

Influence de la forêt sur la pluviométrie

Luc Descroix
géographe-hydrologue

José Luis Gonzalez Barrios
hydro-pédologue

Raul Solis
ingénieur forestier

Pluie et forêt ! ces éléments sont sans conteste liés puisque plus il pleut et plus la végétation naturelle est dense. Et les zones de forêts sont souvent associées aux montagnes ; les unes et les autres sont souvent liées, et ont pu paraître répulsives ou effrayantes même à diverses époques (CORBIN, 2001). Aujourd'hui où l'on cherche des endroits « sauvages », ce qu'il reste de milieux « moins anthropisés » en Europe, c'est vers la forêt et la montagne qu'on se dirige naturellement, donc vers les zones de pluie. La pluie elle-même a fait l'objet de perceptions différentes à travers les âges : il y a eu des périodes (l'âge romantique) où la pluie était bien accueillie, comme bienfaitrice et purificatrice ; or, aux dires d'Alain Corbin, la pluie a été conspuée dans les années 1950-1960, et alors « personne n'osait avouer qu'une averse fine pouvait être très agréable à certains moments de l'année ». La perception de la pluie varie plus encore dans l'espace, elle est parfois honnie en Europe quand il fait gris et pluvieux plusieurs semaines de suite et arrive à provoquer des inondations en plaine ; elle est unanimement saluée au Sahel, où les enfants se précipitent pour courir sous les gouttes, ou au nord du Mexique, où, que ce soit dans le désert de Chihuahua ou la Sierra Madre occidentale, elle apporte les bonnes nouvelles.

Mais qu'en est-il plus scientifiquement, c'est une des questions que se posent les sociétés et les savants depuis longtemps, à travers les âges comme dans des milieux très différents : les forêts peuvent-elles faire pleuvoir ?

Les relations entre la distribution spatiale des pluies et la localisation des formations végétales font l'objet de débats historiques, qui ne sont pas

*« Les forêts précèdent
les peuples, les déserts
les suivent »*

François René de Chateaubriand

sans rappeler ceux qui avaient animé les spécialistes sur le rôle de la forêt dans la formation des écoulements et les causes de l'érosion actuelle dans les Alpes du Sud, entre le milieu du XIX^e siècle et la fin du siècle suivant.

La présidence du Mexique elle-même a lancé une grande « Croisade pour l'eau et la forêt », (*Cruzada Nacional para el Agua y el Bosque*), ce qui montre que le débat n'est pas clos. Avant d'analyser, par une étude bibliographique puis par un exemple, les résultats des travaux menés sur le rôle de la forêt sur la localisation des pluies, on propose dans ce qui suit de partir de réflexions ou slogans lancés par des responsables mexicains de la gestion des eaux et/ou des forêts ; ces réflexions proviennent :

– d'un discours du gouverneur de l'État de Mexico, qui en janvier 2002, a déclaré qu'il fallait arrêter d'abattre inconsidérément des arbres car chaque arbre adulte « produisait » 8 000 l d'eau par an ; dans le même temps, le ministre de l'Environnement du Mexique, Mr Lichtinguer, semble convaincu qu'il va trouver de l'eau pour remplir les aquifères et les barrages en reboisant les montagnes.

– d'une enquête réalisée par la journaliste Sandra Gambino en 2000 dans la Sierra Madre occidentale, intitulée « *La sierra se está secando* » (la Sierra se dessèche). On peut y lire les impressions des habitants de la sierra et des responsables politiques :

- un habitant du village de La Ciudad (sur la route de Durango à Mazatlán) : « l'intense sécheresse que connaît la Sierra Madre occidentale est occasionnée par la coupe inconsidérée des forêts ; il sort un camion de grumes toutes les trois minutes, on est en train d'achever la forêt et l'avenir de nos enfants est mis en péril, car les pins génèrent de l'eau » ;
- un chauffeur de grumier : « on continue à extraire le bois comme auparavant, sans aucun contrôle, car il n'y a pas de policiers au cœur de la sierra, et dans la plupart des cas, les formulaires sont trafiqués » et plus loin « maintenant il fait plus chaud, il ne pleut plus et les arbres sont plus secs que jamais » ;
- un gérant de scierie : « on nous livre du bois chaque jour, mais cela ne nous regarde pas de savoir d'où il vient ; nous, ce qu'on veut, c'est produire des planches tous les jours pour répondre à la demande » ; et plus tard, « le prix du bois livré aux scieries est très bas, il n'est que de 40 % du prix pratiqué sur le marché déclaré » ;
- le représentant du ministère de l'Agriculture et du Développement rural pour l'État de Durango : « la forêt étant vitale pour générer de l'eau, les volumes de pluie tombés dans la sierra ont diminué drastiquement, provoquant une grave sécheresse » et « le premier facteur qui

provoque la sécheresse est la coupe immodérée du bois, qui n'a jamais été régulée », puis « la diminution des pluies dans le haut bassin du Nazas a des conséquences directes sur la Laguna, et cela s'est aggravé ces dernières années », ou encore « les conditions de sécheresse de la sierra sont catastrophiques, le paysage qui autrefois était vert jusqu'en avril, est aujourd'hui sec et sans vie, le vert a disparu, et à sa place, tout est jaune, marron ou ocre » ;

- la femme d'un paysan : « il fait chaque fois plus chaud, l'éclaircissement de la forêt a provoqué qu'il ne pleuve plus ».

Et la journaliste de conclure, « le panorama est désolant, la coupe immodérée, l'absence de programme de reboisement et d'une culture de patrimoine, font que le principal poumon du Nord-Mexique est en train de se dégonfler, mettant en péril des régions comme la Laguna, mais aussi les États de Sinaloa et Nayarit, qui dépendent des eaux générées dans la sierra de Durango ».

La liaison entre une baisse des pluies et une hausse des températures du fait du déboisement est une idée bien partagée du Mexique à l'Afrique ; ainsi, on entend exactement les mêmes réflexions en pays sérére au Sénégal, là où la savane arborée est devenue, sur 60 km de profondeur, une steppe très pauvre quand aux années de sécheresse s'est ajoutée en 1992, la décision du FMI d'interdire les subventions au gaz : la consommation de charbon de bois a monté en flèche, provoquant un recul de 60 km de la végétation arbustive et arborée.

Les relations entre la forêt et l'eau ont fait l'objet d'une étude très intéressante et très complète effectuée par ANDRÉASSIAN (2002). Il commence par présenter un historique de la perception du lien entre la forêt et l'hydrologie en général et des recherches scientifiques menées, il analyse également les relations entre la végétation et la pluie.

Le vaste panorama historique tracé par ANDRÉASSIAN (2002) commence à l'Antiquité, mais nous nous contenterons d'y puiser quelques remarques un peu plus récentes. Ainsi Bernardin de SAINT PIERRE (1787) note au sujet de l'île de France (l'île Maurice) : « L'attraction végétale des forêts est si bien d'accord avec l'attraction métallique des pitons de ses montagnes, qu'un champ situé en lieu découvert, dans le voisinage, manque souvent de pluie, tandis qu'il pleut presque toute l'année dans les bois qui n'en sont pas à une portée de fusil ». Peu d'années après, RAUCH (1801)

La vision historique de la rétroaction végétation-pluie

ment corroboré par toutes les observations consignées en Russie, en Allemagne, Autriche, Suisse et jusque dans les Indes ». Il avait été par contre complètement réfuté par VALLES (1857) qui affirme : « c'est sur les terrains dénudés, plutôt que sur les forêts, que la pluie tombe en plus grande abondance ». Entre ces deux dates, CÉZANNE (1872) avait déjà départagé les deux contradicteurs : « *les forêts sont impuissantes à modifier sensiblement la quantité d'eau pluviale qui tombe dans le bassin d'un fleuve* ».

Plus récemment, l'utilisation de nouveaux moyens de calcul a permis d'élaborer des modèles capables de tenir compte d'éventuelles rétroactions de la végétation sur les pluies. Mais des observations continuent à se faire, chaque jour plus nombreuses ; les références sont en général euro-africaines plus que mexicaines ou américaines, mais montrent que la question est au cœur des préoccupations scientifiques.

À nouveau les forestiers insistent sur le rôle « pluviogène » des masifs forestiers ; ainsi MARTIN (1950) a montré, pour une petite commune des Landes de Gascogne au cœur du plus grand massif forestier européen de constitution récente, qu'entre les périodes d'observations de 1782-1818 et de 1891-1900, encadrant à peu près la constitution du massif forestier, la pluviométrie moyenne annuelle serait passée de 709 mm à 938 mm, alors qu'elle ne changeait pas à Toulouse et n'augmentait que de 6 % à Paris. L'augmentation de la pluviosité sur la région landaise reboisée serait donc de l'ordre d'au moins 25 %. Cela pose toutefois le problème de fiabilité des pluviomètres utilisés dans les deux cas. Plus au nord, le Jutland était encore boisé au XVI^e siècle mais des guerres éliminèrent les forêts de chêne ; au XIX^e siècle, la sécheresse des printemps compromettait les cultures, et une « société des landes » se constitua en 1866 pour reboiser le pays en pins, dans l'espoir d'humidifier le climat printanier (BAVIER et BOURQUIN, 1957). La société et l'État reboisèrent 118 000 ha de landes et 40 000 ha de dunes ; après cela, les précipitations enregistrées pour les mois d'avril, mai et juin seraient passées de 100 mm en 25 jours de pluie vers 1870 à 150 mm en 35 jours de pluie, mieux répartis et moins orageux.

Plus récemment, PONCET (1981) conclut que « les massifs forestiers ralentissent les vents jusqu'à une hauteur au-dessus du sol correspondant à la couche limite de turbulence de la circulation atmosphérique, accrue par la rugosité aérodynamique des hautes frondaisons. Ce puissant freinage

L'évolution récente de cette question

agit en premier lieu sur l'évapotranspiration réelle des peuplements forestiers et sur le régime thermique. Ce freinage des vents, favorable à leurs échanges thermiques avec la couverture du sol, favorise aussi les condensations et facilite les précipitations ». Mais cet auteur est par ailleurs un des rares à citer des études dans lesquelles il est démontré que les zones boisées ont des coefficients d'écoulement annuels supérieurs aux zones déboisées alentour, toutes choses étant égales par ailleurs.

Les universitaires ont apporté leur contribution à ces recherches. Ainsi, pour l'historien THOMPSON (1980), « L'idée selon laquelle la forêt augmenterait les pluies n'est pas nouvelle. Si l'on en croit son fils Ferdinand, Christophe Colomb savait « par expérience » que la disparition de la forêt qui recouvrait à l'origine les Canaries, Madère et les Açores avait réduit les brouillards et les pluies. De même, il pensait que les pluies de l'après-midi qui se produisent en Jamaïque et dans les Antilles étaient la conséquence de la luxuriante forêt des îles ». Par ailleurs, le passage d'une masse d'air d'un plateau dénudé à une forêt entraîne selon ESCOURROU (1981) un ralentissement de la vitesse du vent et par suite une ascendance de l'air qui renforce l'intensité des pluies. « La reforestation a permis, dans certains endroits, d'augmenter les pluies de plus de 6 % et cette action est surtout sensible pendant les années sèches. La destruction de la forêt dense en Afrique peut avoir des conséquences incalculables quand on sait que les pluies sont plus fortes de 30 %, l'humidité relative de 15 % et les températures plus faibles de 1°5 dans les parties forestières ».

Dans les Alpes du Sud (DESCROIX, 1994), la pluviométrie des mois d'été (juin à août compris) a diminué de 0,5 à 8 % suivant les postes entre 1881 et 2000. Cette tendance ne s'observe pas dans les postes des massifs ayant connu les plus forts reboisement (Ventoux-Lure, Préalpes de Digne).

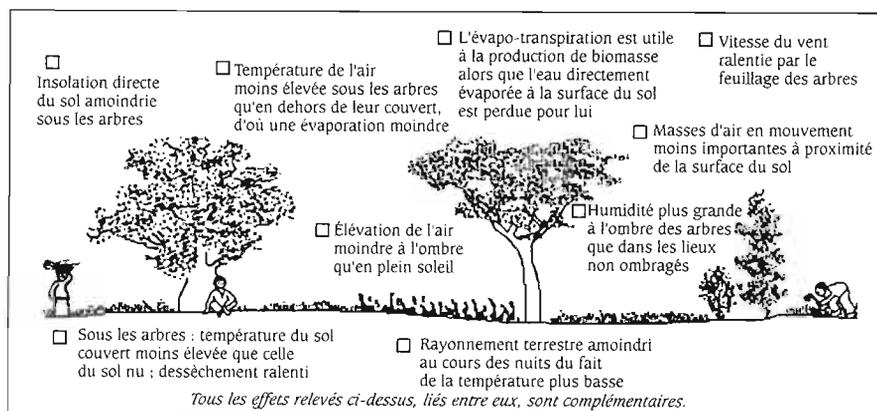
Dans les régions tropicales, la déforestation a pu jouer un rôle important. La Côte d'Ivoire connaît une forte pression sur ses ressources forestières depuis une trentaine d'années ; or la forêt tropicale humide présente une évapotranspiration annuelle proche de celle des océans tropicaux (1 500 à 2 500 mm). Cette destruction de la forêt n'équivaut-elle pas à éloigner le Sahel des zones de fourniture de vapeur d'eau ? Concernant les sécheresses sahéliennes post 1968, LABEYRIE estimait en 1985 que « le surpâturage, qui va croissant à mesure que la population sahélienne augmente, contribue sans doute à les rendre de plus en plus prononcées, de plus en plus meurtrières ».

Il revient à CHARNEY (1975) d'avoir montré, toujours dans le contexte sahélien, le rôle de la végétation dans le déclenchement de la convection, par

l'intermédiaire de l'albédo : « Une augmentation de l'albédo de 14 à 35 % au nord de la Zone de convergence intertropicale (ZCIT) provoque un déplacement de cette ZCIT de plusieurs degrés vers le sud, et une diminution de 40 % de la pluviométrie au Sahel durant la saison des pluies ». Quelques années plus tard, ANTHES (1984) (cité par DIONGUE, 2001) a passé en revue les observations et les études théoriques sur les capacités de la végétation à renforcer les précipitations convectives. Il dénombre trois principaux mécanismes : i) l'augmentation de l'énergie statique humide liée à une diminution de l'albédo ; ii) la création de circulations de méso-échelle associées aux inhomogénéités ; iii) le renforcement de l'humidité atmosphérique dû à une augmentation de l'évaporation.

Ces deux auteurs sont physiciens de l'atmosphère, et travaillent à l'échelle zonale ; à l'échelle locale, on insiste sur le rôle des microclimats. On peut lire ainsi dans un manuel d'hydrologie et d'irrigation dédié aux régions tropicales : « L'homme ne peut pas agir directement sur les macroclimats. Par contre, il peut chercher à organiser ses terroirs en vue d'y modifier, d'y créer ou d'y maintenir des microclimats » (DUPRIEZ et DE LEENER, 1990). La figure 44 met en évidence les effets positifs que peut avoir le couvert végétal sur le microclimat d'un terroir. Il semblerait que le rôle des haies, des bosquets et des arbres isolés dans la régulation des températures soit très important, tant à la surface du sol que sur la couche limite. Par contre, les effets à méso ou macro-échelle sont presque impossibles à prouver. C'est ce qui fait dire à BRUIJNZEEL (1990), chercheur à l'Unesco : « De nombreux travaux menés dans les climats tropicaux humides et tempérés ont pourtant généralement conduit à la conclusion que la forêt n'a pas de conséquence sur la pluviométrie locale et les résultats contraires qui ont pu être avancés pèchent presque tous par la faiblesse des données sur lesquelles ils reposent ».

Fig. 44 – Effets positifs de la végétation sur le microclimat d'un terroir (d'après DUPRIEZ et DE LEENER, 1990).



Et ici, il faut remarquer que les travaux les plus marquants sur les rétroactions végétation/pluie concernent les grands massifs forestiers tropicaux, et les secteurs les plus pluvieux de la Planète. En effet, l'impact de la végétation est plus marqué et de fait, plus étudié dans ces régions que dans les zones moins pluvieuses.

Quelques données observées

Les liens avec la végétation étaient, on l'a vu, ancrés dans la mémoire des scientifiques comme une question récurrente basée sur des intuitions. Certaines observations ont toutefois aiguillé les chercheurs vers l'existence d'une telle rétroaction. Il a été constaté (RABIN *et al.*, 1990), en utilisant l'imagerie satellitaire et des informations *in situ*, que la convection se formait d'abord sur une zone avec un sol plus chaud, comme par exemple un champ de blé, plutôt que sur des secteurs adjacents recouverts de végétation « verte ». Les gradients de flux induits par les contrastes de surface peuvent être atténués dans la couche limite par turbulence si les régions hétérogènes ont des dimensions faibles ou peuvent être diluées dans l'écoulement synoptique. TAYLOR et LEBEL (1998) ont démontré que « sous certaines conditions de surface, il s'établit une corrélation positive entre les précipitations du jour et les précipitations antérieures. Ces circonstances apparaissent quand les combinaisons d'averses précédentes ont modifié les taux d'évaporation locale. Les gradients de pluie lors des événements subséquents tendent à persister, renforçant la configuration d'humidité des sols ». Cela indique le poids important des conditions de surface. De plus, PHILIPPON et FONTAINE (2002) ont établi que les saisons des pluies humides sur le Sahel étaient précédées d'hivers (boréaux) où la teneur en eau des sols était anormalement élevée sur les régions soudano-sahéliennes.

Quoi qu'il en soit, le doute persiste, et LAVABRE et ANDRÉASSIAN (2000) affirment : « La forêt a un impact significatif sur le climat local (albédo plus faible, évapotranspiration plus forte). À l'échelle régionale, malgré quelques résultats de recherche dans le sens d'un effet positif sur la pluviosité, il est néanmoins difficile de conclure à un effet quelconque de la couverture forestière ».

Beaucoup de conclusions basées sur les résultats des modèles

Les rétroactions végétation-climat étant bien difficiles à déterminer, on fait de plus en plus appel aux modèles (avec le risque que l'on construise un modèle pour répondre à une question scientifique et que du coup, on le mette au point dès le départ pour répondre dans le sens recherché). Au sujet du recyclage de l'eau, COSANDEY et ROBINSON (2000)

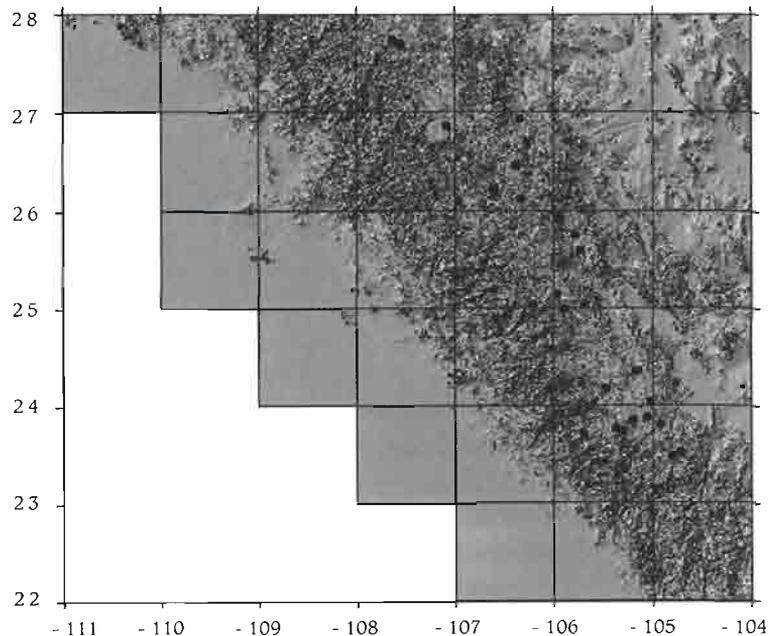
concluent « les estimations varient beaucoup d'un modèle à l'autre. HENDERSON-SELLERS (1987) compare les résultats de quatre d'entre eux : la modification des précipitations qui résulteraient de la déforestation de l'Amazonie varierait d'une augmentation de 75 mm (LETTAU *et al.*, 1979) à une réduction de 200 à 230 mm (HENDERSON-SELLERS et GORNITZ, 1984) ou de 100 à 800 mm selon les endroits (Wilson, 1984 cité par HENDERSON-SELLERS, 1987). LEAN et WARRILOW (1989) propose que la pluie diminuerait de 20,3 %, les débits de 11,9 % et l'évapotranspiration réelle (ETR) de 27,2 %. DICKINSON *et al.* (1986) trouvent aussi une réduction de l'évaporation (jusque 50 %) et des précipitations (20 %). Un modèle proposé par SHUKLA *et al.* (1990) aboutit à des estimations voisines ». Dans le même massif forestier, on a déterminé que « l'effet de la déforestation est un réchauffement du sol et une augmentation de la convergence d'humidité induite par un renforcement de la ZCIT » (POLCHER et LAVAL, 1994). D'autres modèles ont permis de définir que « l'évaporation à partir de l'océan Atlantique tropical, de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique centrale contribue pour 23, 27 et 17 % respectivement, des pluies sur l'Afrique de l'Ouest » ; d'autres auteurs font varier cette proportion de 10 à 90 %, en utilisant des modèles différents (GONG et ELTAHIR, 1996). ZENG *et al.* (1999) ont montré comment la prise en compte d'une rétroaction de l'humidité du sol et de la végétation reproduisait bien mieux les valeurs de précipitations que la seule prise en compte de ces éléments sans rétroaction de leur part. Par ailleurs, la même équipe a remarqué que « quand le modèle (couplé atmosphère-terre-végétation) est forcé par des températures de surface de la mer (SST : *sea surface temperatures*) observées, un feedback positif des changements végétaux conduit à une augmentation du gradient spatial entre les régions désertiques et les régions forestières aux dépens des zones de savanes. Quand la variation interannuelle des SST est prise en compte, la variabilité climatique tend à réduire la pluviométrie et la végétation des régions les plus humides et à les accroître dans les zones les plus sèches, amortissant la transition désert-forêt » (ZENG et NEELIN, 2000). Et, toujours en Afrique de l'Ouest, il a été constaté que « des changements de la circulation générale jouent un rôle important dans le déclenchement de la sécheresse au Sahel (1968-1995), mais d'autres mécanismes peuvent être responsables de la persistance des conditions sèches. Une ACP centrée sur la vitesse verticale des vents indique un changement important dans la circulation générale avant la sécheresse, durant les années soixante. De semblables changements de circulation générale dans les années 1970 n'ont pas été accompagnés d'un retour aux conditions humides » (LONG *et al.*, 2000).

Enfin, SHINODA et GAMO (2000) et SHINODA (2000) ont mis en évidence une *corrélation* entre une végétation plus fournie que la normale (c'est-à-dire de hautes valeurs de NDVI) et des valeurs de température au-dessus de la couche limite de convection inférieures à la normale ; ce dernier point conduit à un gradient de température altitudinal supérieur et donc à une convection améliorée et une pluviométrie supérieure ; ils montrent que les « pluies des mangues », qui se produisent au Sahel parfois quelques mois avant la saison des pluies, peuvent aussi provoquer cette amélioration de la convection. Cette rétroaction végétation-pluviométrie explique en grande partie le mécanisme de la désertification.

Un exemple de recherche de relation rugosité-pluviométrie dans la Sierra Madre

On déjà montré que la relation pluie-végétation est très forte du fait de l'étagement des formations végétales en fonction de la pluviométrie annuelle moyenne. Cette très forte relation empêche de trouver, par analyse factorielle, une quelconque *relation inverse* qui montrerait une rétroaction de la végétation sur la distribution spatiale des pluies. On va tenter ici d'interpréter les résultats de travaux de terrain effectués lors d'une mission réalisée en novembre 2002 sur les sites d'un grand nombre de stations pluviométriques de la Sierra Madre occidentale.

Fig. 45 - Relief de la zone étudiée (d'après le modèle numérique de terrain mexicain à maille de 90 m) et localisation des postes.



On a sélectionné pour cela une trentaine de stations réparties sur plus de 400 km du nord au sud, et où les conditions par ailleurs (c'est-à-dire en dehors du taux de boisement) étaient à peu près les mêmes.

Il faut préciser que le nombre de stations s'est considérablement réduit, passant de 312 à une trentaine, et ce chiffre est en général considéré comme le plancher d'une population statistiquement représentative. Mais il a été impossible de trouver davantage de stations en situation homogène : on n'a en effet considéré que les postes pluviométriques situés à l'étagé de la forêt et dans le plateau sommital de la Sierra Madre occidentale de manière à ce que le relief, l'altitude, la rugosité et le type de formation végétale soient les plus proches possibles ; on est donc uniformément dans la forêt de pins, entre 2 200 et 3 000 m d'altitude et sur les plateaux rhyolitiques de la sierra. La liste des stations, localisées aussi sur la figure 45, est portée dans le tableau XXV.

8005	Balleza
8038	Creel, Bocoyna (CFE)
8061	El Vergel, Balleza (SMN)
8073	Guadalupe y Calvo (DGE)
8128	San Pedro
8172	Guadalupe y Calvo (SMN)
8214	Guacho chic (SMN)
8267	El Vergel, Balleza (DGE)
8271	Laguna Arareco, Bocoyna
8312	Guacho chic
8319	La Laguna, Bocoyna
8320	Llanitos, Balleza
8321	San Juan Chinatu
8322	El Vergel, Balleza (CFE)
10007	Ciénega de Escobar
10010	Col. Ignacio Zaragoza
10025	El Salto, P.Nuevo (SMN)
10029	Guanacevi, Guan. (SMN)
10036	La Ciudad, Pueblo Nuevo
10040	Las Bayas, Durango
10043	Las Vegas, San Dimas
10044	Llano Grande, Dur. (CFE)
10048	Navios Viejos, Durango
10050	Ojito de Camellones
10051	Otinapa, Durango
10071	San Miguel de Lobos
10093	El Salto, Pueblo Nuevo
10094	Guanacevi, Guanaceví
10096	La Chaparra (PFM)
10103	Santa Barbara (cia.gan)
10121	Los Altares
10124	La Flor, s. Bayacora
10125	La Rosilla
10130	Ignacio Zaragoza
10147	El Zape, Guanacevi

Tabl. XXV – Liste des stations utilisées pour l'analyse de la relation pluviométrie/densité végétale.



Aire de stockage de troncs de pins sur la piste de Buenos Aires (Sierra La Concepción, au-dessus de Tepehuanes).

Hypothèses initiales

On a considéré que les éléments de paysage qui avaient le plus de chances d'avoir une influence sur la répartition spatiale des précipitations étaient les suivants ; les sigles signalés entre parenthèses sont ceux du tableau XXVI tels qu'utilisés pour l'analyse en composantes principales :

– la pluviométrie moyenne (PMO) qui est ici la principale variable dépendante, mais l'on a aussi introduit l'écart-type des pluies annuelles (PET) et le coefficient de variation (PCV) ;

– le relief :

- l'altitude (ALT) de la station ; par ailleurs, on a considéré l'altitude moyenne autour de la station. Pour ce faire, on a pris en compte, grâce au MNT (modèle numérique de terrain), un carré de 36 km² autour du poste, pour lequel on a calculé, non seulement cette altitude moyenne (AMO), mais aussi l'écart-type de ses altitudes (AET) et leur coefficient de variation, que l'on considérera comme la rugosité de ce carré (ACV).

– les masses végétales :

- la densité : (IDF et IDC sous forêt et clairière respectivement) et la rugosité (IRF et IRC).

Tabl. XXVI – Liste des variables considérées dans l'analyse en composantes principales (ACP).

PMO	Précipitation moyenne annuelle
PET	Écart-type des précipitations annuelles
PCV	Coefficient de variation des précipitations annuelles
ALT	Altitude de la station
AMO	Altitude moyenne du carré de 36 km ² autour de la station
AET	Écart-type des altitudes du carré de 36 km ²
ACV	Coefficient de variation de l'altitude du carré = rugosité
DIO	Distance à l'océan Pacifique
LONG	Longitude (UTM)
LAT	Latitude (UTM)
IDC	Indice Densité Végétale Clairière
IDF	Indice Densité Végétale Forêt
IRC	Indice Rugosité Végétale Clairière
IRF	Indice Rugosité Végétale Forêt
IRS	Indice de Rugosité du Sol
SUPC	Superficie de la Clairière

La plupart des stations étant situées dans des clairières (il n'est pas conseillé d'installer un pluviomètre au cœur d'une forêt), on a considéré les densités et rugosités de la masse végétale dans les clairières et dans les forêts autour de la clairière.

– la surface de la clairière (SUPC).

– on a aussi pris en compte la distance à l'océan Pacifique (DIO), la latitude (LAT) et la longitude (LONG) de la station ainsi que la rugosité du sol autour du poste (écart-type et CV de la topographie numérisée).

On a procédé après avoir dressé la matrice de corrélation (tabl. XXVII) à une ACP (Analyse en composantes principales) de manière à classifier les variables et à entrevoir les redondances qu'elles pouvaient comporter entre elles.

On a considéré quatre composantes principales et leurs valeurs propres respectives sont signalées dans le tableau XXVIII. Elles expliquent en tout 73,4 % de la variance de la population.

La classification des variables apparaît dans les figures 46 (axes 1 et 2) et 47 (axes 3 et 4).

Le premier espace des variables représente plus de 51 % de la variance expliquée.

Classification des variables par ACP

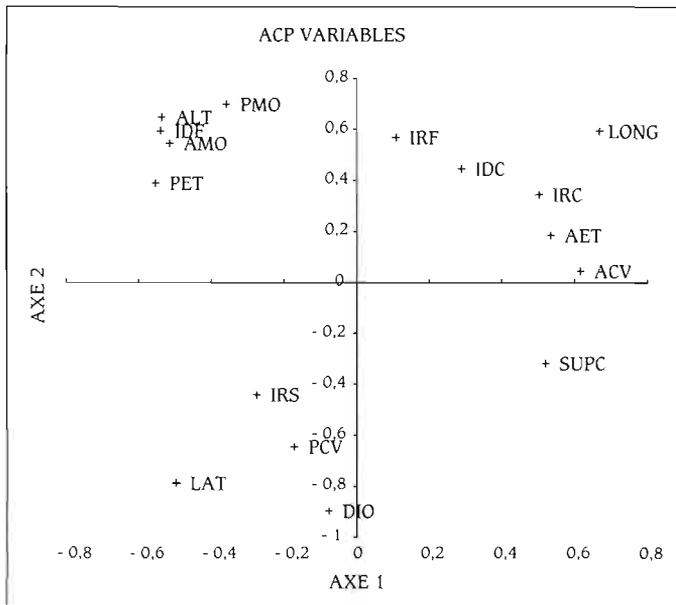


Fig. 46 – Espace des variables suivant les deux premières composantes de l'ACP.

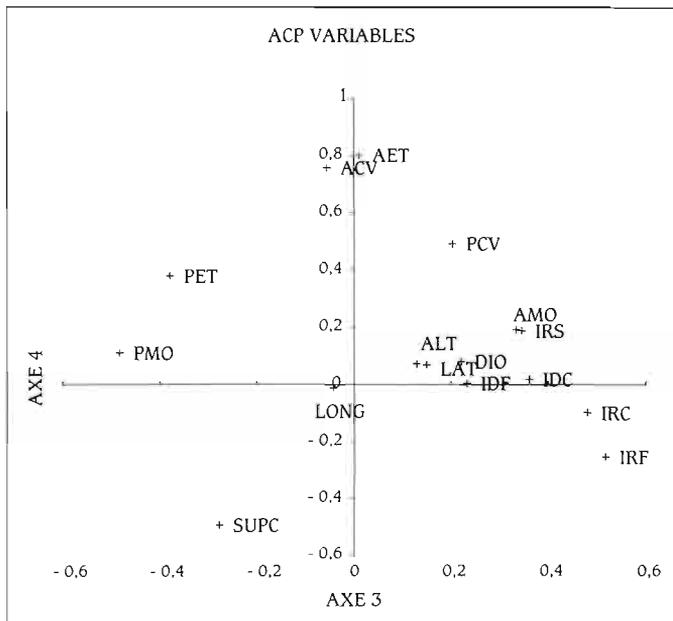


Fig. 47 – Espace des variables suivant les 3^e et 4^e composantes.

Le premier axe est avant tout déterminé par la rugosité du relief (ACV), son écart-type (AET), l'indice de rugosité des clairières (IRC), la superficie des clairières (SUPC) et l'écart-type des pluies annuelles (PET). La superficie de la clairière corrélée négativement avec la pluie moyenne conduit à

penser que les grandes clairières pourraient constituer des zones où la rugosité diminue, entraînant une diminution relative des précipitations.

Le deuxième axe est défini avant tout par la distance à l'Océan (DIO), le coefficient de variation interannuelle des précipitations (PCV) et l'indice de rugosité de la forêt (IRF).

Les deux premiers sont corrélés négativement avec la pluie (PMO).

Par contre, la pluie est corrélée positivement avec l'indice de densité et l'indice de rugosité de la forêt (et à un moindre degré avec ceux des clairières) ; ceci semble confirmer le rôle « pluviogène » de la rugosité de la cime des formations végétales.

	PMO	PET	PCV	ALT	AMO	AET	ACV	DIO	LONG	LAT	IDC	IDF	IRC	IRF	IRS	SUPC
PMO	1,00															
PET	0,81	1,00														
PCV	-0,48	0,11	1,00													
ALT	0,49	0,45	-0,25	1,00												
AMO	0,33	0,29	-0,15	0,84	1,00											
AET	0,02	0,02	0,11	-0,08	0,00	1,00										
ACV	-0,07	-0,04	0,18	-0,26	-0,21	0,97	1,00									
DIO	-0,69	-0,32	0,72	-0,43	-0,29	-0,14	-0,05	1,00								
LONG	0,07	-0,20	-0,43	0,06	0,03	0,43	0,39	-0,56	1,00							
LAT	-0,35	0,00	0,63	-0,23	-0,16	-0,33	-0,27	0,82	-0,93	1,00						
IDC	0,20	0,08	-0,21	0,13	0,07	0,20	0,16	-0,36	0,24	-0,31	1,00					
IDF	0,53	0,48	-0,25	0,57	0,44	-0,17	-0,27	-0,48	-0,03	-0,16	0,19	1,00				
IRC	-0,02	-0,16	-0,22	-0,04	0,03	0,23	0,19	-0,14	0,39	-0,34	0,66	0,02	1,00			
IRF	0,06	-0,08	-0,32	0,28	0,27	-0,02	-0,07	-0,45	0,41	-0,44	0,27	0,47	0,40	1,00		
IRS	-0,27	-0,12	0,31	-0,19	-0,09	-0,03	-0,02	0,35	-0,48	0,50	-0,10	0,11	-0,25	-0,15	1,00	
SUPC	-0,24	-0,35	-0,14	-0,45	-0,68	-0,14	-0,01	0,19	0,10	-0,01	0,06	-0,49	0,16	-0,12	-0,10	1,00

(Les valeurs en gras sont celles qui sont statistiquement significatives.)

Tabl. XXVII – Matrice de corrélation des variables.

Tabl. XXVIII – Valeurs propres des quatre premières composantes de l'ACP.

N° composante	Valeurs propres	% Total Variance	Cumul Valeurs propres	Cumul variance pourcentage
1	4.86142512	30.383907	4.86142512	30.383907
2	3.36378642	21.0236651	8.22521154	51.4075721
3	2.00760329	12.5475206	10.2328148	63.9550927
4	1.50809794	9.42561213	11.7409128	73.3807048

Le deuxième espace des variables représente encore 22 % de variance expliquée supplémentaire (axes 3 et 4, fig. 47).

L'axe 3 est très nettement déterminé par la précipitation moyenne (PMO) qui est, bizarrement, corrélée négativement avec tous les indices de rugosité (IRF et IRC) et de densité (IDF et IDC) au premier rang desquels l'indice de rugosité de la forêt. Cela relativise d'autant plus les observations antérieures que la matrice de corrélation (tabl. XXVII) montre qu'il n'y a pas de corrélation pluie-rugosité du couvert. Cela va à l'encontre des résultats acquis précédemment (DESCROIX *et al.* 2001) où l'on observait une corrélation évidente entre pluie et masse végétale (alors exprimée en valeur de NDVI : indice normalisé de végétation sur des carrés de surface différente autour du poste). Mais cette étude sur le lien pluie-NDVI était entachée du problème de la relation inverse bien plus puissante qui fait que la végétation d'une région dépend bien sûr de la précipitation qu'elle reçoit.

L'axe 4 n'apporte presque aucune information concernant la pluie, celle-ci étant trop près de l'axe 3 pour déterminer une corrélation avec la 4^e composante. Il est défini essentiellement par la rugosité du relief (ACV et AET).

La contradiction de l'information fournie par les axes 2 et 3 montre bien les problèmes d'interprétation des analyses en composantes principales. On peut obtenir des corrélations inverses suivant les variables considérées, du fait du rôle complémentaire que joue chaque variable vis-à-vis de chacune des autres.

Classification des stations par ACP

Les individus considérés dans notre population statistique sont ici les stations pluviométriques prises en compte pour cette analyse.

Leur intercorrélations est décrite par la figure 48, qui représente les composantes 1 et 2. Les valeurs propres et pourcentage de variance expliquée sont les mêmes que pour les variables.

On constate dans la figure 48 que les stations se regroupent en trois sous-ensembles assez dissemblables :

- le groupe 1 des stations situées le plus bas en altitude (2 000 à 2 250 m), surtout comprises dans l'État de Durango (sauf Balleza – 8005 – et Llanitos – 8320 –) et qui de ce fait ont une pluviométrie annuelle moyenne modérée (550 à 700 mm) ;
- le groupe 2 de stations, essentiellement situées dans l'État de Chihuahua, à haute altitude (de 2 400 à 3 000 m) mais où la pluviométrie est également modérée (600 à 800 mm) du fait de la continentalité ;

Références

ANDRÉASSIAN V., 2002 – *Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants*. Thèse de doctorat de l'université Paris 6, 275 p.

ANTHES R., 1984 – Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semiarid regions. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 : 541-554.

BAUDRILLART J.-J., 1823 – *Traité général des Eaux et Forêts, chasses et pêches, 1*. Paris, Arthus Bertrand, 816 p.

BAVIER J.B., BOURQUIN A., 1957 – *Défense et illustration de la forêt*. Lausanne, Payot.

BECQUEREL A.-C., 1865 – *Mémoire sur les forêts et leur influence climatérique*. Paris, Firmin-Didot frères, 366 p.

BOUSSINGAULT J.-B., 1837 – Mémoire sur l'influence des défrichements dans la diminution des cours d'eau. *Annales de Chimie*, 64 : 113-141.

BRUIJNZELL L.A., 1990 – *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion : a state of knowledge review*. Unesco, IHPA, Publication of the Humid Tropics Programme.

CÉZANNE E., 1872 – *Suite de l'étude sur les torrents des Hautes-Alpes*. Paris, Dunod, 382 p.

CHARNEY J.G., 1975 – Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101 (248) : 193-202.

CORBIN A., 2001 – *L'homme dans le paysage*. Paris, Textuel, 190 p.

COSANDEY C., ROBINSON M., 2000 – *Hydrologie continentale*. Paris, Armand Colin, 359 p.

DAUSSE M., 1842 – De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau. *Annales des Ponts et Chaussées*, 3 (mars-avril) : 184-209.

DESCROIX L., 1994 – *L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud*. Thèse de doctorat, université Lyon II, 300 p.

DESCROIX L., NOUVELOT J.F., ESTRADA J., LEBEL T., 2001 – Complémentarités et convergences de méthodes de régionalisation des précipitations : application à une région endoréique du Nord-Mexique. *Revue des Sciences de l'Eau*, 14 (3) : 281-305.

DICKISON R.B.B., PALMER D.C., DAUGHARTY D.A., 1986 – Assessment of harvesting treatment effect on the water balance of forested basins-precipitation network design considerations. Publ. n° 158, *IAHS redbooks* : 97-103.

DIONGUE A., 2001 – *Interactions entre convection et écoulement de grande échelle au sein de la mousson de l'Afrique de l'Ouest*. Thèse de l'université Toulouse 3-Paul Sabatier, Physique de l'atmosphère, 248 p.

DUGIED P.H., 1819 – *Projet de reboisement des Basses-Alpes*. Paris, Imprimerie Royale, 113 p.

DUPRIEZ H., DE LEENER P., 1990 – *Les chemins de l'eau : ruissellement, irrigation, drainage*. Nivelles Belgique, L'Harmattan Enda, coll. Terres et Vie

(<http://www.terresetvie.com>) 380 p.

ESCOURROU G., 1981 – *Climat et environnement : les facteurs locaux du climat*. Paris Masson, coll. géographie, 180 p.

FONTAINE B., PHILIPPON N., TRZASKA S., ROUCOU P., 2002 – Spring to summer changes in the West African monsoon through NCEP/NCAR reanalyses (1968-1998). *J. Geophys. Res.*, 107, D14, 10.1029-10.1037.

GAMBINO S., 2000 – La sierra se está secando. *Revista de Coahuila* : 26-27.

GONG C., ELTAHIR E. A. B., 1996 – Sources of Moisture for Rainfall in West Africa. *Water Resources Research*, 32 (10) : 3115-3121.

HENDERSON-SELLERS A., GORNITZ V., 1984 – Possible climatic impact of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. *Climatic changes*, 6 : 231-257.

HENDERSON-SELLERS A., 1987 – Modelling tropical deforestation : a study of GCM land surface parameterizations. *Quarterly Journal Of the Royal Meteorological Soc.*, 114 : 439-462.

JACQUOT A., 1909 – *La forêt et son rôle dans la nature et la société*. Paris, Recueil de conférences populaires.

LABEYRIE J., 1985 – *L'homme et le climat*. Paris, Denoël, 272 p.

LAVABRE J., ANDRÉASSIAN V., 2000 – *La forêt, un outil de gestion des eaux ?* Antony, Cemagref Éditions, 120 p.

- LEAN J., WARRILOW DA, 1989 – Simulation of the regional climatic impact of Amazonian deforestation. *Nature*, 342 (6248) : 411-413.
- LETTAU H., LETTAU K., MOLION L.C.B., 1979 – Amazonia's hydrologic cycle and the role of atmospheric recycling in assessing deforestation effects. *Monthly Weather Review*, 107 : 227-238.
- LONG M., ENTEKHABI D., NICHOLSON S.E., 2000 – Interannual variability in rainfall, water vapor flux and vertical motion over West Africa. *Journal of Climate*, 13 : 3827-3841.
- MAHÉ G., 1993 – *Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité inter-annuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes*. Thèse de l'université Paris 11 Orsay, IRD, coll Études et thèses, 438 p.
- MARTIN J.J.E., 1950 – Influence de l'état boisé sur la pluviosité. *Revue forestière française*. Nancy (n° d'avril 1950).
- MATTHIEU A., 1878 – *Météorologie comparée agricole et forestière*. Paris, Imprimerie nationale, 70 p.
- PHILIPPON N., FONTAINE B., 2002 – The relationship between the Sahelian and previous 2nd Guinean rainy seasons : a monsoon regulation by soil wetness ? *Annales geophysicae*, 20 : 575-582.
- POLCHER J., LAVAL K., 1994 – The impact of African and Amazonian deforestation on tropical climate. *J. of Hydrol.*, 155 : 389-405.
- PONCET A., 1981 – « Interactions forêts et climats ». In : *Eaux et climats, mélanges offerts en hommage à C. Péguy*, Grenoble, CNRS : 445-461.
- RABIN R., STADLER S., WETZEL P., STENSRUD D., GREGORY M., 1990 – Observed effects of landscape variability on convective clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71 : 272-279.
- RAUCH F.A., 1801 – *Harmonie hydro-végétale et météorologique ou recherches sur les moyens de recréer avec nos forêts des températures et la régularité des saisons, par des plantations raisonnées*, 2. Paris, les frères Levrault, 299 p.
- RICHARD Y., POCARD I., 1998 – NDVI sensitivity to spatial and interannual rainfall variations in southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 19 : 2907-2920.
- SAINTE PIERRE (DE), B.J.H., 1787 – *Études de la Nature*, 2. Paris, Imprimerie de Monsieur.
- SANTIAGO A., 1998 – *Impact des états de surface continentaux sur la dynamique pluvieuse au Cameroun*. Thèse, université de Bourgogne, Dijon, 243 p.
- SHINODA M., 2000 – Desertification and drought as a possible land-surface/atmosphere interaction. *Global Environmental Research*, 3 (1) : 9-15.
- SHINODA M., GAMO M., 2000 – Interannual variations of boundary layer temperature over the African Sahel associated with vegetation and the upper troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D10) : 12317-12327.
- SHUKLA J., NOBRE C., SELLERS P.J., 1990 – Amazon deforestation and climatic change. *Science*, 247 : 1322-1325.
- SURELL A., 1841 – *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*. Paris, Carilian-Goeury et Victor Dalmont, 283 p.
- TAYLOR C., LEBEL Th., 1998 – Observational Evidence of persistent convective-scale rainfall patterns. *Monthly Weather Review*, 126 : 1597-1607.
- THOMPSON K., 1980 – « Forest and climate change in America : some early view » In Cosandey C., Robinson M. : 316.
- VALLÈS F., 1857 – *Étude sur les inondations, leurs causes et leurs effets*. Paris, Victor Dalmont, 528 p.
- XUE Y., SHUKLA J., 1993 – The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I : Desertification. *J. Climate*, 6 : 2232-2245.
- ZENG N., NEELIN J.D., LAU K.M., TUCKER C. J., 1999 – Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286 : 1537-1540.
- ZENG N., NEELIN J.D., 2000 – The role of vegetation-climate interaction and interannual variability in shaping the African savanna. *J. Clim.*, 13 : 2665-2670.

latitudes 23

La Sierra Madre occidentale

Un château d'eau menacé

Éditeurs scientifiques

Luc Descroix, Juan Estrada,
José Luis Gonzalez Barrios, David Viramontes

IRD
Éditions

Sommaire

Avant-propos	11
Préambule	13
<i>Jean-François NOUVELOT</i>	
Introduction	15
<i>Luc DESCROIX</i>	
Encadré 1 : Géologie de la Sierra Madre occidentale. Constitution et origine	33
<i>Marc TARDY</i>	

MILIEU NATUREL ET PEUPEMENT DANS LA SIERRA MADRE OCCIDENTALE

Les ressources en eau dans le centre-nord du Mexique. Perspective historique	49
<i>David VIRAMONTES</i>	
Encadré 2 : Propriété privée et publique, gestion collective. Quelle politique patrimoniale ?	59
<i>Luc DESCROIX</i>	
Une montagne en voie d'abandon ?	65
<i>Béatrice INARD-LOMBARD</i>	
Encadré 3 : Un contexte démographique et économique de transition. Démographie comparée de la Sierra Madre avec celle de deux autres régions agro-pastorales	83
<i>Luc DESCROIX</i>	
Le projet <i>Hervideros</i> . Un regard sur le passé préhispanique de la Sierra Madre occidentale du Durango, Mexique	93
<i>Marie-Areti HERS et Oscar J. POLACO</i>	
Encadré 4 : L'indianité et l'indigénisme au Mexique et dans la Sierra Madre occidentale	115
<i>Luc DESCROIX</i>	

LES SOLS ET L'EAU : PRÉCIPITATIONS ET RUISSELLEMENT DANS LA SIERRA

Le climat et l'aléa pluviométrique au Nord-Mexique	129
<i>Jean-François NOUVELOT, Luc DESCROIX et Juan ESTRADA</i>	

La spatialisation des précipitations sur les deux versants de la Sierra Madre occidentale	145
<i>Luc DESCROIX, Jean-François NOUVELOT, Juan ESTRADA et Alfonso GUTIERREZ</i>	
Un encroûtement des sols limitant l'infiltration	155
<i>Jérôme POULENARD, José Luis GONZALEZ BARRIOS, David VIRAMONTES, Luc DESCROIX et Jean-Louis JANEAU</i>	
Des conditions favorisant une érosion et un ruissellement en nappe ..	171
<i>José Luis GONZALEZ BARRIOS, Luc DESCROIX, David VIRAMONTES, Jérôme POULENARD, Alain PLENECASSAGNE, Laura MACIAS, Christelle BOYER et Arnaud BOLLERY</i>	
PÂTURAGES ET FORÊTS SOUS PRESSION	
Trop de bétail et trop de bûcherons. Une économie minière	191
<i>David VIRAMONTES, Eva ANAYA, Coral GARCIA, Jérôme POULENARD, Henri BARRAL, Laura MACIAS et Maria Guadalupe RODRIGUEZ CAMARILLO</i>	
Encadré 5 : L'appréciation du surpâturage	201
<i>Eva ANAYA, Luc DESCROIX et Henri BARRAL</i>	
Une eau menacée par la dégradation des ressources végétales	207
<i>Luc DESCROIX, David VIRAMONTES, Eva ANAYA, Henri BARRAL, Alain PLENECASSAGNE, José Luis GONZALEZ BARRIOS, Jeffrey BACON et Laura MACIAS</i>	
Influence de la forêt sur la pluviométrie	221
<i>Luc DESCROIX, José Luis GONZALEZ BARRIOS et Raul SOLIS</i>	
UNE EAU DISPUTÉE DANS UN ESPACE ENCORE LIBRE	
L'eau, agent économique et enjeu politique	249
<i>Luc DESCROIX et Frédéric LASSERRE</i>	
L'écotourisme : une alternative à la déprise et à la surexploitation ? Des atouts pour développer une nouvelle activité	265
<i>Luc DESCROIX</i>	
Eau et espace à Valle de Bravo. La bataille pour l'eau	283
<i>Luc DESCROIX, Michel ESTEVES, David VIRAMONTES, Céline DUWIG et Jean-Marc LAPETITE</i>	
Conclusion : une région à construire, un territoire et des ressources à préserver	295
<i>Luc DESCROIX, David VIRAMONTES et José Luis GONZALEZ BARRIOS</i>	
Glossaire	303
Résumé	311
Summary	317
Resumen	323