L'Himalaya central, essai d'analyse écologique

Georges Bertrand, Olivier Dollfus

► To cite this version:

Georges Bertrand, Olivier Dollfus. L'Himalaya central, essai d'analyse écologique. Espace Géographique, 1973, 3, pp.224-232. 10.3406/spgeo.1973.1404 . hal-02570091

HAL Id: hal-02570091

<https://hal.science/hal-02570091>

Submitted on 12 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'Himalaya central, essai d'analyse écologique

Georges Bertrand, Olivier Dollfus

Résumé

L'étude de l'Himalaya central met en évidence la hiérarchie des grands mécanismes écologiques qui contrôlent l'organisation et l'évolution actuelles de cette montagne, qui correspond au plus fort gradient écologique du monde. La puissance orogénique se combine avec l'existence d'une façade climatique particulièrement active pour déterminer un énorme potentiel énergétique. Le compartimentage morphostructural et les systèmes de pente, souvent instables, multiplient les « effets » écologiques. Il en résulte une mosaïque de paysages fine, contrastée et mouvante dont chaque unité homogène peut être définie en fonction de sa structure et de sa dynamique.

Abstract

Central Himalaya, an ecological analysis. — The study of the central Himalayas demonstrates the hierarchy of important ecological mechanisms controlling the present organization and evolution of these mountains, which represent the highest ecological gradient in the world. Their orogenic grandure combines with the existence of a particularly active climatic façade to form an enormous reserve of potential energy. The morphostructural divisions and slope systems, which are often unstable, multiply the ecological "effects". From these result a landscape mosaic of contrast and mouvement whose homogeneity can be defined according to structure and development.

Citer ce document / Cite this document :

Bertrand Georges, Dollfus Olivier. L'Himalaya central, essai d'analyse écologique. In: Espace géographique, tome 2, n°3, 1973. pp. 224-232;

doi : <https://doi.org/10.3406/spgeo.1973.1404>

https://www.persee.fr/doc/spgeo_0046-2497_1973_num_2_3_1404

Fichier pdf généré le 02/04/2018

L'HIMALAYA CENTRAL. ESSAI D'ANALYSE ÉCOLOGIQUE

Georges BERTRAND

CIMA-ERA 427 (C.N.R.S.)
Université de Toulouse - Le Mirail

Olivier DOLLFUS

Laboratoire de Géographie physique
Université de Paris-VII

RESUME. L'étude de l'Himalaya central met en évidence la hiérarchie des grands mécanismes écologiques qui contrôlent l'organisation et l'évolution actuelles de cette montagne, qui correspond au plus fort gradient écologique du monde. La puissance orogénique se combine avec l'existence d'une façade climatique particulièrement active pour déterminer un énorme potentiel énergétique. Le compartimentage morphostructural et les systèmes de pente, souvent instables, multiplient les « effets » écologiques. Il en résulte une mosaïque de paysages fine, contrastée et mouvante dont chaque unité homogène peut être définie en fonction de sa structure et de sa dynamique.

ABSTRACT. *Central Himalaya, an ecological analysis.* — The study of the central Himalayas demonstrates the hierarchy of important ecological mechanisms controlling the present organization and evolution of these mountains, which represent the highest ecological gradient in the world. Their orogenic grandeur combines with the existence of a particularly active climatic façade to form an enormous reserve of potential energy. The morphostructural divisions and slope systems, which are often unstable, multiply the ecological "effects". From these result a landscape mosaic of contrast and movement whose homogeneity can be defined according to structure and development.

L'analyse de l'Himalaya central teste la méthode d'analyse écologique que nous avons exposée (1) et affine un certain nombre de concepts. Toutefois, son caractère fondamentalement monographique ne permet pas d'appliquer strictement l'idée de modèle spatial. L'étude himalayenne doit être considérée comme une phase transitoire d'une méthode encore incomplètement élaborée.

I. LES GRANDS FACTEURS DE L'ORGANISATION DE L'ESPACE HIMALAYEN

1. Le dispositif morphostructural et le système des pentes.

L'Himalaya se présente à petite échelle comme une immense façade inclinée vers le sud, adossée au plateau tibétain qui est le plus fort volume montagneux du monde. La cordillère décrit un arc très ouvert de 2 400 km, de l'WNW à l'ESE, entre les 25° et 36° de latitude N (2).

La formation de l'immense bourrelet himalayen, au sud du Thibet, s'explique par le chevauchement, en plein continent asiatique, de la plaque d'Eurasie sur la plaque indienne, ce qui entraîne une contraction différentielle qui serait de l'ordre de 3,5 cm par an (d'après le géologue Le Pichon). La superposition, toujours dynamique, des deux plaques pivotant l'une sur l'autre, provoque la plus grande intumescence terrestre. Plusieurs plans structuraux, marqués par des chevauchements parfois considérables, signalent les sutures et les recouvrements, ainsi que les étapes de construction de la chaîne; actuellement, ils sont inégalement actifs.

(1) Georges BERTRAND et Olivier DOLLFUS, Essai d'analyse écologique de l'espace montagnard. *L'Espace géographique*, n° 3, 1973, p. 165-170. Cette étude a été réalisée à la suite de deux missions au Népal (1972-1973) dans le cadre du programme de recherche de la R.C.P. Himalaya n° 253 (C.N.R.S.). Elle fait suite à un article paru dans le *Bulletin de l'Association des Géographes français*: « Les paysages du Népal central et leur organisation ». Paris, 1973, n° 404-405, pp. 382-399. Elle utilise un certain nombre d'observations, tout particulièrement dans le domaine de la pédologie, de J. HUBSCHMAN, qui a participé à la mission 1973.

(2) Nous renvoyons une fois pour toutes à J.F. DOBREMEZ, *Mise au point d'une méthode cartographique d'étude des montagnes tropicales. Le Népal, écologie et phytogéographie* (Thèse d'Etat). Grenoble, 1972, 373 pages, bibliographie.

Au nord, au Tibet, un accident au pied du Transhimalaya, qui guide le haut Indus et le Tsang Po, et que jalonnent des ophiolites, signale la disparition de la *Tethys* par la collision du bloc asiatique et du bloc indien. L'un des « plans de Benioff » de l'Himalaya se trouve ici plongeant vers le nord : des séismes profonds signalent son existence. Au centre de la chaîne, la ligne relativement sinueuse de la MCT (*Main Central Thrust* des auteurs de langue anglaise) indique le grand chevauchement de la dalle du Tibet sur les séries du Gondwana. La dalle du Tibet est formée d'une semelle gneissique très épaisse, injectée de granites, surmontées de séries sédimentaires concordantes, de l'Ordovicien au Crétacé. C'est dans la « dalle du Tibet » que sont modelés les hauts massifs. Ce chevauchement central est actuellement peu dynamique; des sources chaudes signalent le croisement de la MCT avec des fractures transverses. Au sud, la *Main Boundary Thrust* (MBT) marque la limite de l'arc himalayen : les séries précambriennes et paléozoïques qui affleurent dans le Mahabharat chevauchent les molasses mio-pliocènes des Siwaliks. A ces lignes, continues sur plusieurs milliers de kilomètres, qui signalent l'affleurement des plans de chevauchement, il faut ajouter les failles et flexures, disposées à l'inverse des plans précédents, qui marquent le flanc nord du Mahabharat, ainsi que tous les accidents transversaux qui jouent un rôle important dans la surrection et l'individualisation des hauts massifs, et dans la mise en place du réseau hydrographique.

C'est cette disposition géotectonique en *grands compartiments* qui explique l'organisation de l'espace dans l'ensemble de l'Himalaya central, caractérisée par la succession, du sud au nord, de grandes régions naturelles, arquées et parallèles entre elles :

— *Les collines des Siwaliks* (Churia Hills) entre 300 et 1 200 m, où les séries molassiques néogènes, plissées et basculées, dominent le glaciais alluvial du Terai. Grandes de quinze à trente kilomètres, elles sont constituées de crêtes dans des conglomérats, de longs bassins longitudinaux — les *duns* — retouchés en glaciais, et de chaînons rigides dans des grès.

— *Le Mahabharat* est une moyenne montagne en surrection. Les crêtes, entre 2 000 et 3 000 m, sont modelées dans des séries redressées et variées : schistes, quartzites, grès, calcaires, mais également gneiss et granites. Les pentes très fortes, la succession des vallées étroites et des chaînons minces, en font une montagne difficile à franchir. Les grandes vallées qui la traversent empruntent des ensembles structuraux, mais elles ont toutes des tronçons en gorges.

— *Le sillon, entre le Mahabharat et le Moyen Pays*, que drainent la Kali Gandaki, la Trisuli et la Sun Kosi.

— *Le Moyen Pays* offre des aspects différents de part et d'autre du bassin suspendu de Kathmandu. A l'ouest, de la Trisuli à la Kali Gandaki, c'est une région déprimée entre les Hauts Pays et le Mahabharat. Le socle, surtout schisteux, est cassé superficiellement en blocs de quelques kilomètres de longueur. Ces derniers constituent une mosaïque où les

vallées et les bassins l'emportent sur les volumes montagneux dont les sommets ne dépassent guère 1 500 m. A l'est de Kathmandu, le dispositif comprend de lourdes croupes s'élevant progressivement de 2 000 à 2 800 m, séparées par des vallées méridiennes ou obliques, aux longs versants, coupés de quelques secteurs en gorges.

— *Le Haut Pays* se présente, à moyenne échelle, comme un grand escalier s'abaissant en quelques dizaines de km du N au S, de 5 500 m à 3 000 m, découpé en « serres » par des vallées profondes, généralement méridiennes. Il se caractérise par le développement de grands versants de plusieurs milliers de mètres de commandement. A noter qu'au sud des Annapurna, cet escalier se redresse en une vingtaine de kilomètres, parfois même moins, tandis qu'au sud des massifs de l'Everest, la pente d'ensemble est moins forte et plus longue (de 40 à 50 km).

— *Les grands massifs* individualisés de la haute chaîne ont des sommets entre 6 500 et 8 880 m; les uns se présentent comme des barres modelées en pyramide ou en toit de tente, dominant de vastes amphithéâtres glaciaires; les autres ont des crêtes étroites entre des parois subverticales. Dans le massif des Annapurna, les grands cirques glaciaires passent immédiatement en aval à des gorges au profil longitudinal tendu, tandis que, dans le secteur de l'Everest, ils débouchent sur de longues vallées (20 à 25 km), au profil régulier, doux, entre 5 000 et 3 800 m, aux flancs tapissés de moraines.

Ce dispositif morphostructural donne *le plus fort gradient topographique du monde*. Cette dénivellation de plus de 8 000 m, sur 100 à 150 km de distance horizontale, se matérialise dans le centre de l'Himalaya par des profils assez différents. Alors qu'au sud de l'Everest-Sagarmatha il est assez progressif, dans le centre-ouest il est plus différencié : le Mahabharat est ici plus élevé que le Moyen Pays, et le passage de ce dernier à la Haute Chaîne se fait par un front extrêmement vigoureux (6 000 m), sur une trentaine de kilomètres au sud des Annapurna.

2. Les flux atmosphériques et les effets de façade.

Il s'agit d'une montagne dont l'un des traits essentiels est la subtropicalité de caractère continental. Partout les écarts entre les moyennes mensuelles du mois le plus chaud et du mois le plus froid dépassent 10 °C, et atteignent localement 15 °C.

Le climat est commandé par trois types de flux : le flux majeur de mousson, responsable des grands abats d'eau concentrés sur quatre mois; un flux atténué d'ouest, et des vents locaux, essentiellement méridiens. Les mécanismes climatiques sont régis en été par l'arrivée de la masse d'air allogène, chaude et humide qui vient heurter la façade montagneuse. Elle contribue à égaliser les températures et à écraser les gradients thermiques. L'Himalaya central appartient ainsi saisonnièrement au domaine tropical. L'effet d'ascendance orographique joue à plein sur les fronts montagneux du Mahabharat et des Hauts

TABLEAU 1. « Modèle » écologique de l'Himalaya central.

Pays. Le *jet stream*, alors atténué contribue peut-être à bloquer, à la hauteur des plus hauts sommets, l'ascendance de la mousson (s'agit-il d'un effet de couvercle au niveau de la tropopause ?). En saison froide, les vents dominants sont d'ouest et ils apportent quelques précipitations cycloniques, aux effets plus marqués sur l'ouest de la chaîne que sur l'est. Elles tombent sous forme de neige au-dessus de 2 500-3 000 m et affectent surtout les Hauts Pays. Le *jet stream* soufflant d'ouest fait « fumer » les crêtes au-dessus de 8 000 m. Au printemps, des orages éclatent dans les bassins et partout où l'ascendance est particulièrement forte (pentes du Haut Pays).

Ces mécanismes déterminent une distribution des phénomènes climatiques, en particulier des discontinuités, que l'on peut classer de la façon suivante :

- a. *Un effet principal de façade de mousson à fort dynamisme.*

Ces mécanismes se produisent dans la masse d'air humide et chaude en cours d'advection et d'ascendan-

ce. Ce phénomène de *front montagnard* comprend l'effet de paroi entraînant la condensation, c'est-à-dire la nébulosité et les précipitations, notamment entre 2 000 et 4 000 m, et les fortes chutes d'eau au pied de la montagne. On a ainsi, dans l'Himalaya central, deux fronts majeurs :

- le *front montagnard inférieur* du Mahabharat - Churia Hills qui englobe une frange s'étendant de la lisière du Terai aux crêtes du Mahabharat;
- le *front montagnard supérieur* du Haut Pays, qui s'étale des bassins situés immédiatement au pied des grands reliefs, comme celui de Pokhara à la base de la Haute Chaîne. Ce front s'atténue vers le haut par suite de la diminution de l'humidité atmosphérique et peut-être de l'effet de couvercle de la tropopause, et, vers le nord, par freinage sur les reliefs. La mousson s'avance donc en biseau sur l'Himalaya, les précipitations diminuant au-dessus de 4 000 m et dans le secteur interne (grandes vallées de l'Everest).

L'action de la mousson est régionalement amortie

par le défilement de certains massifs se disposant NW-SE, donc en oblique par rapport au flux principal du SE, et par suite de l'éloignement des sources d'humidité. Le nord-ouest de l'Himalaya est, pour cette double raison, plus sec que le centre et l'est de la chaîne. On a ainsi, outre les gradients orographiques de « front », un gradient régional caractérisé par la diminution des précipitations d'été dans le nord-ouest.

A ce flux de mousson sont liés les effets d'abri qui intéressent les vallées longitudinales (sillon déprimé au nord du Mahabharat), les vallées internes des Hauts Pays et des grands massifs, ainsi que le vaste ensemble de plateaux, montagnes et vallées au nord de la Haute Chaîne, qui appartient au domaine tibétain.

b. Un effet atténué de façade par rapport aux flux d'ouest et de nord-ouest.

Il ne joue qu'en hiver et qu'au printemps, et s'amortit vers l'ESE. Ces flux apportent de brèves précipitations neigeuses qui, dans l'ouest, atteignent tous les massifs du Mahabharat à la Haute Chaîne, tandis que, dans l'est, seuls les Hauts Pays et la base des massifs sont touchés. On a ainsi un gradient secondaire, inverse de celui de la mousson.

c. Les vents locaux.

Ils exercent des effets écologiques importants, principalement dans les grandes vallées méridiennes, pendant l'hiver et le printemps. Les gradients thermiques et de pressions, joints à la canalisation topographique, déterminent de puissants courants d'air alternés. En hiver, les coulées froides peuvent atteindre les basses vallées. Elles sont alimentées par l'air issu des versants enneigés et des grands amphithéâtres glaciaires, et peuvent localement être soutenues par les nappes d'air glacé de l'anticyclone pelliculaire qui couvre alors le Tibet (vallées de la Kali Gandaki et de l'Arun). Elles n'exercent pas d'effet mécanique. Par contre, les vents de vallées, puissants surtout au printemps lorsque le réchauffement diurne des versants est rapide, ont des effets mécaniques (anémomorphoses et effets de crêtes). Pendant la mousson, les masses d'air sont plus stables et les gradients thermiques atténués, les mouvements de l'air sont lents et les contrastes topoclimatiques sont affaiblis, notamment dans la tranche comprise entre 2 000 et 4 000 m, qui est constamment ennuagée. Les effets de dominance sont alors amortis.

3. Les effets topoclimatiques.

Les pentes raides favorisent les contrastes instantanés et la multiplication des facettes topoclimatiques. Les contrastes d'exposition dans cette montagne subtropicale sont surtout marqués entre les pentes SE et NW. L'exposition joue principalement pendant la saison sèche et froide, du fait du bon ensoleillement

et de la forte incidence des rayons solaires. Elle intervient surtout le matin et sur les versants de plus de 20° en exposition SE.

Les vents locaux renforcent les contrastes d'exposition et interviennent notamment dans la fusion du manteau neigeux. L'exposition peut introduire un effet écologique contradictoire avec les phénomènes de façade de mousson au-dessous de 2 500 m dans le Mahabharat et les Siwaliks, mais il s'atténue et même disparaît sur le front du Haut Pays, où la nébulosité printanière est beaucoup plus forte. Il s'y ajoute aussi l'effet de sécheresse des fortes pentes; ainsi, le flanc sud du Mahabharat, bien que très arrosé pendant la mousson (2 500 à 3 000 mm), est sec d'octobre à juin : d'où les pinèdes xérophiles à *Pinus roxburghii*.

4. Les effets de dominance.

Pour comprendre la disposition d'ensemble des milieux himalayens, il est nécessaire de faire intervenir les effets de dominance, qui sont l'un des éléments les plus spécifiques de la dynamique montagnarde. La dominance s'exerce dans différents domaines et perturbe les gradients écologiques. Liée aux effets de gravité, elle est d'autant plus importante que les milieux himalayens étagés couvrent des surfaces réduites.

Parmi les effets les plus courants, on peut mentionner l'organisation des catenas, qui jouent à l'échelle des versants élémentaires. Par suite du développement des pentes raides, qui peuvent atteindre 3 000 m de commandement, l'organisation des catenas préside à la disposition des géofaciès. Les phénomènes de catena se regroupent en deux grands types, liés à la gravité et à la circulation de l'eau : d'une part les effets mécaniques, continus (reptation) ou discontinus (glissements, éboulements), de l'autre des phénomènes géochimiques (par exemple la migration oblique des ions) ou biologiques (pluie pollinique et aspersion de semences). S'y ajoutent, dans cette montagne humanisée jusqu'à 5 000 m, les actions agricoles et pastorales : remodelage épidermique des versants par des terrassettes irriguées ou non, qui modifie le débit colluvial et hydrique sur la pente; transformation du tapis végétal (dégradation et destruction des forêts, extension des pâturages et surpécoration). Sur les versants défrichés et mis en culture les effets topoclimatiques, déjà mentionnés, s'accroissent.

Tous les phénomènes géomorphologiques de versants (avalanches sur les parois nivoglaciaires, glissements et éboulements, torrencialité) sont à rattacher à la dominance. Ces mouvements de masse aboutissent à la constitution de milieux spécialisés : talus d'éboulis parfois colonisés par les Aunaies, coulées de blocs à Erablières, dalles suintantes colonisées par des Bambousaies.

La dominance climatique, qui joue notamment par la descente des coulées froides, se marque localement par l'écrasement des étages de végétation sur le haut

pays sous-himalayen. Cet écrasement est d'autant plus marqué que le front montagnard est vigoureux : il est ainsi plus fort au sud des Annapurna que sur les Hauts Pays au sud de l'Everest.

A noter également le rôle de la dominance dans le profil, le débit et le creusement des cours d'eau. On peut distinguer les torrents nivoglaciers au débit soutenu, comme la Dudh Kosi, des cours d'eau à régime de mousson. Phénomène hérité mais toujours actif, il explique l'inégal enfoncement des vallées et, partant, l'organisation des versants. Ainsi, la Dudh Kosi, qui naît dans les cirques au pied des plus hauts sommets du monde, coule, dans le Haut Pays, mille mètres en contrebas de la Solu qui est alimentée, à sa tête, par un petit cirque situé dans les premiers massifs et par les versants du Haut Pays sous-himalayen.

La plupart des actions glaciaires, présentes et passées, sont à rattacher aux effets de dominance. Les langues glaciaires, nées dans les grands amphithéâtres du massif de l'Everest entre 5 500 et 7 000 m, descendent encore jusqu'à 4 500-4 700 m, et les grands amphithéâtres sont, pour une part, alimentés par les chutes de glace et de neige des parois culminantes. Les accumulations morainiques s'observent jusqu'à 3 000 m lorsqu'elles se situent immédiatement en contrebas de massifs de 7 000 m et plus. Elles entraînent la formation de milieux spécifiques.

5. Le rôle des stocks biologiques.

Les paysages himalayens résultent de l'utilisation de ce potentiel écologique par les végétaux et les animaux dont la très grande richesse et la diversité contrastent, par exemple, avec la relative pauvreté des Andes tropicales au sud de l'Equateur, où l'endémisme est important. Ceci s'explique par la situation générale de la masse montagneuse à l'intérieur d'un continent et au contact de plusieurs stocks biologiques différents : tropical indien au sud, subtropical de mousson (chinois) à l'est, méditerranéen semi-aride à l'ouest, haut montagnard froid au nord (Thibet). Par ailleurs, la disposition des ensembles montagneux parallèle et en gradins permet les migrations, les mélanges phytogéographiques, les hybridations.

6. Les gradients et seuils écologiques.

On a déjà signalé l'importance des gradients topographiques et climatiques qui commandent l'organisation des paysages, mais il faut revenir sur un certain nombre de seuils qui commandent la répartition des milieux.

Il y a tout d'abord les gradients saisonniers, par exemple celui de la mousson, avec les effets de front montagnard et d'abri qui président à la répartition du volume des précipitations. Deux limites assez générales jouent alors : celle de 1 800-2 000 m, au-dessus

de laquelle la montagne baigne dans une humidité constante pendant toute la mousson; celle de 5 000-6 000 m, au-dessus de laquelle le flux d'air humide devient très faible. En période de mousson, les gradients thermiques sont atténués par le volant de la masse d'air chaude et humide.

En revanche, au printemps, le gradient s'accroît. Les effets topoclimatiques jouent à plein et les contrastes thermiques sont maximaux entre les fonds de vallées et de bassins surchauffés dans la journée et les hauts versants encore couverts de neige. A noter également que, du fait de la variété des stocks floristiques et du jeu climatique, on se trouve dans l'Himalaya dans une montagne à deux floraisons : l'une printanière, avec les Rhododendrons arborescents et les Primevères; l'autre estivale, en liaison avec le réchauffement et l'humidité de la mousson.

Le gradient biologique général dans l'Himalaya central part du subtropical à longue saison sèche et monte jusqu'à la limite de la vie, qui s'arrête sous l'action cumulée du froid et du sec.

Les principales discontinuités sont les suivantes :

— *La limite supérieure de la vie végétale*; elle est particulièrement élevée dans la région de l'Everest, où elle atteint 5 500 m, sous l'effet de la conjonction d'une humidité modérée et d'un été à mousson atténuée, qui permet le développement de plantes à cycle biologique court, et de l'existence d'un stock floristique adapté aux conditions rigoureuses qui règnent du Thibet à la Mongolie. Cette limite est beaucoup plus basse sur le flanc sud des Annapurna, par suite d'une plus forte humidité, à des altitudes où le gel estival est efficace.

— *La limite supérieure de la forêt et des arbres* est également élevée mais très irrégulière. Elle est commandée par la sécheresse du climat d'altitude. Les formations arborées ouvertes et basses (*Betula*, *Juniperus*, *Rhododendron*) peuvent atteindre 4 200 m et exceptionnellement 4 300 m, tandis que les vraies forêts basses (Bétulaies d'altitude) et les futaies à sous-bois de Rhododendrons montent jusqu'à 4 000 m. Sur les versants humides, les *Abies spectabilis* atteignent 4 000 m et les *Pinus excelsa* montent en formation claire jusqu'à 3 700-3 800 m sur les versants d'adret, dans les vallées au sud de l'Everest. Mais ces limites ne sont ni climatiques ni stables. Elles sont la conséquence d'un double phénomène, apparemment antagoniste. C'est d'abord la remontée historique des arbres sur les versants, liée au réchauffement séculaire qui provoque en particulier la fusion des glaciers; ceci se marque par une bonne régénération de la forêt à sa limite supérieure (nombreuses plantules d'*Abies* et de *Pinus*). L'autre phénomène est commandé par les aménagements pastoraux qui ont étendu la pelouse au dépens de la forêt et favorisé le développement des espèces buissonnantes et rampantes (*Berberis*, *Juniperus*, *Rhododendron*), ce qui entraîne une modification des topoclimats par assèchement de l'air et du sol, empêche la régénération forestière, tandis que le piétinement du bétail dans l'étagère cryonival provoque une recrudescence

de la mésomorphogénèse nivale (petits gradins, arrachements et suffosion).

— *La limite inférieure de la neige « active »* — géomorphologiquement, pédologiquement et biologiquement. Elle se place, dans l'Himalaya central, entre 2 600 et 3 000 m, mais elle est largement commandée par les données de l'exposition et de la circulation atmosphérique locale. Elle peut descendre à 2 600 m en versant d'ombrée et monter à 3 200 sur soulane.

— *La limite de la permanence des brouillards*, lors de la mousson, entre 1 800 et 2 200 m. Elle se note par l'abondance des mousses, des lichens et des épiphytes. Elle correspond souvent également au passage des espèces subtropicales aux espèces tempérées montagnardes. C'est notamment le passage des *Schima* et des *Castanopsis* aux Chênes. En dessous de la limite des brumes, on se trouve dans le domaine chaud subtropical, marqué par des abats d'eau importants, une saison sèche et chaude longue, des températures moyennes généralement supérieures à 18 °C et des effets de gel négligeables.

7. L'eau.

A peu près partout, on est frappé par la coexistence dans une même formation végétale de formes hygrophiles (Usnées) et xérophiles. L'eau est l'élément du milieu le plus mal réparti. C'est là un trait des milieux subtropicaux, accentué par la topographie montagnarde; on peut donc appliquer ici à l'eau la loi du minimum écologique, c'est-à-dire que l'eau devient le facteur écologique limitant qui domine la dynamique du milieu. On a ainsi, dans la plupart des régions naturelles himalayennes, une sécheresse marquée, soit par la longue période sèche subtropicale, soit par le déficit hydrique des hautes altitudes. Seuls les Hauts Pays, qui reçoivent un peu de neige en hiver, des précipitations d'orages au printemps et des abats d'eau de la mousson, font figure de milieux assez fréquemment humides. Ailleurs, la sécheresse contraste avec de gros abats d'eau, limités dans le temps (3 à 4 mois), dont les effets écologiques sont diminués par l'importance du ruissellement sur les pentes raides. En tenant compte de cette remarque très générale, on observe plusieurs types de stockage qui permettent une redistribution de l'eau :

a. *Les stockages profonds*, de type géologique, existent dans le Mahabharat par suite de la verticalité des pendages et de la présence de volumes rocheux broyés et diaclasés qui alimentent pendant la saison sèche de fortes émergences. Ainsi, malgré la raideur des pentes, une partie des importantes chutes d'eau de la mousson s'infiltre dans les volumes rocheux et est redistribué pendant la longue saison sèche, notamment sur le flanc nord de la chaîne. Cependant, ces sources qui contribuent à l'alimentation des rivières ne jouent aucun rôle dans la pédogénèse et dans la vie végétale. Ce stockage semble plus important dans l'est que dans l'ouest.

b. *Les stocks phréatiques* n'existent sous forme

d'*underflows* que dans les lits de mousson du Terai et des plaines alluviales des Siwaliks (*Duns*).

c. *Le stockage hypodermique* dans les manteaux d'altération contribue à la pédogénèse et explique les formes de glissement. Il est caractéristique du Moyen Pays, notamment dans les altérites développées à partir des schistes de Kunchha (centre ouest), mais ne dure pas en saison sèche. Il est cependant plus soutenu en ombrée qu'en soulane, ce qui contribue à accroître les effets de dissymétrie, notamment en ce qui concerne le tapis végétal.

d. *Le stockage sous forme nivale* joue essentiellement au-dessus de 2 800 m; il est temporaire et également plus marqué en ombrée qu'en soulane; ainsi s'expliquent certaines dissymétries dans le modelé, le tapis végétal et l'utilisation humaine des versants des Hauts Pays.

e. *Le stockage nival se transformant en glace* n'affecte que la très haute montagne; il se libère sur les marges glaciaires lors du réchauffement de la mousson.

8. Les manteaux d'altération et la pédogénèse.

On est frappé par l'épaisseur des manteaux d'altération, même sur les pentes raides et jusqu'à la limite des remblaiements morainiques. Ils se distinguent à la fois par le faible taux d'argile et leur ténacité. On distingue deux types d'altération : d'une part, des altérations souvent rubéfiées en dessous de 1 800-2 000 m; de l'autre, au-dessus de ce niveau, des formations beiges ou crème, sablo-limoneuses. Aucune de ces formations ne peut être assimilée à des sols ferrugineux tropicaux. En revanche, l'importance de la masse d'altérite produite à partir de roches dures sous des climats non tropicaux (gneiss, quartzites et phyllades) constitue indéniablement un effet du climat subtropical de mousson.

L'arrivée de la masse d'air humide de la mousson s'accompagnant de pluies chaudes, au-dessous de 1 800 m, de brouillards tièdes et de pluies constantes au-dessus de cette altitude, qui succèdent à partir de 2 800 m à l'alternance de fusions de minces manteaux neigeux et de gels superficiels en hiver et au printemps, se traduit par l'hydrolyse intense des minerais primaires alumino-silicatés, et aboutissant à une forte production de matériaux fins, jusqu'à 4 500 m; et, en dessous de 1 800-2 000 m, par une libération du fer et sa redistribution sous forme d'oxydes et d'hydroxydes dans la masse d'altérites.

Les modalités de l'altération sont réglées par un certain nombre de facteurs agissant séparément ou en combinaison. La pente est l'un des plus importants. La genèse des altérites rubéfiées du Moyen Pays est souvent tributaire de l'adoucissement des pentes, ce qui contribue à créer sur les versants une mosaïque d'altérites : replats à altérites rubéfiées, altérites brunes des terrasses de culture, sols plus clairs des pentes moyennes, régolithes sur les pentes fortes. Interviennent également l'âge du matériel parental (lithosols des lits de mousson) ainsi que la nature du

matériel rocheux. A cet égard, il convient de noter que les séries rocheuses (gneiss, quartzites, schistes inégalement métamorphiques) fournissent des manteaux de désagrégation et d'altération assez proches les uns des autres, qui sont à la fois fins, percolants et tenaces.

Ces altérations, surtout à partir de 1 800–2 000 m, là où apparaissent les premières biomasses de caractère tempéré (Chênaies) sont exploitées par la pédogénèse superficielle selon des modalités qui varient avec l'altitude, l'exposition, la pente, le couvert végétal. On distingue plusieurs types : les sols bruns holoïgrophes sous Résineux entre 2 400 et 3 500 m ; les sols bruns de pelouses, qui sont pour la plupart d'anciens sols forestiers, entre 2 800 et 3 200 m ; des « nivosols », entre 3 000 et 4 500 m, liés à des phénomènes de redistribution et d'accumulation du fer en liaison avec l'existence du manteau neigeux et de la cryoturbation. Il s'y ajoute l'humidité tiède de la mousson, d'où la formation de rankers podzoliques, localement de podzols ferrugineux et de sols à hydro-moders.

Ces sols sont modifiés par le déboisement, les façons agricoles, le pâturage, d'où l'accentuation des effets topoclimatiques et des transformations dans le débit colluvial et la circulation de l'eau sur le versant.

II. LES GRANDS TRAITS DE LA DYNAMIQUE DES PAYSAGES HIMALAYENS.

L'instabilité de la mosaïque des paysages himalayens est le fait de dynamismes jouant à plusieurs échelles spatiales et temporelles et s'exerçant dans des domaines de nature différente, mais génétiquement liés entre eux.

1. Une montagne en pleine orogénèse ?

La plupart des géologues s'accordent sur le fait que l'Himalaya, ou du moins certains compartiments qui le constituent, sont en pleine orogénèse ; ce serait le cas pour les Grands Massifs, les Hauts Pays et le Mahabharat. Ainsi, dans la vallée de la Kali Gandaki, on a pu montrer qu'entre Tukucha et Beni des formations torrentielles et alluviales « anciennes », consolidées en conglomérats calcaires, avaient été déformées selon un arc à moyen rayon de courbure par le soulèvement du Haut Pays et l'affaissement médian du Moyen Pays. Mais les conglomérats restent à dater et leur cartographie devrait être faite. Dans le Mahabharat, au sud de Kathmandu et sur le front montagnard dominant la Bagmati, des formes du relief sembleraient indiquer une surrection récente, sinon actuelle de la chaîne, avec un jeu de blocs faillés étroits. Cependant, dans le Moyen Pays à l'est de Katmandu, on ne retrouve pas la tectonique épider-

mique entraînant un jeu de blocs et de bassins qui caractérise le secteur à l'ouest de la capitale. On voit mal, dans la région de l'Everest, les arguments géomorphologiques sur lesquels T. Hagen s'appuie pour montrer que la surrection des Hauts Massifs a affecté d'abord ceux du sud avant de toucher les montagnes qui dépassent actuellement 8 000 m. Il semble que l'on ait un soulèvement général à moyen rayon de courbure de l'ensemble de la dalle du Thibet. L'étude précise de la néotectonique himalayenne reste à faire et les quelques indices que l'on possède sont discontinus et parfois contradictoires. Il n'en reste pas moins que la mise en place des grands volumes montagneux est ici, comme dans la plupart des autres chaînes, le fait de la fin du Tertiaire, et qu'elle s'est très probablement poursuivie au Quaternaire, avec des affaissements régionaux (Moyen Pays à l'ouest de Kathmandu). Mais, souvent, des démonstrations uniquement morphogénétiques permettent d'expliquer certains ensembles de relief sans faire appel à une tectonique très récente, pour laquelle les preuves font défaut sur le terrain : ainsi pour expliquer la cuvette perchée de Kathmandu, ou encore la différence de creusement entre deux vallées voisines, comme la Dudh Kosi et la Solu.

2. La dynamique actuelle des paysages.

La dynamique « actuelle », c'est l'évolution des paysages à l'échelle humaine ; l'unité de temps en est le siècle, voire la décennie. Elle s'inscrit dans le mouvement à plus grande longueur d'onde du Quaternaire, tout en conservant sa spécificité, liée essentiellement à l'intervention anthropique. Les évolutions des versants himalayens sont diverses et, au moins en apparence, contradictoires. Si certaines peuvent paraître relativement lentes (à l'échelle de temps considérée), comme les reconquêtes végétales, les glissements de terrain, d'autres sont plus rapides (défrichement, érosion torrentielle), d'autres enfin sont foudroyantes (arrachements, éboulements). Toutefois, il existe, souvent à proximité immédiate des secteurs instables, de vastes pans de versants apparemment stables (sapinières, pentes aménagées en terrassettes de culture).

D'une façon générale, les paysages de l'Himalaya central se caractérisent par une *instabilité* qu'on ne retrouve pas au même degré dans les montagnes tempérées. Dans certains cas, on peut parler de *mutations et d'élaboration de nouvelles structures écologiques*. Le complexe d'évolution varie dans le temps et dans l'espace. Encore faudrait-il pouvoir aller au-delà des apparences. L'absence de données suivies sur les périodes froides au Quaternaire, ainsi que sur la période historique, interdit pour l'instant toute tentative de reconstitution chronologique. De plus, comme il n'est généralement pas possible de déterminer l'échelle temporelle des phénomènes observés (glissements, fronts pionniers végétaux), la portée des interprétations en est amoindrie. On peut seulement dégager un certain nombre de tendances.

On observe une combinaison entre des déséquilibres d'origine anthropique, comme dans la plupart des milieux de montagne. Mais, dans le cas de l'Himalaya, les milieux naturels n'ont, semble-t-il, jamais connu de périodes de stabilité, du fait de l'orogénèse et des fluctuations climatiques récentes. On ne peut donc pas raisonner en fonction de situations climatiques antérieures, et juger l'évolution des paysages par rapport à un point fixe, qui serait le climax. Enfin, ces évolutions naturelles s'exercent à des échelles spatiales bien supérieures à l'échelle humaine, et elles libèrent des flux énergétiques sans commune mesure avec ceux qui sont déclenchés par la mise en valeur humaine, pourtant très vigoureuse dans ses manifestations.

La dynamique des paysages himalayens ne peut être uniquement considérée à travers le modèle de la théorie de la bio-rhexistasie de H. Erhart. En effet, il faut tenir compte de la *multiplication des déséquilibres instantanés*, c'est-à-dire des « catastrophes naturelles », et on doit se demander quelle peut être la part de ces crises limitées dans le temps (problème du catastrophisme) sur l'évolution d'ensemble des paysages (glissements, éboulements, avalanches, etc...).

3. Les éléments du système d'évolution.

a. *Modélés et géomorphogénèses.* — Les volumes himalayens sont vigoureusement attaqués par des systèmes morphogénétiques très actifs, par suite de la raideur des pentes et de la concentration des précipitations estivales. Les principaux processus qui agissent sur le versant sont : les différentes formes du ruissellement, en *rills* dans les entonnoirs d'amont, aréolaires sous forêt ou sur les pentes cultivées, où il est cependant brisé ou canalisé par les aménagements agricoles; les mouvements de masse compliqués d'arrachements; et, dans les talwegs, soit l'incision linéaire par les torrents qui s'encaissent dans la roche en place, soit le balayage latéral des écoulements temporaires dans les lits de mousson.

Mais les formes de versants sont aussi liées à la structure, et l'on peut faire la distinction entre les crêtes rigides des Siwaliks, les chaînons raides et décharnés du Mahabharat dans des séries subverticales et les versants plus mous du Moyen Pays modélés dans des argilites ou des schistes souvent faiblement inclinés.

On note plusieurs familles de formes : 1) les longs versants du Moyen Pays au manteau d'altération, épais et inégal, marqués par des glissements et des replats retouchés en surface par les aménagements agricoles; 2) les versants à torrencialité du Mahabharat; 3) les modélés cryonivaux de la montagne entre 2 800-4 000 m, où se conjuguent les effets des pluies estivales tièdes, sur une couverture végétale dense ou des cultures, et ceux de la neige hivernale et printanière; dans cette montagne, où les croupes ont été souvent déboisées pour les besoins des activités pastorales, les principales formes sont des dorsales

sommitales rocheuses, des cuvettes de suffosion passant à des versants à glissements ou à éboulements, avec souvent des pentes inférieures en gorge; 4) les modélés glaciaires hérités : ombilics et bouts d'auge au-dessus de 4 400 m, feutrage des moraines jusqu'à 3 000 m et parfois moins, avec une évolution commandée par la dynamique nivopastorale; 5) les parois rocheuses ou revêtues de plaques de glace, de 5 000 à 8 800 m, passant à des amphithéâtres occupés par des glaciers en décrue.

La géomorphogénèse constitue donc l'un des mécanismes fondamentaux de la combinaison écologique. La plupart des substrats ont été, sont ou seront mobiles. Il y a là un facteur limitant et un correctif écologique essentiels sur le plan de l'évolution des ensembles biogéographiques et de la mise en valeur humaine.

b. *L'expansion biologique et les fronts pionniers.* — A l'échelle du temps quaternaire, il s'agit d'une conquête, ou peut-être partiellement d'une reconquête, des secteurs où la vie était exclue par le froid (haute montagne) ou l'instabilité des substrats (lits de mousson et zones d'épandage, glissements et arrachements de versant). On assiste donc actuellement, et d'une façon très apparente, à une expansion naturelle (climatique) des formations biologiques. La colonisation végétale des hauts versants du Haut Pays et des hautes vallées de la Grande chaîne en est l'aspect le plus vigoureusement inscrit dans les paysages. Les Rhodoraies arbustives ou arborescentes servent de pionniers à la Juniperaie claire, à la Bétulaie puis à la Sapinière ou même à la Pinède. La germination et le développement des plantules forestières sur la *timber-line* traduisent cette poussée, qui se matérialise aussi dans la mosaïque des paysages par l'exploitation des facettes écologiques les moins défavorisées (par exemple, vers 4 000 m, les géofaciès forestiers des ombrées bien alimentées en eau, abritées des vents, aux sols épais). Toutefois, cette expansion ne se manifeste pas partout avec autant de netteté. Elle ne constitue un « front pionnier » au sens strict qu'entre 3 500 et 5 500 m. Entre 2 500 et 3 500 m, elle apparaît surtout comme une concurrence entre les essences et les formations forestières; la Pinède à *Pinus excelsa* à forte régénération repousse vers le haut la Sapinière à *Abies spectabilis* et arrive localement à constituer la limite supérieure de la forêt (Namche Bazar). Par contre, au-dessous de 1 800 m, il semble que la végétation subtropicale soit naturellement stabilisée sur place, ce qui n'exclut pas pour autant les concurrences internes. Les oscillations climatiques du Quaternaire paraissent y avoir été très amorties. Ici, les défrichements agricoles l'emportent sur les fluctuations naturelles.

c. *L'emprise humaine.* — La mise en place des sociétés humaines et des systèmes agricoles et pastoraux est encore insuffisamment connue pour que l'on puisse en tirer des enseignements sur la dynamique des milieux. Cependant, on doit souligner le caractère récent de l'emprise rurale : l'édification des terras-

settes sur les versants entre 1 500 et 2 500 m daterait des deux derniers siècles et se serait substituée à une culture sur brûlis, l'aménagement des vallées du massif de l'Everest (Khumbu) par les Sherpas aurait progressé avec l'introduction de la pomme de terre au milieu du XIX^e siècle. La mise en valeur des pentes du Mahabharat paraît encore plus récente. Actuellement, le fait dominant est l'expansion démographique générale et le défrichement massif et sauvage, c'est-à-dire une pression humaine de plus en plus forte sur les milieux. Le Moyen Pays est entièrement mis en valeur et ses pentes sont maîtrisées par les agriculteurs. Le Terai et les Siwaliks, ouverts à la colonisation agricole par l'éradication de la malaria, sont devenus des fronts pionniers agricoles où la forêt subtropicale à Shorea est en voie de destruction.

4. Essai de classification des systèmes d'évolution.

Par « système d'évolution », on entend l'ensemble des formes d'énergie (matérialisées par des agents et des processus) qui, en réagissant les uns sur les autres, déterminent l'évolution d'une unité de paysage (géomorphogénèse, exploitation biologique, mise en valeur anthropique) (3). On a ébauché une classification sommaire et provisoire qui couvre la plus grande partie des milieux himalayens.

a. Les systèmes d'évolution naturels à dominante géomorphogénétique et pratiquement abiotiques :

1. Le système glacio-nival de la Haute Chaîne (6 000-8 000 m), à bilan négatif, hérité du Quaternaire (type Cho Oyu).
2. Le système cryo-nival des massifs récemment déglacés de la Haute Chaîne et du Haut Pays (type Gosainkund).

3. Le système tectonico-torrentiel des compartiments soulevés du Haut Pays et du Mahabharat (les processus dominants sont, en combinaison avec la torrentialité, les éboulements et les glissements (type Ankhu Khola).

b. Les systèmes d'évolution naturels combinant la géomorphogénèse et la dynamique biologique et anthropique :

1. Le système nivo-pastoral des vallées de la Haute Chaîne et du Haut Pays de 3 700 à 5 500 m (type haute vallée de l'Everest).
2. Le système agro-torrentiel des versants à glissements et à arrachements (type Ankhu Khola).

c. Les systèmes d'évolution biogéomorphogénétique à géomorphogénèse subordonnée :

1. Le système pastoral supraforestier du pays sherpa (hautes vallées du massif de l'Everest entre 4 000 et 5 500 m).
2. Le système sylvo-pastoral (Haut Pays) dominé par les cycles biologiques de la Sapinière ou de la Pinède et les défrichements pastoraux (type Gosainkund).
3. Le système sylvo-pastoral des moyennes montagnes avec Chênaies fourragères surexploitées (type crêtes supérieures du Mahabharat).

d. Les systèmes d'évolution à dominante anthropique :

1. Le système de « front pionnier » agricole des milieux subtropicaux (type Duns des Siwaliks).
2. Le système agricole de la moyenne montagne à grands versants aménagés en terrassettes, avec relative stabilité d'ensemble (type vallée de la Solu).
3. Le système agricole des bassins avec un aménagement intégral de milieux stabilisés par la riziculture (type bassin de Kathmandu).

L'Espace géographique, international review of geography, environment studies and planning, would gratefully accept papers from contributors, of all countries, to be published in french or in english.

Contributors are requested to adjoin a short abstract.

Adresse de la rédaction : *L'Espace géographique*, Faculté des Lettres, 57, rue Pierre-Taittinger, 51084 REIMS-CEDEX (France).