la rédaction s'échelonna de 1705 à 1736. Toutefois, l'œuvre solitaire d'Arzáns et un style très original firent que son premier travail connu [9] fut considéré comme peu sérieux pendant longtemps, notamment par un autre chroniqueur Cañete dont le guide de Potosi et de sa région est daté de 1787 [11]. Par conséquent, les textes d'Arzáns restèrent inédits et ils faillirent même disparaître³. Toutefois, on observa un revirement à la fin du XIX^e s., sous l'impulsion du courant nationaliste en Amérique latine. Arzáns devint un proto-Bolivien parce que né à Potosi et membre du petit peuple créole (alors que presque toute la noblesse, hors des titres achetés localement appelés « *titres de Castille* », était espagnole et que les charges importantes lui étaient quasiment réservées). Son œuvre « *Los Anales...* » [9-16] a été éditée depuis 1873 plusieurs fois. « *La Historia...* » d'Arzáns est considérée, depuis sa première publication en 1965 [10], comme « *Les Mille et une nuits* » du Nouveau Monde [24].

Selon Jansen en 1980 [1], environ 95 % des nombreux moulins riverains du canal furent déclarés détruits ou très endommagés⁴. Toutefois, c'est textuellement ce qu'écrivait en 1936 l'ingénieur hydraulicien nord-américain Rudolph qui avait pris lui-même cette information chez Arzáns [9-16].

C'est donc une source secondaire comme disent les archivistiques. Le fait que Rudolph publia son article « *The lakes of Potosi* » à New York, dans une revue de référence bien diffusée et en anglais [5], n'est pas indifférent ; cela donna très longtemps un poids supplémentaire à ses écrits puisque le texte de Schnitter de 1994 [17] est encore proche de celui de Rudolph, pourtant publié presque 60 ans auparavant. Arzáns dit textuellement que seulement 6 des 132 machines hydrauliques qui fragmentaient le minerai jusqu'à le rendre presque farine, à l'aide de marteaux-pilons hydrauliques, ne furent pas perdues [9-16], une estimation recopiée par Rudolph en 1936, et d'où les 95 % de moulins détruits ou très endommagés, selon Jansen en 1980 [1]. Enfin, le texte de Rudolph fut publié deux fois, en Bolivie et en espagnol, en 1936 et 1983 [15].

Cañete [1787], membre de la haute administration espagnole à Potosi de la fin du XVIII^e s au début du XIX^e s. et donc ayant un tout autre point de vue que celui d'Arzáns, écrivit que seulement un peu plus de 50 % de ses 122 machi-

nes hydrauliques furent détruites. Il ajouta, par contre, comme Arzáns, que 360 maisons d'Espagnols et 800 habitations d'Indiens (*ranchos*) disparurent [11].

Soulignons que ni Arzáns ni Cañete n'étaient nés lors de la catastrophe de 1626. Toutefois, nous préférons l'estimation de Cañete car de nombreuses usines hydrauliques se trouvaient à Tarapaya, loin du centre de Potosi, à quelques 10 km vers l'aval. Le chroniqueur Vázquez de Espinosa, de passage en ville seulement quelque temps après la catastrophe, cite une lettre du 17 mars 1826 du gouverneur Astete de Ulloa (aujourd'hui perdue) dans laquelle ce dernier estime à 32 les machines hydrauliques détruites, à 34 celles réparables rapidement et où il était écrit clairement que celles de Tarapaya ne furent pas endommagées [6].

Tout fut reconstruit très vite à Potosi. La demande d'argent, essentiellement pour les frappes monétaires était forte (le peso espagnol était alors l'équivalent du dollar)⁵ et elle le resta localement jusque vers 1650. Ensuite, le Mexique pris le pas de façon définitive sur les mines de Potosi et de sa région quand cessa son approvisionnement à bon marché en mercure péruvien. La production annuelle de Potosi, entre 1626 et 1635, se montra presque constante (140 t d'argent) [22]. Une longue série a été récupérée dans ce domaine (1550-1735) [26]. Dans les livres de comptes de la production monétaire et ceux de la livraison du mercure, indispensable à l'amalgamation de l'argent, rien ne dénote le caractère cataclysmique de la rupture du barrage. Les agents économiques se donnèrent beaucoup de mal pour pallier les conséquences de l'inondation de la moitié de la ville. Néanmoins, l'impact de la catastrophe peut se voir en économie, de façon indirecte, par l'évolution du recouvrement de l'impôt sur le mercure (*tableau 3*).

Concernant les pertes humaines, l'estimation faite par les franciscains et qui resta longtemps dans une certaine ombre est la plus crédible. La présence de cet ordre religieux remonte quasiment au premier campement minier de 1545 car la première église des franciscains est connue dès 1548. Lors de la catastrophe, ces religieux étaient déjà dans leur couvent actuel à l'aspect de forteresse dans un tissu urbain qui, toujours à Potosi, fut de qualité médiocre car bâti à la hâte lors des différents booms miniers. L'édifice résista à l'onde de crue bien qu'il fut complètement isolé par les eaux. Le Frère Diego Mendoza, qui vécut au XVII^e s. et résida longtemps au couvent de la Recoleta de Sucre (la ville voisine dont Potosi dépendait administrativement et qui s'appelait à l'époque La Plata, l'argent en espagnol), et le Frère italien Martarelli du couvent de Potosi ont été nos deux sources. L'œuvre du premier fut publiée officiellement à Madrid dès 1664 [8]. Le second bénéficia des archives du couvent et du travail de son prédécesseur pour rédiger son livre au sujet de Potosi et des missions franciscaines et l'éditer en 1890 [13]. Il est important de savoir que Mendoza eut l'imprimerie officielle de l'Espagne et donc que son livre fut publié en 1664 (à une date encore assez proche de celle de la catastrophe), à l'inverse des travaux d'Arzáns et de Cañete dont les premières éditions, largement posthumes, remontent respectivement au XIX^e et au XX^e s. Pour ces deux raisons c'est-à-dire la conservation de la mémoire du couvent franciscain (résistant aux eaux en 1626) et les travaux continus de cet ordre en histoire de Potosi (dont le premier fut déjà publié au XVII^e s. à partir d'archives

3. Le plus important manuscrit fut acheté, au début du XX^e s. chez un bouquiniste de Paris, par un Nord-Américain qui travailla dans les chemins de fer boliviens et qui rassembla une collection de textes au sujet de la Bolivie. Par legs testamentaire, ce manuscrit devint propriété de la Brown University (Providence, Etats-Unis).

4. Moulins et batteries de marteaux-pilons hydrauliques n'étaient pas des synonymes. En effet, un moulin pouvait entraîner une ou deux machines hydrauliques (une batterie de marteaux-pilons) installées soit d'un côté soit de part et d'autre de la grande roue de 5 m de diamètre, montée verticalement

5. En France, le flux monétaire de l'argent de Potosi, tracé par la présence d'indium (In), dans les frappes monétaires fut surtout sensible de 1575 à 1610 [25].

Tableau 2. Bilans de l'inondation de Potosi de 1626, selon les différentes sources

— plus de 350 morts et de nombreux disparus. Une évaluation faite 2 jours après le drame (ASTEIL 1626 in VAZQUEZ DE ESPINOSA [1628-29]) [6].

— nombreux morts (Antonio de la CALANCHA, 1638) [7].

— plus de 2 000 (Diego de MENDOZA, 1664) [8]

— un peu moins de 4 000 (ARZANS, [1711]) [9-16].

— 2 000 morts et 1 700 disparus « 12 jours après la catastrophe » (ARZANS, [1705-37]) [10].

— 4 000 morts « selon des personnalités qui écrivirent au sujet de cette catastrophe » (ARZANS, [1705-37]) [10].

— plus de 3 000 morts sans compter les disparus (Pedro MENDEZ et Antonio de ACOSTA in ARZANS, [1705-37]) [10].

— 2 800 morts selon les jésuites de Potosi (ARZANS, [1705-37]) [10].

— plus de 2 000 (CAÑETE, [1787]) [11] selon l'estimation du franciscain Diego de MENDOZA (1664) [8].

— plus de 2 000, d'après le franciscain Angélico MARTARELLI (1890) [12] et publié de nouveau en 1936 [13] avec cette fois 12 000 victimes ! C'est une coquille : en espagnol, 2 000 (dos mil) et 12 000 (doce mil) s'écrivent et se prononcent presque de la même façon.

— 40 000 par SUBIETA SAGARNAGA (1936) [14], alors président de la société de géographie et d'histoire de Potosi, qui trouvait la description d'Arzáns si apocalyptique qu'il pensa logiquement que 4 000 morts [9-16] devaient se comprendre 40 000. Selon SAGARNAGA, un zéro pouvait très bien s'être « perdu » dans les travaux de transcription entre le XVIII^e et le XX^e s. ou bien une coquille serait advenue lors de l'impression de l'édition de 1873 [9].

— plus de 4 000 (RUDOLPH, 1936) [15] d'après ARZANS [1711] qui était la seule partie de l'œuvre de cet auteur éditée à cette époque, en 1936 sous le nom de MARTINEZ VELA [16].

— 4 000 « mais probablement moins » (JANSEN, 1980) [1]. Cet hydraulicien nord-américain met la catastrophe de Potosi au 2^e rang des plus meurtrières ruptures de barrages dans le Monde depuis le XVII^e s.

— environ 4 000 (SCHNITZER, 1994) [17], hydraulicien suisse qui cite l'estimation de RUDOLPH (1936) [15], elle-même tirée d'ARZANS [1711] [9-16].

Enfin, en Bolivie, les bilans depuis 1980 sont liés implicitement ou explicitement aux sources suivantes :

— ARZANS [1711] [9-16] avec 4 000 victimes (MONTES de OCA, 1983) [18], et plus de 4 000 pour qui le recopia plus ou moins bien (CAMPOS, 1992) [19] ;

— ou MENDOZA (1664) [8] avec plus de 2 000 morts : ESCOBARI (1982-83) [20], SERRANO et PELAEZ (1991-92) [21] et (1995-97) [2], GIODA et SERRANO (1998 et 1999) [3-4], SERRANO et GIODA (1999) [22].

Notons que GISBERT et MESA (1993) [23] donnent 2 000 victimes en se basant sur ARZANS [1705-37] mais en ne tenant pas compte des disparus (1 700) selon cet auteur [10].

Tableau 3. Montant de l'impôt sur le mercure (en pesos) et estimation du mercure distribué et approximation de son tonnage moyen mensuel (Serrano et Gioda [22], modifié). Nous avons estimé pour l'an 1625 que l'impôt, perçu le 30 mai 1626, correspondait 11 mois de perception à partir de la moyenne de son recouvrement entre 1627 et 1630

Dates	Montant (pesos)	Mercure		Source [archives]
		Total (tonnes)	Moyenne (tonnes)	
31 juin 1625-30 mai 1626	7 078	81,4	7,4	C.R. 223
1 ^{er} juin 1626-13 mars 1627	10 413	119,7	12,3	C.R. 223
14 mars 1627-3 janvier 1628	15 269	175,6	17,9	C.R. 226
4 janvier 1628-2 janvier 1629	15 025	172,8	14,4	C.R. 232
3 janvier 1629-3 janvier 1630	12 157	139,8	11,0	C.R. 242

de première main), nous préférons l'évaluation de Mendoza au sujet des pertes humaines. Nous écartons, par conséquent, celles du gouverneur Astete de Ulloa de 1626 [6] et d'Arzáns [9-16] du début du XVIII^e s. Nous adoptons une évaluation dite moyenne du bilan en pertes humaines avec autour de 2 000 victimes voire un peu plus.

André Goubet, alors Président du Comité Technique Permanent des Barrages, confortait cette hypothèse par son expertise (comm. pers. de 1998). Certes, il ne connaissait pas Potosi mais il jugeait, sachant le faible volume du lac de San Hdefonso (400 000 m³), qu'il était difficile d'attribuer un

bilan aussi lourd à la catastrophe (4 000 victimes) C'était aussi le jugement de Jansen, en 1980 [1], lorsqu'il écrivait « 4 000 morts mais probablement moins » (cf. note au bas tableau 1).

V ■ ÉGALEMENT UNE CATASTROPHE ÉCOLOGIQUE

La quantité de mercure perdue par les industriels et qui entraînée dans le canal (creusé et aménagé par les hommes dès 1573 pour distribuer l'eau aux usines) est estimée à 1

Tableau 4. Comptabilité du Trésor public, la *Real Hacienda* (d'après Serrano et Goda [22]). Le système décimal et métrique n'existant pas et voulant simplifier le tableau, nous sommes restés au niveau des unités supérieures, négligeant dans les poids les livres et les onces et dans la monnaie les subdivisions des pesos. D'où des totaux qui ne tombent pas parfaitement justes par rapport à ceux de la comptabilité espagnole qui étaient respectivement de 40 487 « quintaux », de 3 604 928 pesos de dette et 1 758 680 pesos perçus.

Année	Mercuré distribué (« quintaux »)	Dette (pesos)	Perception (pesos)
1617		793 524	
1618	4 402	308 155	178 633
1619	4 122	288 601	232 712
1620	4 322	302 540	178 271
1621	4 545	318 150	227 972
1622	4 754	332 822	202 491
1623	4 055	283 725	189 105
1624	4 179	292 587	198 172
1625	5 185	362 984	206 945
1626	4 921	321 838	144 375
Total	40 485	3 604 926	1 758 676

[22]. Cette estimation s'est faite par la différence entre le mercure distribué en moyenne entre 1617 et 1626 et le surplus de 1626 à partir de la comptabilité du Trésor, la *Real Hacienda* (tableau 4)⁶.

Le mercure venait en grande majorité de Huancavelica au Pérou et c'était un produit local, pas cher, tout en étant indispensable à l'amalgamation. Il passa directement dans les 400 000 m³ d'eau issus de la retenue soit une concentration de 48 mg/l Hg. S'y ajouta, lors de la catastrophe de 1626, la forte pollution chimique due à la mobilisation des résidus de l'amalgamation : boues et gangues traditionnellement amassées en terrils le long du canal.

Bien plus récemment en 1996 à Porco qui est un autre très ancien site minier proche de Potosi et situé sur le même bassin du Pilcomayo⁷, se produisit une autre catastrophe écologique par rupture de barrage. Ce dernier était fait de scories minières fines et il retenait des boues du traitement du minerai par flottation (*tailings*) d'un grand gisement polymétallique (argent, étain, zinc et un peu de plomb). Le barrage céda et mit en circulation 235 000 t de boues dans la Yana

Machi [28]. Nous pensons même que ce furent peut-être 300 000 t. Les boues étaient le produit de la flottation ; l'amalgamation a été abandonnée en Bolivie depuis la fin du XIX^e s. Ce procédé utilise des réactifs de flottation (xanthates, ditiophosphates...) et de cyanuration (cyanure alcalin...).

VI ■ CONCLUSION

Il n'aura peut-être jamais de certitude absolue sur les différents bilans de la catastrophe de 1626 ; des pièces essentielles ont été perdues depuis les 4 siècles qui nous séparent de cet accident ou même elles ont été détruites volontairement. Le puzzle de sa reconstruction bénéficie toutefois de l'importance de Potosi dans l'histoire minière et économique de l'Amérique Latine.

Nous estimons à 2 000 morts les pertes humaines, voire un peu plus, et à une bonne soixantaine les machines hydrauliques détruites et fortement endommagées sur un total d'environ 125. Enfin, nous proposons un ordre de magnitude pour la catastrophe chimique avec une pollution de 19 t de mercure entraînés par l'eau du barrage après sa rupture (400 000 m³) soit 48 mg/l Hg.

Hommage : *Ce travail est dédié à la mémoire d'André Goubet, ancien Président du Comité Technique Permanent des Barrages au Ministère de l'Industrie à Paris qui fut son inspirateur en nous donnant des références mondiales très utiles dès 1997-98.*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] JANSEN R.A. (1980). — *Dams and public safety*. Water and Power Resources Service, U.S Department of the Interior, Washington (USA).
- [2] SERRANO C., PELÁEZ J. (1995-1997). — Potosí y sus lagunas. *Revista de Investigaciones Históricas* (Potosí), pp. 14-130.

⁶ De 1617 à 1626, la quantité de mercure taxé fut d'environ 40 490 « quintaux » (2,17 « quintaux » = 100 kg), une valeur calculée à partir des dettes contractées auprès du Trésor par les mineurs qui préféraient systématiquement les payer le plus tard possible pour faire tourner leur fonds de caisse. Ces 9 années, la moyenne annuelle de mercure fut de l'ordre de 4 500 « quintaux », une valeur très proche de celle de la période 1617-1625 que, en toute rigueur, il aurait fallu prendre. Sachant que 4 921 « quintaux » furent taxés en 1626, et que l'on fait la différence avec cette moyenne on obtient 421 « quintaux » qui, multipliés par 46 pour passer au kilogramme, donnent 19 366 d'où les 19 t du surplus de 1626 pour lequel notre hypothèse est qu'il correspondit au mercure perdu lors de la catastrophe.

Au début du XVII^e s., il fallait énormément de mercure pour amalgamer l'argent et la pollution diffuse était donc grande. Ainsi, de 1617 à 1626, on utilisa à Potosi en moyenne 207 t/an de mercure et donc 570 kg/jour [22]. Rappelons que, dans les années 1990, la consommation en mercure de toute l'Europe était de 400 à 450 t/an. Le long du Rio Tinto en Espagne du Sud et après 4 500 années d'exploitation minière, 10 à 70 t de mercure résiduel subsistent dans l'environnement (F. Elbaz-Poulichet, comm. pers.) [27].

⁷ Le Pilcomayo est un affluent du Paraguay qui forme avec le Parana le cours supérieur du Rio de La Plata (la rivière d'argent) dont l'estuaire commun avec l'Uruguay débouche dans l'Atlantique entre Buenos Aires et Montevideo.

- [3] GIODA A., SERRANO C. (1998) — L'eau et l'argent à Potosí (ancien Pérou puis Bolivie). *La Houille Blanche* (Paris), n° 7, pp. 65-75.
- [4] GIODA A., SERRANO C. (1999) — L'argent de l'ancien Pérou *Pour la Science* (Paris), n° 259, pp. 42-48 et édition en espagnol. La plata del Perú. *Investigación y Ciencia* (Barcelona), 2000, n° 286, pp. 56-61.
- [5] RUDOLPH W.E. (1936). — The lakes of Potosí *The Geographical Review* (New York), vol. 26, n° 4, pp. 529-554.
- [6] VAZQUEZ DE ESPINOSA, A. (1628-29) — *Compendio y descripción de las Indias occidentales*. (Ch. Upson Clark, éd.), Smithsonian Miscellaneous Collections vol. 108, Smithsonian Institution, Washington (USA), 1948.
- [7] CALANCHA, FRAY A. DE LA (1638). — *Crónica moralizada del Orden de San Agustín en el Perú*. Pedro Lacavallería, Barcelona, et 2^e édition (Ignacio Prado Pastor, éd.), 6 tomes, Universidad San Marcos, Lima, 1974-81.
- [8] MENDOZA, FRAY D. DE (1664). — *Crónica de la provincia de San Antonio de los Charcas del Orden de Nro. Seraphico P. S. Francisco de las Indias Occidentales, Reynes del Perú*. sans mention d'éditeur, Madrid et 2^e édition, facsimilé, Don Bosco, La Paz, 1976.
- [9] ARZANS B. (1711). — *Anales de la Villa Imperial de Potosí*. (A. Crespo, éd.), Improprement daté de 1771, Ministerio de Educación y Cultura, La Paz, 1970, texte identique à la 1^{ère} édition faite à Paris en 1873 par Vicente Ballivián y Roxas.
- [10] ARZANS B. (1705-1737). — *Historia de la Villa Imperial de Potosí*. (L. Hanke & G. Mendoza, éd.), 3 t., Brown University, Providence (USA), 1965.
- [11] CANETE P.V. (1787) — *Guía histórica, geográfica, física, civil y legal del gobierno e intendencia de la provincia de Potosí*. (A. Alba, éd.), Editorial Potosí, Potosí, 1952.
- [12] MARTARELLI FRAY A. (1890). — *El colegio franciscano de Potosí y sus misiones. Noticias históricas*. Tipografía Italiana, Potosí
- [13] MARTARELLI FRAY A. (1936). — Destrucción de Potosí por el desborde de las lagunas. *Boletín de la Sociedad Geográfica « Potosí »*, n° 7, pp. 37-41.
- [14] SUBIETA SAGÁRNAGA L. (1936). — Hidrografía del departamento de Potosí *Boletín de la Sociedad Geográfica « Potosí »*, n° 7, pp. 1-9.
- [15] RUDOLPH W.E. (1983). — Las lagunas de Potosí. *Boletín de la Sociedad Geográfica « Potosí »*, n° 7, 1936, pp. 10-29 et 2^e éd., Colección de folletos bolivianos de « Hoy », (G. Ovando Sanz, éd.), La Paz, 24 abril, n° 21, pp. 1-16.
- [16] ARZANS B. (alias MARTINEZ VELA) (1711) — Reventazón de las lagunas *Boletín de la Sociedad Geográfica « Potosí »*, n° 7, 1936, pp. 30-36 (fragment de [9])
- [17] SCHNITTER N.J. (1994). — *A history of dams. The useful pyramids*. A.A. Balkema, Rotterdam & Brookfield.
- [18] MONTES DE OCA I. (1983) — *Sequia en Potosí* EMUSA, Potosí
- [19] CAMPOS I. (1992). — *Proyecto sanitario « Río de la Ribera »* Mayo, 39 p., AAPOS, Potosí
- [20] ESCOBARI L. (1982-83) — Las lagunas de Potosí. *Arte y Arqueología* (La Paz), n° 8-9, pp. 177-184
- [21] SERRANO C., PELAEZ P. (1991-92) — Potosí y su sistema hidráulico *Boletín de la Sociedad Geográfica et de Historia « Potosí »*, n° 14-15, pp. 44-52 & 75-93
- [22] SERRANO C., GIODA A. (1999). — Apuntes relacionados con la catástrofe hidráulica de 1626 en Potosí *Revista de la Casa de la Libertad* (Sucre), Año 3, n° 6, pp. 77-123.
- [23] GISBERT T., MESA J. DE (1993). — Potosí y su sistema hidráulico minero. In: *Obras hidráulicas en América colonial* Ministerio de Obras Públicas & CEHOPU, Madrid, pp. 151-164.
- [24] USLAR PIETRI A. (1995). — Del cerro de plata a los caminos extraviados. In: *El Cerro Rico de Potosí*, (W. Mendieta, éd.), Sociedad Geográfica y de Historia « Potosí », Potosí, pp. 215-229.
- [25] LE ROY LADURIE E. et al. (1990). — Sur les traces de l'argent de Potosí. *Annales ESC* (Paris), n° 2, pp. 483-505.
- [26] BAKEWELL P.J. (1988). — La producción registrada de plata en Potosí 1550-1735. *Historia y Cultura* (La Paz), n° 13, pp. 3-36.
- [27] LEBLANC M., MORALES J.A., BORREGO J., ELBAZ-POULICHET F. (2000). — 4500-year-old mining pollution in southwestern Spain: long-term implications for modern mining pollution *Economic Geology*, vol. 95, pp. 655-662.
- [28] GARCIA-GUINEA J., MARTINEZ-FRÍAS J., HARFY M. (1998) — La rupture du barrage de retenue d'Aznalcollar et ses conséquences écologiques sur le Sud de l'Espagne. *Nature & Ressources* (Paris), vol. 34, n° 4, pp. 45-47.

Références d'archives

- Archivo Nacional de Bolivia (ANB). — *Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia, Sucre*
- Colección RUCK. — « *Actas de los Acuerdos del Cabildo de Potosí* », vol. XVIII (21 mars 1626-10 mai 1628), ff. 2, 2v, 3, 3v, 6, 6v, 19, 19v, 23, 23v, 34v, 35, 35v, 53v, 54v, 115 et jusqu'à 289v.
- Colección RUCK. — « *Provisión librada para el marqués de Guadalcázar, virrey del Perú, para que el corregidor de Potosí reparta a los dueños de los ingenios* », n°7, ff. 71 et 73, 6 mai 1626
- LAACh — « *Información de méritos del corregidor Bartolomé Astete de Ulloa ante de Audiencia de Charcas* », t 13, f. 121, 24 janvier 1628.
- Archivo de la Casa de Moneda, Potosí Cajas Reales (CR) de Potosí n° 223, 226, 232, 242.

20. **Résumé : The 'Warm Medieval Period' and the Rise of the Inca State - 2005**
(avec Alex Chepstow-Lusty, M. R. Frogley, M. J. Leng, M. B. Bush, A. B. Cundy, K. P. Boessenkool et B. S. Bauer)



Revisar correo

Redactar

Buscar en mensajes v

Buscar en la Web

Carpetas [Añadir - Modificar]

Anterior | Siguiente | Volver a los mensajes

Presentación imprimible - Encabezados completos

Bandeja de entrada (442)

Eliminar

Responder v

Reenviar v

Es spam

Mover v


Borrador

Este mensaje no está marcado con una bandera. [Marcar mensaje - Marcar como no leído]

Enviado

Fecha: Tue, 26 Apr 2005 21:09:54 +0100 (BST)


Lotes de correo [Vaciar]

De: "A.J. Chepstow-Lusty" <ajc14@cus.cam.ac.uk>  Ver detalles de contacto

Papelera [Vaciar]

Para: gjoda_ird@yahoo.com

Mis carpetas [Mostrar]

Asunto:  Re: "Medieval Warm Period" and the rise of the Inca state (fwd)

For your info..

Alex

----- Forwarded message -----

Date: Fri, 22 Apr 2005 17:03:34 -0400

From: Jesse Smith <hjsmith@aaaas.org>

To: ajc14@cus.cam.ac.uk

Subject: Re: "Medieval Warm Period" and the rise of the Inca state

Dear Alex,

Your argument was clear and cogent enough that I will grant your request, and find referees for your paper. We will be in touch with you again when we have received the reviews and had a chance to evaluate them.

Best regards,

Jesse

=====

Dr. Jesse Smith

Senior Editor

Science

1200 New York Avenue, NW

Washington, DC 20005

USA

(202) 326-6556

(202) 408-1256 (FAX)

hjsmith@aaaas.org

=====

The 'Medieval Warm Period' and the Rise of the Inca State

A. C. Chepstow-Lusty¹, M. R. Frogley², M. J. Leng³, M. B. Bush⁴, A. B. Cundy², K. P. Boessenkool⁵, A. Gioda⁶, B. S. Bauer⁷

¹Département Paléoenvironnements (ISEM/CNRS), Université de Montpellier II, 34095 Montpellier cedex 05, France. ²Centre for Environmental Research, University of Sussex, Brighton BN1 9QJ, UK. ³NERC Isotope Geosciences Laboratory, Keyworth, Nottingham NG12 5GG, UK. ⁴Department of Biological Sciences, Florida Institute of Technology, 150 West University Boulevard, Melbourne FL 32901, USA. ⁵School of Earth, Ocean and Planetary Sciences, University of Cardiff, Park Place, Cardiff CF10 3YE, UK. ⁶Gratice, IRD (MSE), 34394 Montpellier cedex 5, France. ⁷Department of Anthropology, The University of Illinois at Chicago, Illinois 60302, USA.

Abstract

Two high-resolution multi-proxy lacustrine records from the Cuzco region of Peru reveal a regional drought at *c.* AD 1000-1100, followed by a warm episode between *c.* AD 1100 and AD 1550 that coincides both with the Northern Hemisphere Medieval Warm Period and substantial cultural turnover in the Andes. The data suggest that conditions favored societies such as the Inca, that intensively exploited the highlands through landscape transformation, including terracing, irrigation, and agroforestry. Oribatid mite remains are used here for the first time as a proxy for charting domestic animal densities (and, by extension, human activities), documenting clearly the rapid rise and fall of the Inca Empire (AD 1400-1532).

21. Ciencia antes que drama - 1997 (*avec Daniel Dory*)

CIENCIA, ANTES QUE DRAMA

La increíble edad de El Niño

Se sabe que, entre 1525 y 1992, este fenómeno climático se registró 119 veces, con una gran periodicidad. No afecta mecánicamente al clima —causando sequías o inundaciones— como afirma la prensa

ALAIN GIODA Y DANIEL DORY

Desde agosto de 1997, se publicaron en la prensa nacional varios artículos acerca de El Niño. Artículos a menudo catastróficos, con títulos de acento trágico, que hacen surgir temores de fines de milenio y que pueden generar temores fuera de lugar en el espíritu de los no-científicos. Es necesario recordar que El Niño no es un monstruo ni un asesino, sino un fenómeno natural, una fuente corriente marina caliente que existe desde hace milenios en el inmenso Océano Pacífico.

GÉNESIS DEL FENÓMENO

Los climas mundiales tienen un motor común cuya energía esencial está distribuida por el sistema océano-atmósfera. Los océanos cubren cerca del 70 por ciento de la superficie del globo. En el hemisferio sur, representan cerca del 90 por ciento de su superficie total. Lo cual significa que los mares y océanos tienen una influencia muy grande sobre el clima porque su masa es también 300 veces superior a la de la atmósfera. La circulación de las corrientes oceánicas y sus perturbaciones son probablemente más importantes en climatología que la circulación atmosférica.

El boliviano, habitante de un país montañoso que perdió el acceso al mar desde hace más de un siglo, no siempre cae en cuenta de estos hechos. Ciertamente, el país tiene más de un millón de kilómetros cuadrados, pero la corriente de El Niño, en abril de 1997, ya había

sido registrada sobre 14 millones de kilómetros cuadrados en el inmenso Océano Pacífico. El Niño es una corriente marina caliente que se presenta alrededor de la fecha de Navidad (de ahí su nombre) en las costas del Perú, del Ecuador y del norte chileno.

VISITAS PERIÓDICAS

Entre 1525 y 1992, es decir durante 468 años, El Niño se ha repetido 119 veces con una periodicidad de un año sobre cuatro, según el oceanógrafo norteamericano William H. Quinn.

Excepcionalmente pueden pasar ocho años entre dos eventos El Niño, pero es un intervalo máximo constatado solamente dos veces en el siglo XX. En general, este intervalo varía entre dos y cinco años. Numerosos rastros antiguos de El Niño se encontraron en los glaciares, notadamente en la cordillera de los Andes, en los anillos de crecimiento de árboles antiguos, en los arrecifes de coral, etc. En la historia del mundo y sus archivos, se detectaron rastros muy precisos del fenómeno El Niño hasta 600 años A.C.

HUELLAS COLONIALES

Después de la llegada de los españoles y la destrucción del imperio inca en 1532-34, El Niño fue muy bien identificado por los científicos en la Real Audiencia de La Plata y sus huellas se encuentran en las crónicas históricas en las que se anotaban los períodos secos y húmedos.

Para reconstituir un panorama de los climas antiguos se debe considerar la importancia de la contri-

bución jesuita y franciscana al inicio de la colonización. En Potosí, Bartolomé Arzans (1676-1736) fue, a su manera, el primer historiador del clima boliviano. En los siglos XVIII y XIX grandes administradores, como Francisco de Viedma en Cochabamba, obedeciendo a una ordenanza de Carlos III, tomaron cuidadosamente notas sobre la importancia y la calidad de las cosechas en función del clima. Los estudios científicos se multiplicaron después de las exploraciones y los trabajos pioneros del alemán Theodor Häntke entre 1797 y 1816 y del francés Alcides d'Orbigny en los años 1830.

El inicio de las observaciones meteorológicas instrumentadas en Bolivia data de 1891 en el Observatorio de San Calixto de La Paz, mientras que los datos de precipitación se utilizaron de modo cuantitativo desde 1907, gracias al trabajo del Padre Cabré y de Hugo Segalíne.

UNA LEGIÓN DE ESTUDIOSOS

En 1957 se marcó otro hito porque, en el marco del Año Geofísico Internacional, todos los países del globo y sus científicos trabajaron juntos por primera vez. Otra etapa fue franqueada en los 60 con la vigilancia total del globo mediante los satélites de la NOAA (Administración Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos).

En el Pacífico los datos a distancia de los satélites se completaron en los 70 con aquellos obtenidos directamente en el mar por los barcos mercantes que trabajaron

con la cooperación científica francesa (centros ORSTOM de Tahití y Nouméa).

Actualmente, más de 2 000 investigadores están abocados a estudios en laboratorios de Estados Unidos, Australia, Europa y América del Sur. El Niño del verano 1997-1998 será el más estudiado y el más controlado de toda la historia, lo cual es muy positivo.

LA POLEMICA SOBRE LOS EFECTOS

Se debe destacar que la corriente El Niño no implica necesariamente que se produzcan lluvias torrenciales o sequías. Dugamos con prudencia que El Niño probablemente afectará el clima de Bolivia este verano 1997-1998. Generalmente se admite que El Niño produce fuertes sequías en el altiplano y los valles interandinos y que no hay consecuencias significativas en las tierras bajas del oriente.

Según la geógrafa Josyane Ronchail, que elaboró sus conclusiones con datos del siglo XX (1952-1992) —y a partir de ocho episodios de El Niño de los cuales uno solo fue muy fuerte, el de 1982-83—, se verificó en la región andina una sequía durante la estación normalmente húmeda que va de octubre hasta marzo, la sequía fue muy marcada entre octubre y febrero. El déficit de lluvias fue de 10 hasta 20 por ciento respecto a lo normal. Al principio del invierno y durante la estación húmeda siguiente, es decir, un año después de El Niño, se registraron lluvias en exceso en los andes y los llanos.

Pero, como todo fenómeno natural, El Niño no tiene efecto mecánico en el clima.

Según los argentinos María del Rosano Prieto y Roberto Herrera, entre 1580 y 1641 las sequías en el altiplano boliviano y el noroeste argentino coincidieron con la aparición de la corriente El Niño en el 40 por ciento de los casos. Pero para el período 1663-1710, en las mismas regiones, y con un método de trabajo idéntico, se llegó a un resultado inverso. En un 45 por ciento de los casos se le atribuyeron a El Niño fuertes lluvias y solamente en el uno por ciento de los casos, sequías. Por lo tanto, no existen relaciones mecánicas, simples y estables en el tiempo entre El Niño y las precipitaciones medidas a escala anual en el altiplano boliviano y el noroeste argentino.

(*) Alain Gioda, climatólogo de la Cooperación Científica Francesa, escribió el presente artículo en colaboración con Daniel Dory, geógrafo, Director General de Ordenamiento Territorial del Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación.

AS CONSECUENCIA DE EL NIÑO DE 1982



RECUERDOS DE EL NIÑO

Una historia de la sequía

El primer El Niño identificado que afectó seriamente las lluvias tanto en Potosí como en la zona peruana fue, probablemente el de 1591-1593.

Se debe hacer notar que la memoria sobre las catástrofes es selectiva ya que los acontecimientos climáticos extremos pasaron a veces casi desapercibidos o bien, por el contrario, tuvieron un impacto duradero en la imaginación colectiva.

Cuatro episodios de fuertes sequías se destacan desde la segunda mitad del siglo XVIII en la historia boliviana.

PRIMER CAPÍTULO

La sequía de 1786-1787 presentó la originalidad de afectar toda la zona andina y por lo tanto todos sus pisos ecológicos. Este episodio no está ligado directamente a El Niño que se produjo un año antes, en 1785-1786, si consideramos que según el esquema de Ronchail el año posterior a El Niño la estación de lluvias debería ser buena en el territorio boliviano.

El valle de Cochabamba (Arequé) fue muy afectado por la sequía, así como todo el territorio de los actuales departamentos de Potosí (Lipez), Oruro (Parangas), La Plata (Yamparáez, Tomasa), Tarja y Santa Cruz. Una gran parte del territorio de La Paz y Puno también resultó damnificada.

PROBLEMAS PARA LA MINERÍA

La sequía de 1803-1805 se re-

gistró en un periodo extremadamente crítico para la industria minera de Potosí, debido al fin de las guerras de Napoleón, del aprovisionamiento regular de mercurio (azogue) y el agotamiento de la Rubera de la Vera Cruz, cuyas aguas generaban energía motriz para los ingenios de plata en la ciudad.

La combinación de estos sucesos derivó en la crisis de 1800-1805, según los términos del historiador argentino Enrique Tandeter, que marcó el fin del tercer boom de la plata de Potosí, impulsado por las reformas de Carlos III. La sequía también fue notable en la región de Cochabamba y la zona subandina quechuá. No obstante, desde el punto de vista de los oceanógrafos, El Niño de 1803-1804 fue ciertamente fuerte, pero menos marcado que el excepcional de 1791.

EN LA GUERRA DEL PACÍFICO

La sequía de 1877-1879 se dio paralelamente a la Guerra del Pacífico, que causó pánico colectivo a causa de los rumores sobre una invasión total del país por parte de los chilenos.

Una de sus consecuencias fue el saqueo de las tiendas en Cochabamba y Sucre en medio de hambrunas y motines en el campo, sobre todo en Arani (Valle Alto de Cochabamba) en 1878. Una buena parte del departamento de Potosí resultó también damnificada en 1878-79 (Chichas, Chayanta, Porco) y los potosinos pidieron ayuda chilena en octubre de 1878. La comente El Niño tuvo efectos ex-



UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA EN YAMPARÁEZ

cepcionalmente fuertes el verano de 1877-1878.

LA MÁS FUERTE

La sequía de 1982-1983 afectó gravemente al altiplano en una época muy convulsionada: la transición, en octubre de 1982, de la dictadura del Gral. García Meza al gobierno de la UDP. Este régimen de fuerza, sumado en la corrupción, redujo la capacidad estatal para conseguir ayuda externa y además tuvo que asimilar una brusca caída

de los ingresos por exportaciones, provocada por la crisis del estaño. Se produjeron masivas migraciones desde el área rural altiplánica a las principales ciudades del país. El Niño del verano 1982-1983 fue excepcionalmente fuerte. Y sólo es comparable con el del verano de 1925-1926 y el de la Navidad de 1891. Sin embargo, y no obstante lo excepcional de su intensidad, el de 1891 sólo tuvo consecuencias limitadas en Bolivia, principalmente en los alrededores de Potosí.

El verano 1997-1998, en general, no tiene tan mal aspecto. Las precipitaciones del verano 1996-1997 fueron muy abundantes en la zona más frágil de Bolivia, el altiplano meridional.

SIN EXAGERACIONES

El Niño que viene

Desde que el país está aislado del Océano Pacífico por la imponente cordillera occidental andina, experimenta la influencia marítima y, por tanto también los efectos de El Niño. Además un 60 por ciento del territorio se extiende a lo largo de la cuenca amazónica, una región en la que las repercusiones del fenómeno climático son muy débiles o de un análisis mucho más complejo. Durante los últimos ocho episodios importantes de El Niño, entre 1952 y 1992, estudiados por Josyane Ronchail, en los llanos orientales se registraron precipitaciones normales. Pero sin duda alguna el área más sensible a las brutales perturbaciones climáticas es el sur del altiplano, especialmente los departamentos de Potosí y Oruro, en los que se cultiva a secano, aunque El Niño también puede desatar sequías fuertes y duraderas susceptibles de extenderse a los valles interandinos de Sucre y Tarja, que tienen un clima muy irregular.

El verano 1997-1998, en general, no tiene tan mal aspecto en el país. La estación de lluvias del año pasado fue satisfactoria en la zona andina gracias al anti-Niño. La Niña,

que corresponde a un reforzamiento de la gran corriente oceánica casi permanente de Humboldt, a lo largo de las costas de Chile y Perú. Las precipitaciones del verano 1996-1997 fueron muy abundantes en la zona más frágil de Bolivia, el altiplano meridional, por lo que los depósitos acuíferos superficiales, ahora debidamente recargados, posibilitarían que se enfrente sin periodo de crisis si las lluvias de este verano son deficitarias.

MÁS OBRAS HIDRÁULICAS

Si se considera que uno de los objetivos perseguidos por el ordenamiento territorial es asegurar un acceso óptimo a los recursos en agua del país, entonces se debe impulsar la planificación y conclusión de obras de hidráulica que solucionen los problemas de las regiones productoras. Se experimenta los efectos de El Niño. Las fuentes de agua son insuficientes. El país cuenta ahora con los instrumentos institucionales necesarios para mitigar una calamidad eventual. Y la comunidad internacional puede sumarse a los esfuerzos desplegados hasta la fecha por el gobierno boliviano.



LA CORRIENTE DEL NIÑO SIEMPRE EN EL OCEANO PACÍFICO

22. Cardenas et les tubercules des Andes - 2000 (*avec Katia Humalla-Tasso*)



Cardenas et les tubercules des Andes

ALAIN GIODA • KATIA HUMALA-TASSO

Martin Cardenas fut le premier écologiste Sud-américain à promouvoir d'autres types de pommes de terre : les tubercules andins traditionnels.

Aujourd'hui, la pomme de terre, diffusée en France, à la fin du XVIII^e siècle, par Parmentier, est un légume universel. Les Andes, leur berceau, abritent plusieurs autres espèces de pommes de terre et de plantes à tubercules ou à racines comestibles qui pourraient être domestiquées, cultivées et exportées. Le botaniste et agronome bolivien Martin Cardenas (1899-1973) (*ci-dessus*) s'est battu toute sa vie pour revaloriser l'agriculture des Andes, bien au-delà de ses montagnes natales, et pour promouvoir les tubercules andins autres que la pomme de terre.

Rien ne prédispose Cardenas à une carrière scientifique : issu d'un milieu très modeste, il naît en 1899 d'une mère indienne quechua, dans un pays où la population compte plus de 80 pour cent d'illettrés (les principaux peuples indiens de Bolivie sont les Aymaras et les Quechuas). Isolée, car elle a perdu l'accès à la mer en 1879, après une guerre contre le Chili, la Bolivie est pauvre : la richesse issue des mines d'étain et d'argent est concentrée dans les mains d'une infime minorité de la population. Le pays compte alors moins de trois millions d'habitants. Quand Cardenas aura une trentaine d'années, c'est-à-dire au début de sa carrière, son pays perdra la guerre contre le Paraguay soutenu par l'Argentine. Durant cette guerre (1932-1935), 60 000 hommes tomberont et 200 000 seront blessés. Cardenas participera en tant que scientifique du contingent à ce conflit désastreux.

Ce cadre familial, économique et politique ne semble guère favorable à l'éclosion d'un scientifique et, pourtant, Cardenas écrira et publiera plus de 150 articles et livres ;

découvrira presque 200 cactées, une vingtaine de pommes de terre sauvages et une douzaine d'amaryllis ; dirigera des fermes modèles ; sera recteur d'université ; créera un jardin botanique ; stimulera l'intérêt pour la médecine traditionnelle indienne et les plantes d'intérêt pharmaceutique ; donnera des conférences dans le monde entier ; sera le correspondant de très nombreuses sociétés savantes et d'institutions dont le Muséum national d'histoire naturelle de Paris...

Cardenas entreprend des études de professeur de collège, cursus obligé pour un jeune homme pauvre, mais méritant, qui passe d'abord par l'École normale bolivienne des instituteurs. Sa vocation naît sans doute vers 1921, lorsqu'il achève sa période de formation comme enseignant et qu'il est recruté comme assistant de l'exploration botanique de l'Amazonie bolivienne, animée par Henry Rusby, alors directeur du jardin botanique de New York. En 1932, dans le premier livret qu'il publie, *Plantae potosinae*, il écrit que son ambition est d'être un grand botaniste à l'égal

de ses illustres prédécesseurs européens et Nord-américains.

Rien ne le fera dévier de son objectif : ni un salaire médiocre, ni les lourdes tâches d'enseignement et d'administration, ni l'indifférence générale. Cardenas se consacrera à la science (son mariage célébré en 1930 ne sera que de courte durée) ; il apprendra la plupart des langues européennes, transformera sa maison en laboratoire et en bibliothèque, espérant faire évoluer les mentalités locales et en diffusant sans relâche des informations scientifiques en espagnol, notamment dans la presse de son pays.

Mobilisé sur le front paraguayen entre 1932 et 1934, année où il sera rapatrié sanitaire, Cardenas fait partie de « la génération de la guerre du Chaco » (1932-35). Les soldats boliviens sont envoyés contre ceux du Paraguay sur le front du Chaco, un vaste désert semi-aride infesté par le paludisme, très différent de leurs montagnes natales. L'approvisionnement en vivres et en médicaments fait défaut et, dans les tranchées, ils réalisent que leur gouverne-

ment, fondé sur l'oligarchie minière de l'étain, les a condamnés à une mort certaine en les envoyant au front. Après la défaite, une partie des officiers subalternes (souvent des métis comme Cardenas) conspire pour prendre le pouvoir. Cette génération, qui apprit l'autonomie intellectuelle au combat et dont fait partie Cardenas, changera la société bolivienne dans les années 1940 et 1950.

Cardenas a un maître spirituel : Simon Bolivar. Le libérateur du continent Sud-américain avait mis fin à la colonisation espagnole en 1825, et avait



Fête de la fécondité à Cochabamba.

lenté, au début du XIX^e siècle de fédérer l'Amérique latine sur le modèle des États-Unis et de lui transmettre l'esprit des Lumières par la diffusion du savoir dans les couches populaires. Cette volonté culturelle reste prégnante chez les intellectuels Sud-américains nationalistes et progressistes. L'assemblée constituante de 1825 dédie la Bolivie au libérateur Bolivar. L'un de ses lieutenants, le général Sucre donne son nom à la nouvelle capitale, et est, durant son court mandat présidentiel (1826-1829), un représentant de ce courant progressiste qui perdure sous le gouvernement du maréchal Santa Cruz (1829-1839). Malheureusement, la diffusion du savoir dans les couches populaires ne devient une priorité, au-delà des discours, que durant les premières années de la république. Symbolisé par la révolution mexicaine de 1910, un courant indigéniste se développe dans les sociétés métisses de la plupart des pays d'Amérique latine et réhabilite l'héritage culturel des civilisations précolombiennes. Cardenas y adhère en se battant pour revaloriser les plantes domestiquées par les Indiens.

LA DIVERSITÉ DES CULTURES ANDINES

Les tubercules sont méconnus en Europe. Hormis la pomme de terre, les autres tubercules andins ne sont guère connus hors de leur zone d'origine et de culture (à l'exception de l'un d'eux en Nouvelle-Zélande) ; c'est pourquoi Cardenas les qualifiait de «mineurs». En fait la conquête espagnole de l'Amérique au XVI^e siècle s'est accompagnée d'un racisme envers les indigènes, et d'une dévalorisation systématique de leur environnement culturel, notamment de leur alimentation : les produits alimentaires traditionnels ont été écartés. Or, les Incas, dans leur vaste empire, qui s'étendait de l'Équateur au Nord de l'Argentine et du Chili actuels, cultivaient un nombre d'espèces (200 à 300) bien supérieur à celui que l'on connaissait alors en Asie et en Afrique.

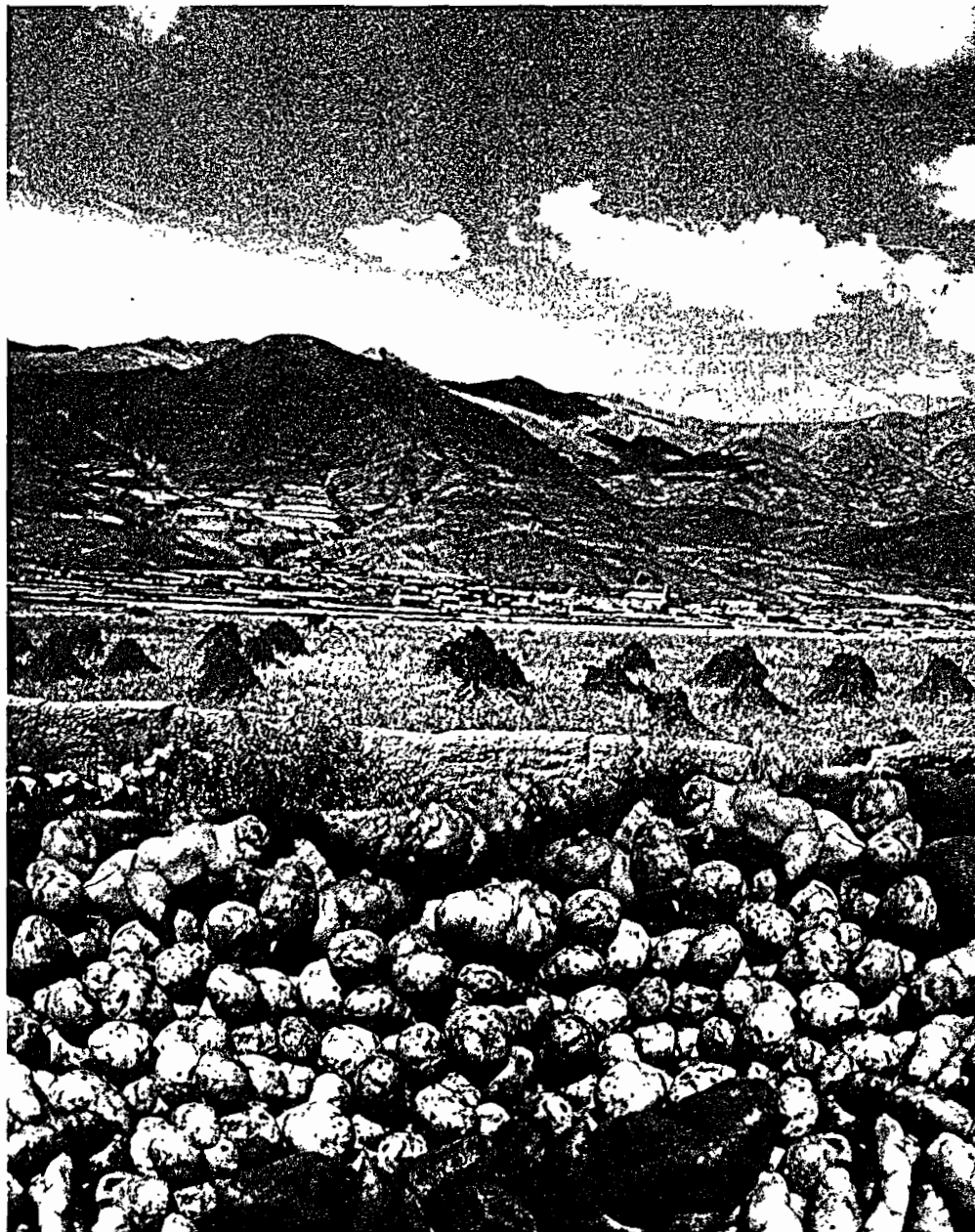
Depuis l'époque préincayenne (avant le XV^e siècle), les populations des Andes vénèrent le dieu Soleil (*Inti*) et la déesse Terre (*Pachamama*), ainsi que les produits qu'elle donne grâce au travail des agriculteurs. Pourtant les immenses steppes de l'Altiplano sont désolées, le froid nocturne y est intense au-dessus de 3 700 mètres d'altitude et les habitants contraints à la frugalité. La terre, en apparence stérile, donne pourtant des tubercules comestibles, considérés comme un don des dieux. La domestication et la culture des tubercules, telles que la papalisa, l'oca et l'isaño, sont

l'œuvre des peuples aymara et quechua, qui ont joué un rôle prépondérant dans l'agriculture andine.

Plus encore que la chute des Incas, survenue dès 1533-1534 face à moins de 200 Espagnols, les nouveaux modes de vie imposés par les conquérants, l'exploitation d'animaux et de plantes inconnues jusqu'alors bouleversent les habitudes (sans compter l'introduction involontaire de maladies agressives qui déciment les ethnies indiennes). L'une des premières actions des Espagnols consiste à fonder des villes qu'ils équipent d'un four pour cuire le pain. Pour préparer le pain, il faut du blé. Or, sur l'Altiplano, à plus de 3 700 mètres d'alti-

tude, il ne pousse pas : on l'importe des régions côtières du Pérou (autour d'Arequipa), où il a été introduit par les colons. De même, la vigne est une culture étrangère au monde andin, mais elle s'acclimata rapidement dans les vallées chaudes et sèches des montagnes. Pain et vin sont les symboles de la présence du dieu imposé par le clergé catholique, qui travailla toujours «main dans la main» avec le pouvoir espagnol sous un régime conjoint, connu sous le nom du patronat. Au premier, revenait le spirituel, au second, le temporel.

Selon la chronique de l'Inca Garcilaso de la Vega, métis de sang royal indien du XVI^e siècle, «les Rois Catholiques et



En Bolivie, près de Potosi, à 3 500 mètres d'altitude (à l'arrière plan), les Indiens cultivent diverses sortes de tubercules (au premier plan) avec des rendements parfois équivalents à celui de la pomme de terre. La préservation de ces cultures traditionnelles est un atout pour les populations locales et Martin Cardenas a tenté de les préserver.

l'empereur Charles Quint avaient donné l'ordre d'offrir sur le trésor royal un joyau au premier qui, dans n'importe quelle ville [d'Amérique fondée par les colons européens], obtiendrait un produit nouveau d'Espagne, tel que blé, orge, vin, huile, en certaine quantité».

L'introduction des animaux domestiques européens est aussi rapide. Les premiers bœufs labourèrent une parcelle, en 1550, dans la vallée de Cuzco. En juin 1551, moins de trois années après la fondation de la cité de La Paz, on mentionne, dans les actes municipaux, la gêne causée par le bétail. Vaches, moutons, chèvres, porcs, chevaux, ânes et mulets prennent la plus grande place, et les

camélidés andins domestiques – le lama et l'alpaga – sont délaissés. La commercialisation des mulets est encouragée : l'élevage de ces animaux de bât était aux mains des Espagnols, contrairement à celui des lamas détenu par les Indiens (le mulet porte des charges supérieures à celles du lama).

Les conséquences de la mainmise des Espagnols sur l'agriculture s'est également fait sentir et, aujourd'hui encore, les plantes originaires des Andes continuent d'être ignorées, affublées d'une connotation péjorative. Par exemple, la quinoa (*Chenopodium quinoa*) qui jouait le rôle de céréale sur l'Altiplano avant l'arrivée des Espagnols a longtemps souffert

de l'introduction du blé et de l'orge dans les vallées andines sèches.

Même après l'indépendance des États Sud-américains, dans les années 1810 et 1820, le modèle dominant reste celui de l'Europe. Aujourd'hui encore chez les Métis et chez les Indiens, la chicha, la bière de maïs qui est la boisson alcoolisée traditionnelle, est délaissée au profit de la bière à base d'orge d'origine européenne et des boissons gazeuses non alcoolisées (la bière d'origine européenne est fabriquée localement depuis la fin du XIX^e siècle).

Ce n'est qu'au début du XX^e siècle, que la composante indienne d'une société essentiellement métisse commence à

Papalisa ou ulluco

Nommée papalisa en espagnol et ulluco en quechua et en aymara, *Ullucus tuberosus* est une plante herbacée annuelle, rampante ou semi-érigée (elle atteint parfois 50 centimètres de hauteur). Les tiges portent des feuilles charnues, en forme de cœur, de quelques centimètres de longueur. À l'extrémité des racines, grossissent des tubercules qui tirent leur nom de leur aspect (littéralement, pommes de terre lisses). Ces tubercules ont une forme variable, ronde à cylindrique, mesurant de 2 à 15 centimètres et dont la couleur va du blanc, au jaune et, même, au pourpre tacheté.

Des formes sauvages poussent au Pérou et en Bolivie, mais la plante est cultivée dans toutes les Andes, du Venezuela au Nord, à l'Argentine au Sud. Au Pérou, le principal producteur, les superficies cultivées étaient de l'ordre de 20 000 hectares, au début des années 1990. La papalisa est une culture de complément souvent associée à la pomme de terre, à l'oca et à l'isaño, au-dessus de 3 000 m d'altitude, ou bien au maïs, au Venezuela.



P.-O. Combettes, A. Grodz

Elle est cultivée dans les Andes entre 2 500 et 4 000 mètres d'altitude mais elle s'acclimate au niveau de la mer. Elle tolère une grande diversité de sols, mais préfère les terres argileuses.

Les tubercules sont amers ; on les fait bouillir avant de les consommer frits, en purée ou en ragoût. On peut les conserver frais. Toutefois, comme les

autres tubercules andins, ils sont souvent exposés au gel nocturne et à la chaleur diurne : lorsque l'eau s'est évaporée, il se conservent pendant des mois. Avant de les manger, on les plonge dans l'eau de cuisson. Les tubercules frais contiennent environ 85 pour cent d'eau, 14 pour cent d'amidon et de sucre et 1 pour cent de protéines. Les rendements des cultures sont faibles en raison des pertes causées par les virus et de la pourriture, durant le stockage.



Oca, papa roja ou okka

Encore nommée okka, en quechua, ou truffette acide, en français, *Oxalis tuberosa* est une plante annuelle de 30 à 40 centimètres de hauteur. Les tiges et les feuilles sont vertes ou pourpres. Quatre mois après la plantation de tubercules entiers, des rejets se forment sur les tiges et de nouveaux tubercules apparaissent ; ils atteignent leur maturité au bout de deux à trois mois. Les tubercules ont des formes ovoïdes à cylindriques, des couleurs variées (blanche, jaune ou pourpre, ce qui leur a valu leur nom de papa roja, ou pomme de terre rouge en espagnol) ; ils atteignent parfois une vingtaine de centimètres.

Vraisemblablement originaire de l'Altiplano du Pérou et de la Bolivie, l'oca est le tubercule le plus cultivé après la pomme de terre, du Venezuela à l'Argentine, et surtout au Pérou et en



P.-O. Combettes, A. Grodz

Bolivie au-dessus de 2 500 mètres. Introduite au Mexique au XVIII^e siècle, cette espèce est aussi cultivée de façon intensive en Nouvelle-Zélande.

Elle pousse en zones tropicales et

subtropicales et résiste mal à la sécheresse. Les rendements sont meilleurs sur les terrains légèrement acides.

L'oca se consomme comme la pomme de terre, mais également crue et marinée dans le vinaigre. Comme la pomme de terre et la papalisa, elles peuvent aussi être alternativement séchées et congelées : ce mode de conservation traditionnel est nommé le chuño. La valeur nutritive de l'oca est comparable à celle de la pomme de terre.



être revalorisée et que les milieux intellectuels s'y intéressent. Cardenas s'inscrit dans ce courant de pensée. Toutefois, il ne verse pas dans le travers de l'indigénisme ; il se refuse à peindre sous les couleurs de l'enfer l'héritage Espagnol et sous celles du paradis perdu celui des Indiens. Plus technicien qu'idéologue, il s'attache surtout à l'amélioration de la pomme de terre et du maïs et à la revalorisation de trois tubercules andins négligés : la papalisa, l'oca et l'isaño.

Sa bonne santé psychique et physique, nécessaire dans un pays où sévissent le mal des montagnes au-dessus de 3 500 mètres, le paludisme, la maladie de Chagas et la leishmaniose (à moindre altitude) aide Cardenas à conserver son enthousiasme tout au long de sa carrière. Vers 1970, des traitements à base de morphine lui seront nécessaires pour supporter un cancer de la prostate.

Il travaille avec les forces armées qui joueront un rôle essentiel dans la vie publique au xx^e siècle, en Amérique latine, et jusqu'en 1982, en Bolivie. Ainsi, il enseigne dans les collèges militaires de La Paz au début de sa carrière professorale ; il collabore à un projet d'usine de quinine dans les années 1930 pour lutter contre le paludisme des troupes ; il étudie les plantes médicinales durant la guerre du Chaco et il dispense des cours de chimie aux élèves des écoles des armées, dans les années 1940. Toutefois, jamais Cardenas n'apporte son soutien aux régimes militaires dictatoriaux : la politique ne l'attire pas.

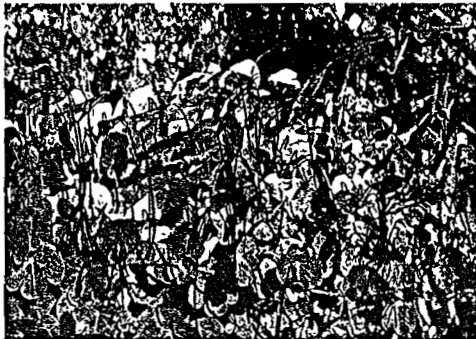
Grâce à ses publications, et bien qu'il soit autodidacte, Cardenas devient, en 1936, recteur l'Université San Simon de Cochabamba. Ainsi, à 37 ans, il revient dans sa ville natale, où il enseignera pendant plus de 30 ans.

Il sillonne la brousse et les marécages particulièrement malsains de l'Est bolivien, et organise des stages de terrain pour ses étudiants, sur l'Altiplano. Jamais, il ne reniera ses origines : il parle parfaitement les deux principales langues indiennes du pays, le quechua (la langue de l'empire Inca) et l'aymara.

Il appartient à plusieurs réseaux internationaux de savants qui facilitent ses publications, et à des groupes de collecteurs de plantes des Andes. D'un naturel généreux, il envoie gracieusement plantes et graines à ses correspondants scientifiques étrangers. Il dédommage ses collecteurs en leur faisant dédier de nombreuses espèces nouvelles. Cardenas ne bénéficie que d'un seul don de la Fondation Rockefeller : un véhicule tout-terrain qui lui servira à la fin de sa carrière pour les missions en brousse.

L'isaño ou la mashua

L'isaño, en aymara, la mashua, en Équateur et au Pérou, ou encore le cubio, en Colombie, se nomme le *Tropaeolum tuberosum*. De la même famille que la capucine, l'isaño lui ressemble par son port, ses feuilles et ses fleurs. C'est une plante herbacée pérenne semi-érigée, rampante ou parfois grimpante de plusieurs dizaines de centimètres de longueur. Les tubercules apparaissent vers trois mois.



P.-O. Combettes A. Goda

A maturité, ils sont coniques, du blanc au rouge, parfois tachetés, et leur chair est jaune.

Des types sauvages de cette plante poussent au Pérou et en Bolivie au-delà de 3 000 mètres et en Équateur et en Colombie entre 1 500 et 2 000 mètres. C'est le tubercule le moins consommé des Andes et on ne le cultive nulle part ailleurs. L'isaño réclame beaucoup d'eau et, tolérant aux sols alcalins, il prospère dans les milieux fertiles, riches en matière organique.

Les tubercules ont un goût amer, qui disparaît à la cuisson. On les consomme frites ou en soupe. Congelés et séchés, ils perdent aussi leur amertume et ils peuvent se conserver de longs mois comme les autres tubercules andins. Ils sont riches en vitamine C.

Il paie sur ses fonds propres sa bibliothèque et son laboratoire photographique, notamment. Pendant de nombreuses années, il représente son pays dans les instances agronomiques et botaniques internationales.

CARDENAS ÉCOLOGISTE

Martin Cardenas ne participe pas directement à la vie politique de son pays. Il n'adhère ni aux idées fascistes en vogue, en Amérique latine jusqu'aux années 1950, ni aux idées communistes répandues jusque dans les années 1970. C'est un positiviste. Pour changer les mentalités, Cardenas croit à la diffusion du savoir scientifique et technique dans les différentes couches sociales, y compris chez les Indiens.

Toutefois, en Amérique latine, la tâche est ardue, car l'héritage colonial espagnol a diffusé, parmi l'élite, le goût des études de droit. Le mépris des travaux manuels et de la technique dans une civilisation essentiellement urbaine est ancré parmi la noblesse d'Espagne installée aux Amériques. Dans ces conditions, la culture scientifique et, notamment, l'agronomie ont des difficultés à se répandre. Selon Cardenas, aucune révolution nationale ou internationale ne sera un remède à l'ignorance des paysans. Il est le premier écologiste andin, se battant pour

la conservation et la protection de la montagne, alors que la plupart des progressistes prônent alors une industrialisation massive pour sortir le continent Sud-américain du sous-développement. Durant les dernières années de sa vie, il écrit de nombreux articles, mais sa voix n'a guère d'écho hors du cercle de ses amis.

Cardenas ne fut ni prisonnier de son époque ni de son milieu d'origine, mais il ne fut pas en phase avec les aspirations de la société de son époque, urbaine et fascinée par le miracle industriel. Plus de 25 années après sa disparition, son message reste d'actualité : les forêts naturelles d'Amérique du Sud, abattues à un rythme accéléré, doivent être préservées ; les produits de l'agriculture traditionnelle andine, notamment la papalisa, l'oca et l'isaño, doivent être davantage exploités.

Alain GIODA reconstruit l'histoire du climat andin dans le programme Neiges et Glaciers Tropicaux de l'Institut de recherche pour le développement, IRD, en association avec le Service national bolivien de météorologie et d'hydrologie, SENAMHI, à Cochabamba. Katia HUMALA-TASSO, chercheur en ethnobotanique, étudie les plantes natives cultivées à l'Institut Français des études andines, IFEA, à La Paz.

23. **Résumé : Analyse et variabilité temporelle d'une longue série de pluies des Andes en relation avec l'Oscillation Australe - 2001/2004** *(avec Josyane Ronchail, Yann L'Hôte et Bernard Pouyaud)*

Second International Conference on

**TROPICAL CLIMATOLOGY,
METEOROLOGY AND HYDROLOGY**

**Climate-related Risk Analysis and Sustainable Development
in Tropical Areas**

Brussels, 13-14 December, 2001



Royal Meteorological Institute
of Belgium



Royal Academy
of Overseas Sciences

Guest Editors : G. Demarée, M. De Dapper, J. Alexandre

2004

Second International Conference
"Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology"
Proceedings edited by
G. Demarée, M. De Dapper, J. Alexandre
pp. 199-217 (2004)

Analyse et variabilité temporelle d'une longue série de pluies des Andes en relation avec l'Oscillation Australe (La Paz, 3 658 m, 1891-2000)

par

Alain GIODA*, Josyane RONCHAIL**, Yann L'HOTE* &
Bernard POUYAUD***

MOTS-CLES. — Précipitations ; Variabilité climatique ; Oscillation Australe ; Andes.

RESUME. — La station de San Calixto (La Paz, Bolivie), suivie par les jésuites, depuis 1891, est d'un intérêt particulier pour les pluies. Son altitude (près de 3 700 m) est exceptionnelle pour une aussi longue durée d'observation et la qualité de ses données. La série des précipitations annuelles est stationnaire, preuve de la stabilité de cette composante climatique pendant plus d'un siècle. Les relations entre les sécheresses et les phases de l'Oscillation Australe (épisodes El Niño et La Niña) sont complexes à San Calixto. L'apport principal du travail est de montrer que la phase La Niña en Bolivie andine serait aussi associée à des sécheresses, caractéristique qui n'apparaissait pas jusqu'ici dans la littérature scientifique dont les analyses ne se basaient que sur l'interprétation de séries météorologiques courtes, ne remontant pas au-delà de 1950.

1. Introduction

San Calixto de La Paz est la station de météorologie la plus ancienne de Bolivie avec plus d'un siècle d'observations [1]****. La longue série ---

* U.R. Greatice, IRD, B P 5045, 34032 Montpellier cedex 1 (France)

** LMD-CNRS et GHSS de l'Université de Paris-VII (en accueil à l'IRD, Brasilia, Brésil).

*** U.R. Greatice, IRD, Casilla 18-1209, Lima 18 (Pérou)

**** Le chiffre entre crochets [] renvoie à la note, p 216.

24. Alcide d'Orbigny, voyageur philosophe en Amérique - 2002 (*avec Jean-Claude Roux et Marie-Thérèse Vénec-Peyré*)

Alcide d'Orbigny, voyageur

ALAIN GIODA • JEAN-CLAUDE ROUX

De 1826 à 1833, le naturaliste français Alcide d'Orbigny explore l'Amérique du Sud. Il étudie les espèces animales et végétales, mais aussi les sociétés des pays qu'il visite, proposant des réformes pour leur développement.



Indiens - Fibres - laine - crinoline - Alibi - Gioda

philosophe en Amérique

Au XIX^e siècle, Alcide d'Orbigny (1802-1857) fut tout à la fois voyageur et naturaliste, géologue et paléontologue, prospecteur et ethnologue, grand reporter par toutes les estampes qu'il produisit des sociétés rencontrées au fil de son voyage en Amérique du Sud. Témoin du monde animal et du monde végétal qu'il y découvrit, il contribua aussi à l'élaboration des théories catastrophistes de l'évolution. Partisan du fixisme des espèces, défendu par Georges Cuvier, d'Orbigny imagina qu'au cours des temps géologiques, 27 extinctions totales de la vie sur Terre, suivies d'autant de créations avaient eu lieu. Il s'opposa au transformisme de Lamarck, que Darwin fit triompher. Il suivit les traces d'Alexandre von Humboldt qui sillonna l'Amérique latine, de 1799 à 1804, et précéda Charles Darwin qui, de 1831 à 1836, explora les côtes de l'Amérique du Sud, puis l'Australie.

D'Orbigny traverse les nouveaux pays de l'Amérique du Sud (l'Argentine, l'Uruguay, alors en gestation, et le Chili), de l'arc andin (le Pérou et la Bolivie) et pousse ses explorations jusqu'aux frontières du Paraguay et du Brésil (voir la figure 2). Durant son voyage, il doit observer et collecter pour le Muséum national d'histoire naturelle objets et témoignages de ces pays lointains. Il décrit 160 mammifères, 860 oiseaux, 115 reptiles, 166 poissons, 980 mollusques, 5 000 insectes et crustacés et 3 000 plantes, mettant à profit ses talents d'illustrateur. Il rapportera 100 000 objets naturalistes, géologiques et paléontologiques.

Humaniste, d'Orbigny observe en ethnologue et en historien les sociétés dont il partage la vie quotidienne, et qui sont le fruit de la rencontre des civilisations amérindiennes et euro-

péennes. Dans le contexte de l'indépendance des États d'Amérique du Sud, il décrit les modes de vie, les contraintes auxquelles doivent faire face les Sud-Américains et les défis qu'ils devront relever.

À son retour à Paris, il publiera le récit de son voyage, accompagné de 80 dessins et de 12 planches en couleur. Charles Darwin lui rend hommage en qualifiant cet ouvrage de «monument de la science du XIX^e siècle», mais qui était d'Orbigny? Dans quel contexte son voyage s'est-il déroulé? Quels étaient ses objectifs avant son départ, son état d'esprit pendant son périple et les impressions qu'il en a retirées? Les réponses à ces questions apparaissent avec clarté quand on examine sa vie, replacée dans le contexte social, économique et politique de la première moitié du XIX^e siècle.

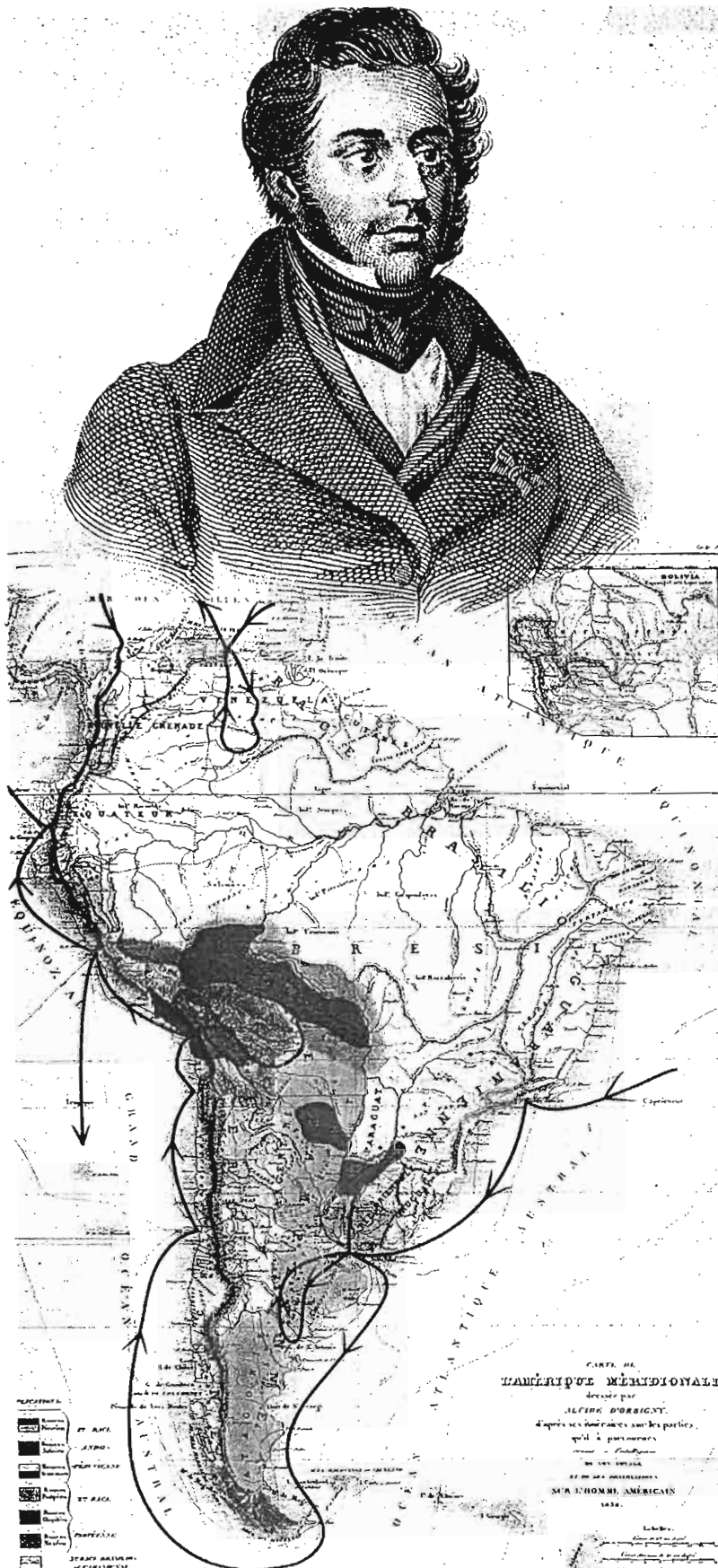
D'Orbigny naît à Couëron, près de Nantes, le 6 septembre 1802. Son père, médecin dans la marine, lui transmet sa passion pour les sciences naturelles. En 1820, sa famille s'installe à La Rochelle, une ville ouverte sur la mer et sur les voyages. Il passe son adolescence à étudier les foraminifères, des micro-organismes marins unicellulaires entourés d'une coquille calcaire, fondant ainsi la micropaléontologie (voir l'encadré page 72). Ce travail, publié alors qu'il n'a que 23 ans, impressionne ses contemporains, notamment Humboldt et Cuvier.

L'indépendance de l'Amérique espagnole

Pendant son voyage, Humboldt, accompagné du botaniste Aimé Bonpland, a parcouru près de 10 000 kilomètres à travers les Caraïbes, l'Amérique du Sud et le Mexique. Il a mis en évidence la liaison entre les fleuves Orénoque et Amazone, exploré la cordillère des Andes et escaladé les pentes du volcan Chimborazo (culminant à 6310 mètres). De leur périple,

1. ALCIDE D'ORBIGNY

a parcouru, huit années durant, la Bolivie et d'autres pays d'Amérique du Sud. Il s'est intéressé aux sociétés qu'il rencontrait et en a souvent croqué des scènes de vie. Ici, une vente de pommes de terre sur un marché à Cochabamba (à l'arrière plan, le Huayna Potosi, 6 088 mètres, au Nord de La Paz).



2. LES ITINÉRAIRES SUD-AMÉRICAINS de Humboldt (1799-1804) et de d'Orbigny (en haut, 1826-1833) se complètent. Humboldt (qui avait suivi lors de son propre voyage l'itinéraire bleu) a participé aux préparatifs de la mission de d'Orbigny. Le périple de d'Orbigny (en rouge) a commencé à Rio de Janeiro. Les zones où il a séjourné le plus longtemps sont en vert foncé. Darwin a exploré les côtes de l'Amérique du Sud du Brésil aux Galapagos, suivant un itinéraire comparable à celui de d'Orbigny.

les deux compagnons ont rapporté de nombreuses descriptions de minéraux, végétaux et animaux ainsi que des données géographiques et climatiques. Depuis le voyage d'Humboldt, les scientifiques portent un grand intérêt au Nouveau-Monde : ils veulent y étudier des phénomènes physiques, y rechercher des substances végétales et animales inconnues et enrichir toutes les collections qu'amassent les musées. Le contexte politique s'y prête, car en ce début de XIX^e siècle, de nouvelles républiques viennent de naître en Amérique du Sud, sur les ruines de l'Empire espagnol. Pendant des siècles, l'Espagne avait limité, voire interdit, les visites des étrangers (et surtout des savants, soupçonnés d'espionnage). L'indépendance des républiques a levé ces restrictions : l'Amérique latine cesse d'être isolée vis-à-vis de la communauté scientifique internationale. Ainsi, le voyage de d'Orbigny se déroule de 1826 à 1833 – période des indépendances – sous des auspices favorables.

Pour les jeunes dirigeants Sud-américains, l'Espagne représente alors l'obscurantisme colonial abhorré. Au contraire, l'Angleterre jouit d'un grand prestige aux yeux des Créoles cultivés (les descendants des conquistadores), notamment pour l'aide qu'elle a apportée à Simon Bolivar, le libérateur des Amériques. C'est aussi le cas de la France, patrie des Lumières, dont les perspectives sociales ont été diffusées par les encyclopédistes, puis par la Révolution. Ces deux pays incarnent la modernité, et fournissent des modèles rationnels et universalistes ouvrant la voie au progrès. Le maréchal André de Santa Cruz, président de la Bolivie de 1829 à 1839, réserve un bon accueil à d'Orbigny. Il puise même dans le Trésor du pays, pourtant exsangue, pour financer une partie de ses explorations et lui fournir assistants et guides. Les Anglais sont pragmatiques et industriels : ils souhaitent réactiver l'exploitation des mines d'argent de Potosi et établir de nouveaux courants commerciaux. Quant à la France, bien qu'elle soit en quête d'un renouveau économique outre-Atlantique après les vicissitudes de l'ère napoléonienne, elle ne s'intéresse que de loin à ces nouvelles perspectives.

Un voyage scientifique au service du progrès

De 1824 à 1826, d'Orbigny prépare son voyage, bénéficiant des conseils de Humboldt, de Cuvier, de Geoffroy Saint-Hilaire... Le Muséum lui octroie une allocation, que complète une dotation du duc de Rivoli.

Dans la préface de *L'Homme américain*, ouvrage publié à son retour en 1839 et qu'il dédie à Humboldt, il présente une classification des Indiens d'Amérique ; il confie qu'il aspire à imiter son illustre devancier dans la tradition des voyageurs philosophes. «Nous sentions que notre étude spéciale, celle des animaux-mollusques et rayonnés [aujourd'hui dénommés foraminifères], à laquelle nous nous étions livrés, après avoir étudié les autres branches de la zoologie, ne pouvait nous suffire [...], nous devons embrasser non seulement l'ensemble de la zoologie et de la botanique, mais encore plusieurs sciences qui s'y rattachent intimement. La géographie, par exemple, des plus indispensables à toute recherche d'histoire naturelle...».

Aussi, d'Orbigny diffère-t-il d'un an son départ aux Amériques, afin d'acquérir des connaissances complémentaires, notamment sur les populations Sud-américaines. Il souligne que Cuvier, faute d'informations scientifiques suffisantes, se refusait, encore en 1825, à faire entrer les

Américains dans une des trois grandes races connues, la Blanche, la Noire et la Jaune. Seul Azara, commissaire du roi d'Espagne, avait décrit les Indiens du Paraguay ; toutes les autres populations restaient à étudier.

Ainsi, le 29 juillet 1826, d'Orbigny s'embarque à Brest, imprégné des thèses des philosophes des Lumières, qui, tel Condorcet, avaient prêché les bienfaits des arts et des sciences, devant assurer la maîtrise des forces de la nature et aider l'homme à comprendre le monde. Il part pour une quête scientifique, résolu à contribuer au progrès de l'Amérique. En débarquant, il est porté par cette idéologie qui devait engendrer le progrès, instaurer la justice, assurer l'harmonie des institutions et ouvrir la voie du bonheur à l'humanité entière.

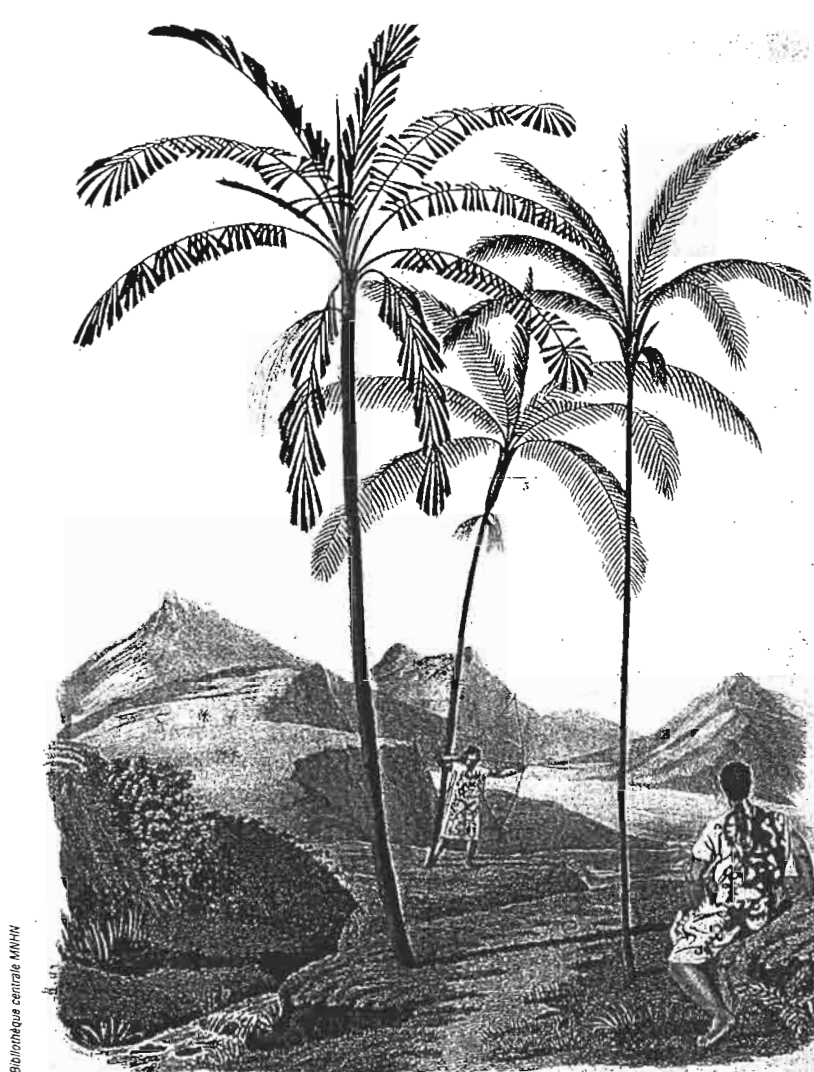
Il explore l'Argentine et la «Banda Oriental», le futur Uruguay. Puis il se rend au Chili en doublant le Cap Horn, arrive au Pérou et en Bolivie, où il reste trois ans. Hélas, la réalité ne répond pas à ses espoirs. À Buenos Aires, où il séjourne de 1827 à 1829, il se désole de la rareté des publications, qu'il considère comme un indicateur du degré de civilisation atteint par une société. Il constate que l'Amérique du Sud se satisfait d'être un continent consommateur, quand l'Europe est une grande puissance manufacturière. Partout où il passe, il étudie la situation et propose, en véritable ingénieur, des solutions permettant la création de manufactures. En 1833, il écrit, non sans prémonition, que la production d'étain de Huanuni (alors Guanuni), sur l'Altiplano, pourrait être centuplée.

D'Orbigny considère l'agriculture et l'industrie manufacturière comme le fondement de toute prospérité, contrairement aux activités mercantiles, pour lesquelles il a peu de considération. Il dédaigne aussi les activités minières, bien que la révolution industrielle soit en marche en Europe. Depuis le XVIII^e siècle, philosophes et théoriciens physiocrates ont paré l'agriculture de toutes les vertus, et ces idées ont largement imprégné les esprits.

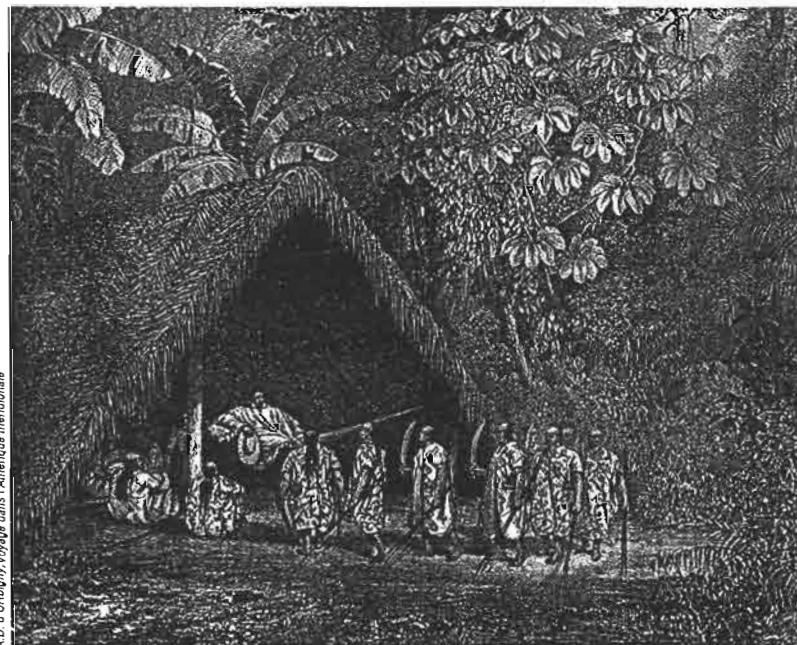
D'Orbigny est aussi empreint des thèses positivistes d'Auguste Comte (1798-1857), pour qui les activités philosophiques et scientifiques doivent s'effectuer dans le cadre de l'analyse des faits vérifiés par l'expérience, l'esprit humain devant se contenter de formuler les lois et les rapports entre les phénomènes. Pour Comte, le progrès passe d'abord par une description ordonnée des faits. C'est aussi le credo de d'Orbigny et c'est sans doute pourquoi il ne cesse, dans ses écrits, d'opposer la paix sociale et le «bon gouvernement» de la Bolivie au chaos et à l'anarchie régnant en Argentine. Ironie de l'histoire, alors que l'écho de cette philosophie positiviste n'est qu'éphémère en Europe, le Brésil adopte officiellement, en 1891, la devise du père du positivisme *Ordre et Progrès*, parce qu'elle symbolise la modernité à laquelle aspirent les élites de ce pays neuf. Néanmoins, d'Orbigny constate la diversité des mœurs et des coutumes dans les pays qu'il visite, et évite les partis pris péremptaires que Comte adopte parfois.

La fin du mythe européen

D'Orbigny est l'un des premiers scientifiques à réfuter la théorie de la prééminence culturelle et technique de l'Europe, et ce alors même que le colonialisme est en plein essor. Selon lui, lorsque la «civilisation» aura pénétré et conquis les campagnes encore vierges du Nord de l'Argentine, l'égoïsme et la fausseté risqueront de s'étendre jusqu'au sein de ces forêts.



3. CES TROIS PALMIERS (*Martinezia truncata*, *Eutrepe audicola*, *Eutrepe haenkeana*) ont servi de prétexte à D'Orbigny pour peindre un tableau paradisiaque, où les sociétés humaines vivent en harmonie avec la nature.



4. VISITE DES INDIENS YURACARÉS (dessin de d'Orbigny). Au début du XIX^e siècle, ces Indiens ont été évangélisés par les franciscains. Ils étaient perçus comme réfractaires au progrès. En 1950, ils n'étaient plus qu'un millier. La zone d'habitat des Yuracarés est en voie de déforestation et menacée par les conflits armés de la coca et de la cocaïne.

Il porte un réel intérêt aux sociétés indiennes : «Je sentis en moi un certain regret de perdre la liberté de la vie demi-sauvage que j'avais menée depuis deux ans, pour m'astreindre aux exigences souvent bizarres de la société [civilisée].» À Paris, certains de ses contemporains le qualifient d'inquiétant libertaire. En outre, d'Orbigny est convaincu de la relativité de certains principes éthiques. Il note qu'en Amérique du Sud, certaines fautes sont moins punies qu'en Europe, ce qui transforme sa conception de l'honneur, cause de tant de duels sur le vieux continent.

Héritier de Rousseau, il prône la nécessité de célébrer et de respecter l'harmonie intrinsèque de la nature, et, par conséquent, de prévoir sa protection. Il remarque que les rivières américaines sont plus propres que celles d'Europe, qui récoltent toutes les immondices des villes, dont les rejets chimiques des usines.

Humaniste sensible aux témoignages laissés par les grandes civilisations du passé, il accorde beaucoup d'importance à la préservation des vestiges précolombiens. En visitant le site archéologique de Tiahuanaco (dont la civilisation prospère du III^e siècle avant notre ère au XIII^e siècle), près du lac Titicaca, il est scandalisé de la cupidité et du vandalisme dont les Européens ont fait preuve, en s'adonnant au pillage, en jetant les monuments à terre et en déchaussant les portiques à la barre à mine. Il s'indigne que l'on qualifie les Américains de sauvages, qu'on nie leur passé, alors qu'ils ont construit des monuments que les Européens trouveraient admirables s'ils avaient été bâtis par les

Égyptiens (Champollion les avaient alors mis très à la mode). Lorsque d'Orbigny écrit : «En Amérique, tout est grandiose!», il réfute l'une des sentences caricaturales de Hegel, pour qui l'Amérique est physiquement et spirituellement impuissante. Pour Hegel, ses lions (ou, plus exactement, ses pumas), ses tigres (ses jaguars) et ses crocodiles (ses caïmans), bien que ressemblant à leurs homonymes du Vieux Monde sont plus petits, plus faibles et moins puissants. Face à cette provocation, d'Orbigny rétorque que si l'on ne se souvenait plus du lieu du Paradis, le voyageur parcourant la Bolivie pourrait dire qu'il a atteint l'Éden perdu. D'Orbigny est sans cesse partagé entre les rêves de progrès de l'Occident et ceux de la restauration d'une société rurale, voire précolombienne, dans les nouveaux pays d'Amérique du Sud.

Indiens, métis et créoles

Parmi toutes les régions qu'il visite, c'est l'Orient bolivien qui marque le plus d'Orbigny, d'autant que ses amours le retiennent un temps à Santa Cruz de la Sierra. Les llanos, de vastes plaines, s'étendent entre le Sud du bassin amazonien et le Nord du bassin du Rio de La Plata. Elles sont enserrées, à l'Ouest, par les piémonts des Andes et, à l'Est, par les cours d'eau de Madeira, de l'Itenez et du Paraguay. D'Orbigny y séjourne de 1830 à 1832, peut-être parce qu'il y rencontre une nature presque vierge d'occupation humaine, dont les paysages grandioses le séduisent. Il navigue sur les fleuves qui la traversent et prévoit le rôle clé qu'ils joueront lors de

La première classification des foraminifères

Juste avant d'embarquer pour les Amériques, Alcide d'Orbigny crée en 1826 l'ordre des foraminifères pour un groupe de coquilles microscopiques, appelées tests. Plus tard, il sut que ces micro-organismes marins étaient des animaux unicellulaires (aujourd'hui classés dans le règne des protistes) et il en découvrit plus d'un millier d'espèces. Il pressentit l'importance que prendraient un jour les foraminifères en géologie et il posa les fondements d'une nouvelle science, la micropaléontologie.

Les foraminifères sont apparus il y a environ 530 millions d'années et on estime leur registre fossile à plus de 50 000 espèces dont certaines ont eu une brève existence à l'échelle des temps géologiques, devenant ainsi de bons marqueurs stratigraphiques pour dater les terrains sédimentaires. Leur grande sensibilité aux variations de l'environnement est utilisée dans la reconstruction des milieux anciens. Les espèces actuelles, au nombre de 5 000, vivent dans tous les océans, sur les fonds et dans les eaux libres ; on en trouve des pôles à l'équateur, du littoral jusqu'aux abysses. Leur fécondité spectaculaire produit une biomasse très importante qui fournit des quantités considérables de sédiments, lesquels donneront, dans plusieurs millions d'années, des roches dans le passé, c'est ainsi que se sont formés des calcaires à nummulites (la pierre de taille des pyramides égyptiennes), à fusulines, à miolites...

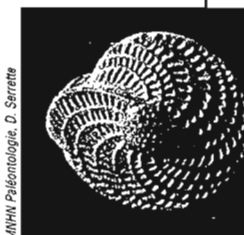
Parce qu'ils sont de bons marqueurs stratigraphiques et environnementaux et en raison de leur abondance, les foraminifères ont intéressé tous ceux qui auscultent la Terre au moyen de sondages. Dès les années 1920, les géologues pétroliers les utilisent pour dater les forages, établir des corrélations, détecter les secteurs intéressants

et guider la prospection. À partir des années 1960, ce fut au tour des paléo-océanographes d'en comprendre l'importance pour l'étude des forages sous-marins. Les recherches pluridisciplinaires sur ces forages contribueront à confirmer la théorie de la tectonique des plaques.

Aujourd'hui, les foraminifères sont au cœur de l'actualité scientifique, car ils sont des indicateurs des changements climatiques. Les archives océaniques, particulièrement riches en foraminifères, sont l'une des clefs de la compréhension des mécanismes qui régissent les changements des climats anciens : en participant aux transferts de chaleur des tropiques vers les pôles, les océans sont des rouages essentiels du moteur thermique de la planète. Les foraminifères nous renseignent sur la composition en isotopes de l'oxygène et du carbone de l'océan, car les concentrations de ces isotopes dans leur coquille reflètent celles de l'eau de mer où elles se sont construites. On utilise ces données pour situer les épisodes glaciaires et interglaciaires dans les séries du Quaternaire (par stratigraphie isotopique). Les concentrations isotopiques des tests, tout comme les associations d'espèces fossiles, témoignent également de l'évolution des principales caractéristiques océaniques, telles la température, la salinité et la fertilité des eaux.

Les travaux d'Alcide d'Orbigny sur les foraminifères et sur la biostratigraphie constituent la partie de son œuvre qui a eu le plus de répercussions sur les sciences du XX^e siècle.

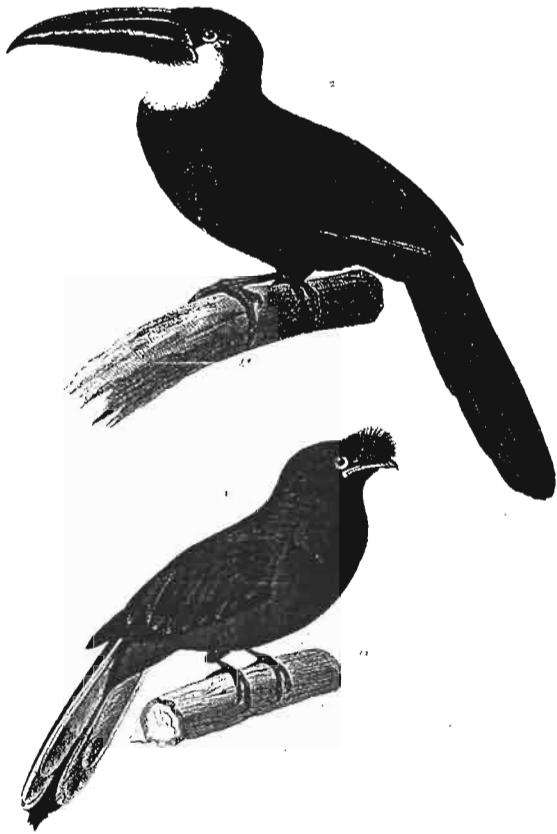
Marie-Thérèse VÉNEC-PEYRÉ
UMR 8569 – Laboratoire de paléontologie
Muséum national d'histoire naturelle



MNHN Paléontologie, D. Serrate



Exemples de sculptures de foraminifères réalisées par d'Orbigny.

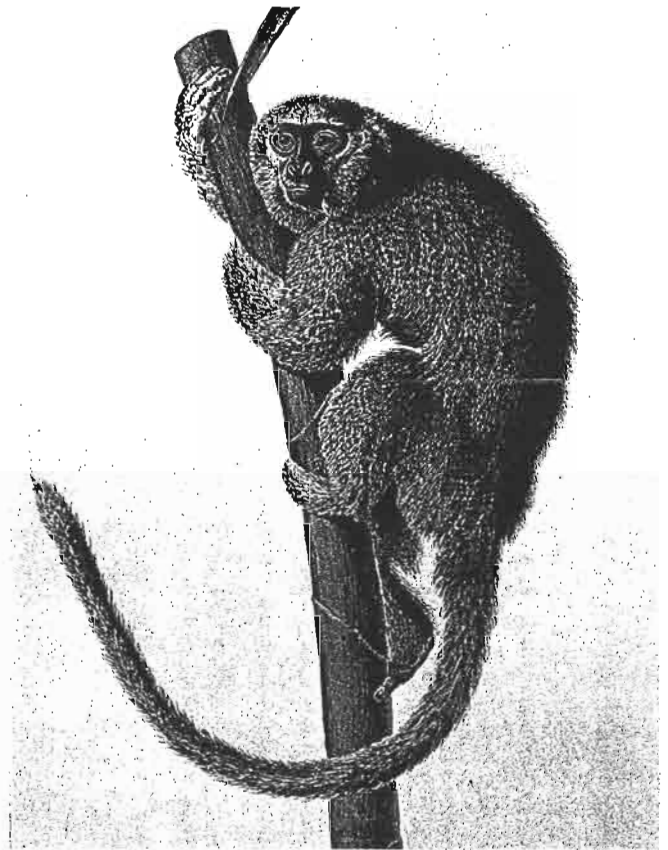


5. CE TOUCANET (en haut à gauche) et ce quetzal (en bas à gauche) font partie des 1 500 spécimens ornithologiques expédiés au Muséum par Alcide d'Orbigny. L'Amérique du Sud est le royaume des oiseaux. À elle seule, la Bolivie en compte 1 356 espèces. Vers 1830, ils étaient

l'essor de l'exploitation du caoutchouc amazonien, à partir de 1860. En outre, d'Orbigny apprécie la population locale, à dominante indienne, dont l'organisation communautaire avait été façonnée par des jésuites expulsés en 1767. Il découvre le kaléidoscope des ethnies peuplant ces contrées, qui témoignent de différentes vagues de migration.

À l'époque de d'Orbigny, les Indiens Sirionos, aux grands arcs et aux haches en pierre se refusent à tout contact durable avec les Blancs (situation qui perdurera jusqu'en 1925). Les immenses pampas du Chaco sont hantées par les Tobas, redoutables pillards, tandis que les piémonts andins du Sud sont occupés par les Chiriguanos, qui bloqueront l'avancée des colons jusqu'à la fin du XIX^e siècle. En ville, les Indiens deviennent des portefaix et des tâcherons, humbles, discrets, mais indispensables à l'économie de l'époque.

Les métis sont en général de petits employés ou des ouvriers agricoles. Les plus entreprenants guident les convois de mules sur les sentes andines escarpées, jusqu'au Brésil et au Paraguay. Les Espagnols, ou plutôt les Créoles, représentent le vieux fond de peuplement blanc, apporté par la conquête et peu métissé. Leurs aïeux se sont enracinés à la suite des multiples expéditions entreprises par les capitaines d'aventures et par leurs soudards, qui ont fini par poser leur ballot, éreintés par la quête du mythique Eldorado. La plupart des descendants des conquistadores sont devenus des fonctionnaires nostalgiques de l'époque coloniale ou des éleveurs de bétail menant une vie isolée dans de vastes haciendas. D'autres encore se sont engagés dans l'armée et sont casernés à Santa Cruz de la Sierra, une cita-



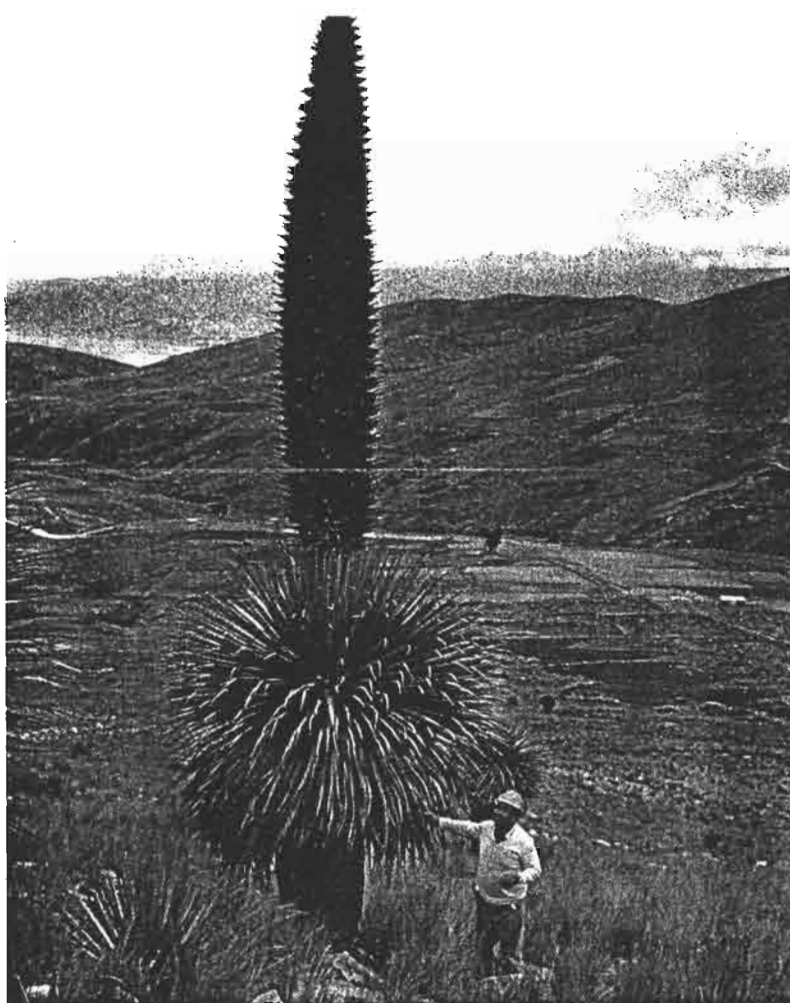
encore très nombreux : d'un seul coup de fusil, d'Orbigny raconte avoir tué 27 canards. Pendant son voyage en Bolivie, il rencontra aussi ce petit singe (*Callicebus donacophilus*, à droite), aujourd'hui en théorie protégé, mais vendu couramment comme animal de compagnie.

delle isolée au cœur de cet autre «désert des Tartares».

Les Créoles prolifiques peuplent également le haut clergé de prélats orgueilleux et de chapelains nantis. À défaut, ils officient dans les anciennes missions jésuites, où ils deviennent des curés de campagne âpres au gain, autoritaires, tatillons envers les «bonnes âmes» et trop sensibles aux séductions des plaisirs terrestres. Néanmoins, le clergé compte quelques saints hommes, tel le moine franciscain Lacueva qui évangélisera avec bonté et discernement pendant plus de 20 ans les Indiens Yuracaré et Guarayos.

Certains Créoles revendiquent la pureté de leur race et prétendent descendre de quelques obscurs grands personnages d'Espagne, par la lignée mâle, et de magnifiques filles de prestigieux chefs indiens... Souvent nu-pieds dans des champs que la brousse dispute aux maigres cultures, les Créoles n'en sont pas moins imprégnés de leurs privilèges coloniaux d'antan. Prisonniers de leurs querelles de clan et en quête des passe-droits consentis par la nouvelle république, ils accueillent chaleureusement tout voyageur de passage, heureux d'entendre parler de l'Europe et du monde. Les Créoles facilitent les déplacements de d'Orbigny et nourrissent, par leurs propos et par leurs expériences, les réflexions de l'explorateur.

Toute cette population bigarrée végète, faute d'activité économique notable, car l'Orient bolivien est enclavé ; seuls de rares sentiers muletiers permettent d'accéder, pendant la saison sèche, aux mines et aux quelques grandes villes des Andes. D'Orbigny se propose de guider sur la voie du progrès ces groupes humains hétérogènes qui s'ignorent, voire se méprisent.



A. Giorda

6. CETTE PLANTE, apparentée à celle qui donne l'ananas, nommée *Puya raimondii*, a été photographiée sur le lieu où d'Orbigny l'avait décrite en 1830, au-dessus du village de Vacas, dans le département bolivien de Cochabamba, à 4 000 mètres d'altitude.

D'Orbigny, le réformateur

Les constats de d'Orbigny appartiennent à deux registres. Dans le premier, novateur pour l'époque, il décrit les blocages socioculturels qui empêchent toute politique de progrès. Dans le second, il énonce une série de propositions, un «programme de développement».

Parmi les blocages, d'Orbigny mentionne le mépris dont sont victimes les Indiens et qui justifie aux yeux de l'administration et du clergé les mesures vexatoires : ségrégation, traitements injustes, coercition administrative et emprise étouffante des autorités sur les quelques activités lucratives indigènes. Néanmoins, pour d'Orbigny, les Indiens ne sont pas non plus exempts de défauts : ils cultivent l'oisiveté, gaspillent leur énergie en vaines fêtes, où se mêlent alcoolisme et lubricité, laissant en friche des terres fertiles. Pourtant, encouragés, les Indiens seraient, selon d'Orbigny, capables d'efforts et pourraient réaliser leurs ambitions.

Aussi d'Orbigny propose-t-il une profonde révision des mœurs et du système de gouvernement du pays. Sur la question fondamentale de la place des Indiens dans la société, d'Orbigny est catégorique : ce sont des citoyens de plein droit et, à ce titre, ils doivent être respectés. Toutefois, ce discours a ses limites, celles de la raison et de l'efficacité qui seules permettent d'atteindre le progrès. Il s'oppose à la conservation des langues indiennes et soutient, au contraire, la diffusion de l'espagnol. Il souhaite que le legs culturel du passé, notamment les vestiges des civilisations précolombiennes, soient protégés.

D'Orbigny veut placer le nouvel État au centre de la vie sociale, État auquel incombe la responsabilité du service public. L'État doit aussi entreprendre des réformes radicales pour mettre fin aux abus : corvées, prélèvements arbitraires sur les biens, travaux forcés des femmes, rafles des conscrits, régime foncier féodal sur les meilleures terres... Il fonde ses propositions sur une expérience de terrain et sur une étude ethnographique des populations qui ont duré huit ans. Ses observations l'ont conduit à traverser des zones insoumises, à subir les assauts de bandes de pillards, à accepter des conditions d'hébergement rudimentaires. Avec quelques guides, il se taille une piste à la machette dans la jungle de Cochabamba, en Bolivie, jusqu'aux contrées inconnues du Mamoré, prouvant que de nouvelles voies de communication peuvent être tracées. Il sillonne des cours d'eau dans des conditions précaires, et ce en dépit de fréquentes crises de paludisme. Il atteint à travers la brousse Santo Corazon, le dernier village bolivien, aux confins du Brésil.

Retour en France

D'Orbigny survit à ces épreuves et revient en France. Il débarque à Bordeaux, le 2 février 1834, ayant réussi à éviter les incidents diplomatiques, et ayant su se faire apprécier des gouvernants et du clergé, mais aussi des humbles et des Indiens, préparant le terrain au premier diplomate français, qui sera envoyé en Bolivie à la suite de son voyage. De cette mission, il rapporte une moisson scientifique impressionnante qu'il publie progressivement pendant les dix ans qui suivent son retour. Poursuivant sa carrière au Muséum, il oriente ses recherches vers la paléontologie et vers la stratigraphie. Nous lui devons la première échelle des temps géologiques. En 1853, il devient professeur de la chaire de paléontologie, que le Muséum a créée pour lui. Il meurt à 55 ans, à Pierrefitte le 30 juin 1857, en laissant à la postérité une œuvre scientifique immense. Il aura été le premier – et le meilleur – ambassadeur français des sciences en Amérique du Sud depuis l'indépendance de ce continent.

Alain GIODA, historien du climat, et Jean-Claude ROUX, spécialiste en géographie historique, travaillent à l'IRD, à Montpellier, après avoir passé de nombreuses années en Amérique du Sud.

A. D. (d')ORBIGNY, *Voyage dans l'Amérique méridionale*, Éditions Pitois-Levrault et P. Bertrand et Levrault, Paris et Strasbourg, 1835-1844.

A. D. (d')ORBIGNY, *L'Homme américain*, Éditions Pitois-Levrault, Paris, 1839.

F. LEGRET-ZAIDLIN, *Voyage en Alcidie. À la découverte d'Alcide d'Orbigny*, Éditions Boubée, Paris, 1977.

Ph. LABORDE PEDELAHORE, *Alcide d'Orbigny. À la découverte des nouvelles républiques Sud-américaines*, Éditions Atlantica : Transhumances, Paris, 2000.

Jean-Claude ROUX, *La modernité de l'œuvre d'Alcide d'Orbigny*, in *Bulletin de l'Institut français d'Amérique andine*, à paraître.

À l'occasion du bicentenaire de la naissance de d'Orbigny, l'exposition *Du nouveau monde au passé du monde sera présentée au Muséum national d'histoire naturelle à Paris, du 5 juin au 13 octobre*

25. Luigi Balzan, les rivières et le climat de l'orient bolivien dans la presse de son temps (1890-1894) -2003 (avec Ana Forenza)

Archivo y Biblioteca Nacionales
de Bolivia

ANUARIO
2003



Sucre - Bolivia
2003

LUIGI BALZAN, LES RIVIERES ET LE CLIMAT DE L'ORIENT BOLIVIEN DANS LA PRESSE DE SON TEMPS (1890-1894)

Alain **GIODA**
(U.R. 32 Greatice, IRD, Montpellier)

Ana **FORENZA**
Gioda_ird@yahoo.com; ana_foar@cotes.net.bo

Les recherches pour retrouver les traces écrites du passage du scientifique et voyageur Luigi Balzan dans l'Orient bolivien ont été faites dans la presse du Beni mais celle-ci n'était guère développée à la fin du XIX^e s. Trinidad, sa capitale administrative, ne comptait alors que 3 000 âmes environ et elle était alors le lieu d'exil traditionnel pour les opposants politiques de tout le pays. Dans la Bibliothèque Nationale de Bolivie à Sucre, la presse du Beni ne compte que 12 périodiques dans l'hémérothèque, pour tout le XIX^e s. Les journaux de Santa Cruz et en particulier l'« Estrella del Oriente » ont réservé, par contre, de bonnes surprises.

1. LES TRACES DES SCIENTIFIQUES ET MISSIONNAIRES

L'indication du passage de Balzan à Santa Cruz a été trouvée :

Il y a quelques jours, est arrivé dans notre ville le Prof. Luigi Balzan... venu en Bolivie pour récolter des données sur notre pays pour le compte de la Société Géographique Italienne (La Estrella del Oriente, 17 novembre 1892).

Ainsi, la presse de Santa Cruz a bien fait son travail en signalant l'arrivée de Luigi Balzan dans la plus grande ville de l'Orient, mais en fait une cité qui ne comptait alors même pas 20 000 habitants.

Il est à noter que Balzan séjourna à Santa Cruz, seulement quelques mois après un autre scientifique, le botaniste Otto Kuntze (*La Estrella del Oriente*, 16 juin 1892). Le Frère Pablo Fernández, un Franciscain, effectua, quasiment à la même époque que Balzan, un périple similaire. Toutefois, il termina son voyage en rentrant à La Paz et non pas comme Balzan en se dirigeant vers Santa Cruz puis Puerto Suarez. A partir du 1^{er} juin 1892, Frère Pablo avait visité les missions de Covendo, San Ana, Tumupara, San José, Tuamas et Reyes (où il confirma plus de 1 000 personnes) avant de rentrer à La Paz autour du 15 novembre. Plusieurs de ces missions furent aussi visitées par Balzan mais celui-ci ne rechercha pas spécialement la compagnie des religieux, étant lui-même un athée. On peut, en conclure, que les voyageurs dans ces régions orientales, pour des raisons scientifiques ou religieuses, étaient suffisamment rares et considérés comme suffisamment importants pour que leur passage soit évoqué dans la presse qui ne touchait qu'une élite économique en Bolivie à la fin du XIX^e s.

Ensuite dans ce travail, une grande partie du texte de Pedro Suarez¹, député national du département du Beni, a été utilisée au sujet de l'hydrographie du Beni et des régions proches du Brésil (*La Estrella del Oriente*, 30 novembre, 7 et 10 décembre 1892). Ce texte présente le grand avantage d'être contemporain du voyage de Luigi Balzan, d'être écrit par un Bolivien et un fin connaisseur de la zone, et il se rapporte exactement aux mêmes régions que celles explorées par le scientifique italien.

¹ Il s'agit d'un des membres de la galaxie des Suarez Calláu qui dominèrent avec Nicolas Suarez (1851-1940) le marché bolivien de la gomme de 1897 à 1940 sans partage. La famille fut prolifique ainsi Nicolas avait-il 8 frères (dont Francisco et Pedro) et sœurs. Depuis 1860, la famille s'était établie dans le Beni à Trinidad où elle ouvrit une grande maison commerciale qui émettait sa propre monnaie, des fiches, dans le Beni et l'Acre. Elle se tourna rapidement vers l'exploitation du caoutchouc. Il y eut deux Pedro Suarez, le père Suarez Calláu et le fils Suarez Savaria (circa 1860-1917), ingénieur des mines de Cornouailles (le boom de l'étain en Bolivie de la fin du XIX^e s. est notamment dû au transfert de technologie entre l'Angleterre et la Bolivie et les mines d'étain de Cornouailles étaient exploitées depuis les Phéniciens) et qui fut député du Beni, en sus de son travail d'industriel de la gomme. Je pense qu'il s'agit ici de Pedro Suarez Savaria, neveu du grand Nicolas Suarez.

2. LES RIVIERES DE L'ORIENT BOLIVIEN

En préambule, Suarez place cette phrase qui exprime son credo : «*Cherche les rivières qui sont les chemins que Dieu ouvrit afin que l'Homme connaisse le Monde*», emprunté au Français Louis Blanc².

Puis Suarez enchaîne :

L'exploration et la navigation sur les principales rivières de Bolivie sont appelées à produire une grande transformation sociale et économique de la République, en ouvrant de nouvelles perspectives de transformation économique et sociale. (La Estrella del Oriente, 30 novembre 1892).

Pedro Suarez présente ensuite le plan de son long article qui comprend trois parties : la première sur l'hydrographie ; la seconde, sur les peuples des « Indiens sauvages » ; et la troisième qui correspond à un plaidoyer *pro domo* de son travail de député. Un résumé de la première partie complété par des extraits du texte original seront présentés dans ce travail.

2.1. LE PURUS³

Je m'occuperai, en premier lieu, de cette rivière car elle est le débouché principal des produits de notre pays vers les marchés étrangers. Cette grande activité économique est due à la facilité de la navigation à vapeur dans ses eaux. En 1865, son bassin et ses rives n'étaient pas encore peuplés [pour Suarez, les Indiens de la forêt amazonienne sont quantité négligeable] jusqu'à ce que William Chandless, envoyé par la Société Géographique de Londres, explore son cours en levant une carte topographique. Au début de 1872, une population de 2 000 personnes colonisait déjà ses rives. La première

² Révolutionnaire et journaliste français (1811-1882), membre du Gouvernement Français sous la Révolution de 1848 car depuis toujours grand défenseur des idées socialistes. Il passa près de 20 ans de sa vie en exil sous le règne de Napoléon III (1852-1870). Ensuite, tout en ayant désapprouvé la Commune, il fut député d'extrême-gauche au Parlement National (1871-1876). En cette fin du XIX^e siècle, la France était le modèle du développement pour les élites du jeune Etat bolivien, l'emprunt d'une phrase assez vague de Louis Blanc par Suarez en est un témoignage.

³ La conséquence du traité entre la Bolivie et le Brésil du 27 mars 1867 fut la modification de la frontière commune. Cette dernière, au nord de la Bolivie, devint une ligne oblique, allant du Madera (10° 20' S - 68° 19' 30'' O) jusqu'aux sources du Yavary (7° 1' 17'' S - 76° 28' 41'' O). Ainsi, la Bolivie perdit plus de 200 000 km² dont l'ensemble du bassin inférieur du Purus riche en forêts d'hévéas. Pour en savoir plus à ce sujet, lire Muñoz (1911). Après le voyage de Balzan, à la suite de la Guerre de l'Acre, un autre traité avec le Brésil fut signé le 17 novembre 1903 qui officialisa la perte de 191 000 km² supplémentaires dans le Nord-Ouest bolivien. Ce furent alors toutes les forêts d'hévéas des bassins du Purus, Aquiri (ou Acre), Abona et d'une moitié de l'Orton qui furent cédées (Crespo, 1909).

compagnie fluviale fut la Compañia Fluvial del Alto Amazonas qui effectua son premier voyage en décembre 1869 mais alors le fret transporté gênera seulement 200 000 reis brésiliens correspondant à 100 pesos ou bolivianos. De 1870 à 1890, la population riveraine augmenta beaucoup à cause de l'exploitation des hévéas et du commerce du caoutchouc favorisés par la facilité de la navigation. Tout cela pour le plus grand profit du Brésil Aujourd'hui [en 1892], le bassin du Purus a plus de 67 000 habitants, sans compter les Indiens (environ 100 000), disséminés sur ses 6 000 km de berges. Le Purus ne possède pas de véritable agglomération structurée, hors des exploitations d'hévéas et de sa transformation locale en caoutchouc Ces dernières rapportent en moyenne 500 000-600 000 pesos lourds par an. Le Purus est desservi par trois grandes compagnies fluviales toutes brésiliennes (en dehors des nombreux vapeurs armés par des entreprises artisanales) : Amazonas Limitada, Pará y Amazonas et Manaos. Chacune des trois grandes compagnies arme un vapeur par mois mais, dans de nombreux cas, c'est insuffisant du fait du grand tonnage à transporter et des petits armateurs sont alors contractés. Le Purus génère un commerce extérieur de plus de 5 millions de pesos lourds et importe 4 millions de denrées. Le volume de caoutchouc raffiné qui est exporté dépasse 2 000 tonnes par an Ce caoutchouc passe par le Para sans compter celui qui s'expédie de Manaus vers les marchés des Etats-Unis et d'Europe. Selon la douane brésilienne de Manaus, on a exporté les tonnages suivants : en 1883-84, 1 952 ; en 1884-85, 1 648 ; en 1885-86, 1 967 ; [...] 2 143 ; en 1889-90, 2 175. Depuis 1890, la dernière fois que je me suis rendu au Brésil, l'exportation de caoutchouc a dû augmenter fortement du fait de l'afflux de la main d'œuvre de l'Etat [brésilien] du Ceará sur les berges du Purus.

Pedro Suarez ajoute dans sa conclusion sur le Purus :

...En tant que représentant élu du département du Bêni, en 1890, j'ai sollicité, à la Chambre des Députés, l'implantation d'un bureau de douane bolivien sur le Purus puisque actuellement le seul à percevoir les droits à l'exportation et à l'importation des produits est le gouvernement brésilien. (Estrella del Oriente, 10 décembre 1892).

2.2. L'AQUIRI OU L'ACRE

C'est l'Acre de nos jours, un grand cours d'eau qui donne son nom à un Etat du Brésil depuis la perte de ce territoire par la Bolivie qui est datée de 1903.

Cette rivière, durant la saison des pluies et spécialement de décembre à mai, est navigable par de bateaux de fort tonnage qui la remonte, jusqu'à la confluence avec le Yari, sur une longueur de 360 km En amont de cette confluence, des bateaux plus petits peuvent encore la remonter sur 200 km. L'Aquiri naît dans la cordillère orientale des Andes et c'est un affluent, de plus de 800 km de long, du Purus. De son bassin, sont exportées plus de 700 tonnes annuelles de caoutchouc et cette quantité augmente chaque jour. Son commerce s'appuie sur plus de 15 grands bateaux à vapeur et de nombreuses embarcations plus petites L'Aquiri a 12 000 habitants sur ses berges, hors ceux de la race indigène. Cette rivière fait partie intégrante du territoire

bolivien pour la plus grande partie de son cours et il est nécessaire donc qu'une petite douane y soit installée pour la perception des taxes de l'Etat.

Pedro Suarez renchérit dans sa conclusion :

... D'après les données que j'ai recueillies à la douane de Manaus et chez des industriels du Purus et de l'Aquiri, l'exportation du caoutchouc par ces deux rivières génère plus de 1 million de pesos lourds (en italique dans le texte original pour montrer l'importance de la somme) et, à la Bolivie, il reviendrait, de plein droit, un tiers (voire plus) de cette somme. Il n'est pas possible que le gouvernement du pays néglige cet aspect financier d'une importance considérable pour le futur de la Nation. (Estrella del Oriente, 10 décembre 1892).

2.3. LE BENI (ou le *Manubeni*, la Rivière du Vent, son nom indien selon Crespo, 1909)

Cette rivière est l'une des plus connues du pays et le département homonyme (dont Suarez est le député) bénéficie largement de ses exportations. Tout son cours qui se développe sur 1 600 km est connu depuis les années 1879-1880 quand l'explorateur Nord-américain Edward Heath. Son lit atteint 550 m de large. Il est navigable par les bateaux à vapeur en amont des rapides de Cachuela Esperanza (dont la chute est de 10 m et qui sont à 18 km avant sa confluence avec le Mamoré) jusqu'au port de Salinas dans le canton de Reyes. Une petite barge de la société Braillard & C^o (fondée par un Français) y navigue de façon permanente. Les principaux établissements commerciaux et de transformation du caoutchouc sont les suivants : à Cachuela Esperanza, Suarez & Frères ; sur l'Orton, Antonio Vaca Diez ; à Riberalta, Braillard & C^o, Suarez & Mancilla, Velasco & C^o et deux autres entreprises ; et, en remontant le Beni, Augusto Roca & Frères, Fabián Roca, Antonio Roca, etc.

Riberalta sera choisie en 1893 comme siège de la petite capitale régionale des délégations du Territoire des Colonies. L'agglomération était née spontanément en 1882 (Crespo, 1909). Sa croissance fut favorisée par son site qui est abrité des crues, une caractéristique rare dans toute la région. Son nom, d'ailleurs de Rive Haute, souligne le fait que la terrasse soit 20-25 mètres au-dessus des basses eaux du Beni (La Revista Colonial, 20 septembre 1894). La population totale riveraine du Beni est de 2 000 habitants et Suarez ne donne aucune estimation du nombre des Indiens de la forêt.

En 1890, le nom des exploitations, celui de leur(s) propriétaire(s) et le nombre de leurs travailleurs étaient les suivants, d'après Felipe Valdivieso (« El 15 de Abril », 9 novembre 1890) :

BENI (entre el Madre de Dios y el Mamoré)		
Esperanza	Suárez & Hermanos	50
Recreo	Isaac Oliva	20
Progreso	Luis Lénz	50

Orton (confluencia Orton y Beni)	Antonio Vaca Díez	450
Riberalta	Clausen, Suárez, Henicke & Velasco	150
RIO BENI (en amont du Madre de Dios)		
Bella Brisa	Telésforo Salvatierra	15
Gene-Guaya	Alvares y Roca	35
Concepción	Salustio Justiniano	113
Exaltación	Angel Vasques	30
Copa-Cabaña	Méndez & C ^o	60
San Manuel	Pastor Guardia	15
Mamoré-Rei	Roca & C ^o	30
Blanca-Flor	Angel Ramallo	25
San Lorenzo	Miguel Roca	40
Etéa	N. Limpías	50
California	Escudero Martines	40
Santo Domingo	Medina & Caso	60
Carnavales	Ruperto Medina	20
Santa Ana	José Rivera	15
San Antonio	Roca & Roca	60
Todos Santos	Santos Fariña	40
Guarayos	Daniel Alcázar	30
	Total	1398

N.d.A. : La population, entre 1890 et 1892, avait certainement augmenté à cause du boum du caoutchouc mais on peut aussi supposer que le député Pedro Suarez ait pu gonfler les chiffres (1 400 contre 2 000) pour montrer la grande importance de son département du Beni et des deux délégations du Purus et du Madre de Dios.

2.4. LE MADRE DE DIOS (ou le *Manutata*, la Grande Rivière ou la Rivière Père, son nom indien selon Crespo, 1909)

Cette rivière est le plus grand affluent du Beni et sa largeur est même supérieure à ce dernier. Elle naît au Pérou dans le département de Cuzco, au sein de la cordillère andine de Carabaya, et son cours est de 1 500 km. Son lit comporte quelques îles mais ces dernières n'empêchent pas la navigation et les bateaux à vapeur le remontent sur 500 km pour le plus grand profit de la Bolivie et du Pérou car, en plus du caoutchouc, son bassin est riche en noix du Brésil, sarza (salsepareille), copaibo (ivoire végétal), fèves de cacao, etc. Les berges de cette rivière sont d'accès difficile car elles sont inondées généralement en période de hautes eaux. Les principales exploitations industrielles sont celles d'Augusto Roca & Frères, Nicanor Salvatierra, Cárdenas, Mariaca et de Farfán. La population du Madre de Dios dépasse 2 500 personnes.

En 1890 et en descendant la rivière, le nom des exploitations du caoutchouc sur le Madre de Dios, de leur(s) propriétaires(s) et le nombre de leurs habitants étaient les suivants :

Valparaiso	Roca & Frères	400
San Pablo	Nicanor Salvatierra	120
San Miguel	Claudio Terrazas	70
Maravillas	Timoteo Mariaca	60
Canadá	Angel Farfan	35
Conquista	Faustino Belmonte	35
Nuevo Sena	Joaquin Farfan	80
El Porvenir	Endara & Antezana	40
	Total	830

En plus,

Douane de Villa-Bella (Mamoré-Beni)	60
Yata (Mamoré)	80

Selon le recensement des propriétaires des exploitations du caoutchouc, le nombre total des habitants du Beni et du Madre de Dios était, en 1890, d'environ 2 500 (Periodico « El 15 de Abril », 1890) et donc inférieur de presque 50 % à l'estimation de Pedro Suarez (4 500). Sur le seul Madre de Dios, la population présente dans les exploitations industrielles aurait été de 870 habitants en 1890 contre 2 500 en 1892.

2.5. L'ORTON (ou le *Datimanu*, la Rivière des Tortues, son nom indien selon Crespo, 1909)

Cette rivière coule parallèlement au nord du Madre de Dios, à une distance variant entre 25 et 40 km de ce dernier. Il semble qu'elle naisse près de Carayaya et que son cours mesure 800 km de long. Elle est navigable sur 500 km et son bassin est riche en hévéas et le dernier établissement industriel se trouve à 200 km en amont de sa confluence avec le Beni ». Antonio Vaca Diez y contrôlait tout le commerce (Lijerón Casanovas, 1997). La Barraca Orton, la plus prospère et installée en rive gauche à la confluence Orton-Beni, comptait 450 habitants en 1890 ce qui en faisait aussi la plus peuplée de toutes les exploitations du caoutchouc⁴.

Les autres affluents du Beni dont les bassins produisent du caoutchouc sont l'Ivon, le Genejuaya ou Gene-Guaya et le Madidi (où existe une mission).

⁴ Le décès accidentel de Vaca Diez en 1897, avec son ami et associé péruvien Feiscarrald ou Fitzcarrald ou Fitzcarraldo, entraîna la chute de son entreprise qui fut absorbée par la famille Suarez qui dominera sans partage dès lors l'industrie du caoutchouc en Bolivie.

2.6. L'ABONA (ou l'Abuna, son nom actuel)

Les sources de cette rivière sont inconnues et l'Abuna se jète, après plus de 900 km de cours, dans le Madera qui correspond lui-même à la Haute-Amazone. Ce sont ses derniers 500 km qui sont intéressants car alors il est assez large pour la navigation quand son lit atteint 70 m de large au minimum. L'Abuna est navigable mais il comporte aussi des rapides, selon les tribus sauvages. Son potentiel économique est important du fait de la richesse de ses ressources naturelles.

3. LE MYTHE DE LA FACILE NAVIGABILITE DES RIVIERES DE L'AMAZONIE BOLIVIENNE

Peut-être, le fondateur involontaire de ce mythe est-il le scientifique français Alcide d'Orbigny qui parcourut une grande partie de la Bolivie entre 1830 et 1833 mais qui ne se rendit pas dans la province de Caupolicán ou d'Apolobamba. Néanmoins, d'Orbigny écrivit et publia, avec toute son autorité de fils spirituel de Humboldt, des conclusions de ce genre :

Caupolicán est peut-être, sous le rapport des voies de communications, la plus favorisée de toutes les provinces [de Bolivie], étant arrosée par des rivières navigables, auxquelles on ne paraît pas avoir songé... Conçoit-on..., qu'ayant à sa disposition une magnifique rivière comme le Beni, on ne se soit servi jusqu'à présent, d'Isiamas à Cavinás, que de simples radeaux, tandis qu'à Mojos on naviguait, depuis un siècle et demi, avec des pirogues ? Il n'est pas douteux que cet état arriéré de Caupolicán, même relativement aux provinces voisines, ne provienne du manque de communications... Avec des moyens, aussi faciles que la navigation, on peut juger ce que deviendront Cavinás, Isiamas et Tumupaza, quand des bateaux à voile ou à vapeur pourront transporter leurs produits, quelque soit le poids, d'un côté jusqu'àuprès d'Apolo, par le Tuyché, de l'autre, jusqu'à peu de distance de La Paz, par les rios Mocéténès et Bogpi. (1844, t. 3 : 395).

D'Orbigny avait certes raison pour la remontée par les bateaux à vapeur du cours des rivières de Caupolicán et de l'Itenes, en venant de l'Amazone et du Madera. C'est ce que firent les Brésiliens dès les années 1860, jusqu'aux rapides les plus à l'aval comme Cachuela Esperanza sur le Beni. Toutefois, en descendant le courant des rivières soit des hautes montagnes de la cordillère orientale des Andes soit simplement des villes de la plaine comme Santa Cruz de la Sierra et Trinidad, c'était bien moins vrai. La situation était identique c'est-à-dire une navigation très difficile sur les voies fluviales entre le Pérou et la Bolivie.

Les voyages sur le Béni et le Mamoré étaient très lents en 1832, lors du dernier passage de d'Orbigny dans la région orientale, et encore

bien problématiques en 1894, du temps du voyage de Balzan : « ... Il est évident que ce voyage en descendant la rivière de Riberalta jusqu'à San Antonio par les rapides Esperanza, Riberon, Girao et Calderon del Infierno qui dure de 12 à 15 jours pourrait se faire en 3 ou 4 jours sans ces obstacles naturels » (La Revista Colonial, 20 septembre 1894).

Les communications fluviales dans l'ancienne province de Caupolcán étaient tellement difficiles que l'on dut attendre 1894 pour trouver le passage entre le Pérou et la Bolivie. Ce passage était encore donc inconnu du temps de Balzan et ce dernier, certainement plus scientifique qu'explorateur, ne se déplaça pas en direction du Pérou. Voici comment « La Revista Colonial » du 20 septembre 1894 reporta la découverte de cette nouvelle voie de communication.

Le 31 août, les entrepreneurs de l'exploitation El Carmen du Madre de Dios furent surpris par la visite du péruvien Carlos Feiscarrald ou Fitzcarrald ou Fitzcarraldo [un personnage devenu mythique dans le monde des explorateurs pour sa traversée, en bateau démonté, d'un isthme de l'Amazonie] Fiescarrald, après son retour d'Europe, importe des denrées d'outre-mer pour les distribuer dans les différentes exploitations de caoutchouc à la confluence de l'Urubamba et du Tambo et à celle du Cerjali et du Manu [un gros affluent du Madre de Dios]. Le point de départ de Feiscarrald fut un petit affluent de l'Urubamba [le fleuve qui draine la vallée sacrée des Incas au Pérou]... Sa route lui fut enseignée par les Indiens sauvages Piros qui accompagnèrent Feiscarrald jusqu'au Manu. La navigation peut se faire en peu de temps avec des gros bateaux à vapeur jusqu'à la confluence Urubamba-Camisea. En remontant ce dernier, Feiscarrald arriva à un petit isthme de seulement 2 miles environ de large et, là, en 50 minutes il put tirer sur la terre ferme, grâce à ses alliés indiens, ses embarcations et chargements jusqu'aux eaux du Cerjali, un affluent du Manu où se trouvent ses exploitations de caoutchouc.

La conclusion de cet article, par « La Revista Colonial », est clairoissante : « *Le Beni s'ouvre au Monde entier et il attend seulement la nécessaire impulsion des gouvernants* ». Toutefois, aujourd'hui encore, les rapides empêchent le désenclavement fluvial du Beni et l'isthme de Feiscarrald est retourné à la forêt. Rêve et réalité ne concordèrent pas toujours dans l'Histoire de la Bolivie orientale.

4. CLIMAT ET NATURE DU DEPARTEMENT DU BENI ET DE L'ORIENT

On continue de citer presque textuellement une partie de l'article de Pedro Suarez (La Estrella del Oriente, 30 novembre ; 7 et 10 décembre 1892).

Le climat des régions baignées par le Beni, Madre de Dios, Orton, Abona et Aquiri qui sont localisées entre les parallèles 9° et 12° de latitude Sud, est perçu comme humide car les eaux débordent de plusieurs kilomètres de leur lit

lors des crues de saisons des pluies qui sont importantes Il ne se rencontre que très peu de points hauts et l'impression pour le voyageur est celle d'une grande platitude Les rivières et leurs rapides deviennent les principaux accidents topographiques Le sol est en général argileux et de couleur jaune. Les températures diurnes des mois de mai jusqu'en août sont fraîches et agréables allant de 16° à 22° C de 6 à 9 heures et de 26° et 30° C entre 10 et 16 heures. Les nuits sont humides Le climat n'est pas aussi délétaire que l'on veut bien le dire car le paludisme se soigne facilement avec la quinine.

Dans cet extrait, Pedro Suarez dont les intérêts sont intimement liés à ceux de la bourgeoisie du caoutchouc omet d'évoquer la forte mortalité dans les exploitations d'hévéas et de transformation de la gomme.

Ici, s'achève l'étude et l'exposé du long extrait de l'article en trois parties, daté de novembre et décembre 1892, du député Pedro Suarez.

Dans la bouche d'un autre député M. Ballesteros, élu de La Paz, les délégations du Purus et de la Madre de Dios⁵ sont présentées en termes emphatiques lors de la session parlementaire du 2 octobre 1900 :

Bien que toutes les régions de la République soient favorables à la colonisation [des Blancs]... aucune n'est plus favorisée que la grande région du Nord-Ouest par la richesse de ses sols, la facilité de la navigation sur ses rivières qui ont un accès direct à l'Atlantique, la bonté de son climat et la variété immense de ses fruits, sa flore et sa faune d'une diversité exubérante. (Collectif, 1901). Cette déclaration claironnante fut faite après le Décret Suprême du 8 mars 1900 qui créa le Territoire National des Colonies (embryon du département actuel du Pando), en séparant du département de La Paz, la province de Caupolicán ou de Apolobamba. Bref, on voit que le député Ballestros n'a jamais foulé la région et Pedro Suarez était plus près des réalités du terrain, quelques 8 années auparavant, en disant que la Bolivie avait complètement oublié les deux délégations du Purus et de la Madre de Dios. Les premiers administrateurs boliviens Guttierrez et Manuel Ballivián ne seront d'ailleurs envoyés qu'en 1893, soit postérieurement au passage de Balzan (Crespo, 1909).

D'ailleurs, le climat de toute la région - les deux délégations du Purus et du Madre de Dios les deux départements du Beni et de Santa Cruz - était tellement « bon » que d'Orbigny notait à propos de la

⁵ « En 1890, ... des députés dont Pedro Suarez présentèrent le projet de la création de deux délégations dans le Purus et le Madre de Dios. Ce projet fut approuvé par le parlement bolivien en 1890 mais resta lettre morte jusqu'en novembre 1892... » (La Estrella del Oriente, 10 décembre 1892) Le gouvernement bolivien était alors aux mains du Président Arce (1888-1892), un grand mineur plus intéressé par l'industrie de l'argent des Andes que par celle du caoutchouc de l'Amazonie.

petite mission de Santa Cruz de Valle-Ameno ou de Apolobamba [il ne s'agit pas de Santa Cruz de la Sierra] en 1833 : « Les fièvres intermittentes se sont maintenant emparées du bourg » (t. 3 : 375). Ensuite et toujours, le climat de toute cette très vaste région de plus de 1 million de km² était tellement « bon » que Balzan eût à souffrir une grande sécheresse dans l'Orient du pays, celle de 1892. Cette sécheresse avait commencé déjà en 1891 dans la grande province de Cordillera, au sud de Santa Cruz, que l'explorateur italien ne visita pas mais qui fournissait une part non négligeable des Indiens emmenés de force au Béni ou à Apolobamba ou encore mis en esclavage pour dette par les propriétaires des bois producteurs de caoutchouc (voir l'éditorial du 28 décembre 1892 de *La Estrella del Oriente* « Vente d'esclaves! » qui s'élève contre ces pratiques courantes et aussi la revue « *Boletín Beniano* » du 20 août 1893 dans lequel le préfet de Trinidad se défend d'être un commerçant de chair humaine). La sécheresse de 1891-1892 correspond au dernier grand soulèvement des tribus Guaraní-Chiriguano. Sans sombrer dans un déterminisme aveugle, il est possible de mettre en relation cette sécheresse et le dernier grand soulèvement de ces Indiens dans la province Cordillera en janvier de 1892. En effet, la presse de Santa Cruz reporte que l'absence absolue de pluies alarme les propriétaires terriens, les créoles, de la province Cordillera où la sécheresse est telle que des rivières ont tari, chose qui n'était pas arrivée depuis de très longues années. Dans certains cas, de mémoire d'homme, aucune de ces rivières n'avaient tari. Les prévisions agricoles sont très mauvaises (*El Guapay*, 1^{er} novembre 1891). Les Guaraní-Chiriguano de la Cordillera furent définitivement vaincus le 28 janvier 1892 à Kurujuky, près de Monteagudo, où ils laissèrent, sur le camp de bataille, plusieurs centaines de morts. Leurs chefs furent exécutés en février 1892 (Pifarré, 1989). La déroute des Indiens facilita la mise en esclavage (à peine masqué) de nombreux vaincus et leur déportation vers les bois d'hévéas, producteur du caoutchouc, du Beni et du Purus (*La Estrella del Oriente*, 28 décembre 1892). Dans cette province de Cordillera, la sécheresse se poursuivra en 1892, sachant qu'elle se trouve géographiquement entre les villes de Santa Cruz et Tarija et que ces dernières, comme leurs campagnes, en souffrirent beaucoup. Si cet épisode sec n'apparaît pas explicitement dans les informations de la presse de la province Cordillera c'est aussi que, localement, les journalistes (des représentants de la bourgeoisie créole) étaient affolés par les conséquences de la grande rébellion indigène de janvier 1892 et qu'ils redoutaient, malgré son écrasement, un dernier sursaut guerrier

33 ans. D'ailleurs, quelques années après la mort de Balzan en 1894, deux jeunes Boliviens, explorateurs et membres de la Société Géographique de La Paz, décédèrent presque en même temps dans l'enfer vert : Pedro Kramer à Manaus, le 20 décembre 1899 ; et José Zarco à Puerto Acre, le 1^{er} novembre 1900. Leur épitaphe est significative :

La Nature qui les avait réunis au sein d'une même famille, celle de ses amoureux, les a faits aussi frères, ô! ironie du destin, pour couper le fil de leurs vies dans les terres inhospitalières du Nord-Ouest... (Palma y V., 1901).

D'Orbigny, dès qu'il pénètre dans la plaine de Santa Cruz qui est la porte de l'Orient bolivien, note dans son journal de voyage en novembre 1830 :

En y entrant [en venant de la région andine]... mon admiration dura peu, atténuée qu'elle fut par les piqûres de mareaus [simulies ou maringouins, petites mouches] et des myriades de moustiques⁶ qui, toute la soirée, ne me laissèrent pas un instant de repos. (1839-43, t. 2 : 519).

Cet autre passage, extrait du voyage de d'Orbigny, donne une idée des difficultés rencontrées par Balzan :

... Entre Santa Cruz de la Sierra et San Javier, juin 1831 - J'avais éprouvé des difficultés sans nombre à parcourir les montagnes...; mais jamais je n'aurais cru en rencontrer de telles au sein des plaines... A chaque pas, nouvel obstacle ; car il faut se coucher sur son cheval pour passer sous les branches croisées pour sauter par-dessus des troncs d'arbres ; le tout sans compter les fondrières et les marais. Pendant six mois, les communications sont complètement interrompues, par suite de l'inondation, tandis qu'à la saison sèche, il y a trois journées de marche sans herbe pour les montures, et à peu près autant sans eau, pour les voyageurs. (d'Orbigny, 1839-43, t. 2 : 582-83).

Il surenchérit un peu plus tard, toujours dans la plaine de Santa Cruz :

San José de Chiquitos, septembre 1831 - Dans ces régions, les premiers mois de printemps, avant la saison des pluies, sont les plus difficiles à supporter. Une chaleur sèche, sans vent, vous fait respirer sans cesse un air enflammé, que ne tempère même pas la fraîcheur des nuits des autres saisons. (d'Orbigny, 1839-43, t. 2 : 627).

Nous savons que Balzan en 1892 dut affronter une très grande saison sèche, qui perdura jusqu'à fin octobre, alors que celle de 1831, qui correspond à cet extrait de d'Orbigny, fut tout à fait normale dans la région. Le développement de la malaria, en cas de sécheresse et

⁶ Vers 1840 encore, la malaria venait des miasmes de l'air, de la rosée... et non des piqûres de moustiques injectant le parasite.

donc de chaleur excessive, est bien connue maintenant (Epstein, 2000). Les scientifiques s'attendent les prochaines décennies, avec le réchauffement climatique de la planète, à une extension spatiale du paludisme vers des zones tempérées et subtropicales.

REMERCIEMENTS

Cette étude est dédiée à la mémoire du regretté Luis Poggi, Consul Honoraire d'Italie à Sucre, qui encouragea la publication du Journal de Luigi Balzan dans sa version intégrale en espagnol et français.

Le PHI (Programme Hydrologique International) d'Amérique Latine de l'UNESCO, par l'intermédiaire du projet international ARCHISS (*Archival Climate History Survey*), a partiellement parrainé cette étude.

Enfin, le personnel des Archives et la Bibliothèque Nationales de Bolivie m'a toujours beaucoup facilité la tâche à Sucre.

BIBLIOGRAPHIE

- Balzan, L. 1892-94 - Viaje 1890-92 en Bolivia (en italiano). Parte 1: De Asunción a La Paz; Parte 2: De La Paz a Irupina; Parte 3: De Irupina a Covendo; Partes 4 & 5: de Covendo a Reyes; Parte 6: De Reyes a Villa Bella; Parte 7: De Villa Bella a Trinidad; Parte 8: De Trinidad a Santa Cruz de la Sierra y Corumba, y vuelta a Asunción. *Bolletino della Società Geografica Italiana*, 8 parties.
- Boletino Beniano (El) - Colección del año 1893, Trinidad. En: PB 113 Beni, ABNB, Sucre.
- Collectif 1901 - La Provincia de Caupolicán y el Decreto Supremo sobre la creación del Territorio Nacional de Colonias (discursos parlamentarios). *Boletín de la Sociedad Geográfica de La Paz*, año III, t. III, n° 7-8 : 269-338.
- Crespo, L. S. 1909 - El Territorio Nacional de Colonias. *Boletín de la Sociedad Geográfica de La Paz*, año VII, n° 27-28-29 : 25-60.
- Epstein, P. R. 2000 - Salud y calentamiento global de atmósfera y oceanos. *Investigación y Ciencia (edición española de Scientific American)*, n° 289 : 16-24.
- Guapay (El) - 1° de noviembre de 1891. En: PB 36 Santa Cruz, ABNB, Sucre.

- Estrella del Oriente (La) - Colección del año 1892, Santa Cruz. En: PB 19ª Santa Cruz, ABNB, Sucre.
- Lijerón Casanovas, A. 1997 - Antonio Vaca Díez; genio empresario y geopolítico boliviano. En: *Anuario 1997 del Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia*, ABNB, Sucre : 301-323.
- Muñoz, J. L. 1901 - La cuestión de límites con el Brasil. *Boletín de la Sociedad Geográfica de La Paz*, año III, t. III, nº 9-10-11 : 442-446 (con un plano).
- Orbigny (d'), A. D. 1839-43 - *Voyage dans l'Amérique Méridionale*. Tome 2, P. Bertrand, Paris et Vve. Levrault, Strasbourg, 667 p.
- Orbigny (d'), A. D. 1844 - *Voyage dans l'Amérique Méridionale*. Tome 3, 1^{ere} partie, P. Bertrand, Paris et Vve. Levrault, Strasbourg, 457 p.
- Palma y V., J. 1901 - Pedro Kramer y José Zarco. *Boletín de la Sociedad Geográfica de La Paz*, año III, t. III, nº 5-6 : 220-221.
- Pifarré, F. s.j. 1989 - *Los Guaraní-Chiriguano. Historia de un pueblo*. Cipeca, La Paz, 542 p.
- Revista Colonial (La)- 1 número de 1894, Riberalta. En: RB Beni 125, ABNB, Sucre.
- «15 de Abril» (El) - Año 1, nº 9, 9 de noviembre de 1890, Trinidad. En: PB Beni 1b, ABNB, Sucre.