Effets géomorphologiques des activités humaines dans les milieux supraforestiers des Pyrénées espagnoles

par José M. GARCIA-RUIZ * et Gabriel DEL BARRIO *

La diversité géomorphologique des Pyrénées s'explique, comme dans la plupart des régions montagneuses, par l'étagement climatique et végétal, par l'hétérogénéité lithologique, par les héritages et inerties paléoclimatiques et enfin, par la variété des formes d'organisation de l'espace liées à l'intervention humaine. Les conséquences de l'activité humaine sont plus sensibles en particulier entre 800 et 1 200 m, sur des versants très pentus et ensoleillés où l'on pratiquait une agriculture céréalière. Dans ce milieu, alternent les champs abandonnés, les repeuplements forestiers et une garrigue subméditerranéenne très ouverte, sur des terrains érodés et pierreux. Il faut ajouter qu'au-dessus de 1 700 m, dans les pâturages supraforestiers, la pression anthropique a imposé aux paysages d'importants changements pour augmenter les possibilités d'alimenter le bétail. De tels changements ont entraîné une altération du fonctionnement hydrologique et géomorphologique des versants même si de tels effets sont moins apparents que sur les pentes les plus basses.

Les milieux supra-forestiers présentent dans toutes les montagnes de la zone tempérée un grand intérêt géo-écologique. Ils y sont très étendus et ont constitué la base de développement pour des systèmes complexes d'élevage du bétail. Il s'agit, d'autre part, d'un milieu dans lequel le gel comme la neige jouent un rôle morphoclimatique non

(*) Instituto pirenaico de ecologia, B.P. 64, 22700 JACA, Huesca.

négligeable et où les températures obligent à des adaptations biogéographiques très spéciales. Une partie de cet espace est restée pratiquement à l'écart des manipulations humaines tandis que le reste a subi des pressions importantes. Actuellement, même si l'élevage du bétail a été réduit, il subsiste tant dans le paysage que dans la dynamique des traces des activités passées. De plus les Pyrénées espagnoles se trouvent, quant à elles, face au phénomène d'urbanisation qui, malgré un processus de forme sélective, introduit de nouvelles altérations.

1. L'espace supra-forestier pyrénéen

Dans les Pyrénées espagnoles, l'étage supra-forestier est limité à la partie centrale et centre-orientale de la chaîne, où les altitudes les plus élevées dépassent souvent 3 000 m. Vers l'est et vers l'ouest l'altitude diminue progressivement et la forêt atteint les lignes de crête. Il s'agit là d'un secteur de transition entre les influences atlantiques et méditerranéennes (Creus, 1983). Des données non publiées de G. del Barrio montrent qu'à petite échelle, les précipitations diminuent d'ouest en est sur les Pyrénées à raison de 4,4 mm par degré de longitude et qu'en même temps, leur répartition mensuelle change. Dans les vallées les plus occidentales des Pyrénées aragonaises (sources des rivières Aragón et Gállego), les précipitations sont plus abondantes (par exemple, à Canfranc, à 1 260 m on enregistre une moyenne annuelle de 1 566 mm) et leur distribution revêt un caractère océanique : elles sont bien réparties tout au long de l'année, bien qu'on observe une concentration plus grande du volume des pluies en hiver et une légère diminution en été ; les périodes sèches demeurent très brèves (García-Ruiz *et al.*, 1985). A l'est de la vallée du Gállego, les précipitations diminuent : à Barrosa, source de la rivière Cinca située à 1 500 m, on recueille 1 500 mm par an ; à Urdiceto, source de la Cinqueta, à 1 700 m, les précipitations atteignent 1 452 mm/an. En outre, dans ce secteur oriental, les maximums pluviométriques sont d'un type plus équinoxial, les pluies étant plus concentrées en automne qu'au printemps, et avec une saison hivernale sèche alors que l'été peut connaître des pluies abondantes dans sa première moitié, signe d'une tendance au climat continental.

Conséquence des différences de régime des précipitations, l'enneigement varie beaucoup en importance et dans ses caractères d'une vallée à l'autre (tabl. 1). (García-Ruiz *et al.* 1985 ont calculé la position de l'isotherme à 0° C selon les vallées pendant la saison froide novembre-avril). Au-dessus de cette isotherme les précipitations hivernales tombent sous forme de neige dont une grande partie constitue une réserve dans l'attente de la fonte au printemps. Les résultats montrent une élévation de l'isotherme dans le sens ouest-est, de sorte qu'elle est à 1 549 m, 1 635 m, et 1 700 m, dans les vallées de l'Aragon,

du Gállego et de l'Esera respectivement, où elle coïncide étroitement avec l'altitude à laquelle commencent les pâturages supra-forestiers. On peut aussi retrouver cette tendance dans l'altitude des moraines wurmiennes, ce qui confirme l'existence d'un gradient longitudinal. Cependant, compte tenu de l'altitude peu élevée, la fonte commence et se termine rapidement dans les Pyrénées occidentales, alors qu'elle se prolonge jusqu'à la fin juin dans les Pyrénées centrales, comme le montre le débit des principales rivières (García-Ruiz *et al.*, 1986).

TABLEAU 1

CARACTÉRISTIQUES DE L'ACCUMULATION ET DE LA FONTE NIVALE
DANS QUELQUES BASSINS DES PYRÉNÉES CENTRALES ESPAGNOLES.

Rivière	Station de jaugeage	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Veral	Zuriza	20,4	3,3	4,7	0,33	?	?
Aragón S.	Javierregay	81,8	27,4	6,5	0,86	72	137
Aragón	Jaca	68,6	33,6	14,1	0,56	103	170
Gállego	Bubal	169,4	92,4	23,8	0,71	?	?
Ara	Torla	124,4	72,7	27	0,62	113	199
Cinqueta	Molino de G.	53	24,7	19,3	0,35	120	195
Esera	Villanova	149,9	57,1	15	0,27	112	210

(1) Précipitation sous forme de neige (Hm3) tombée au dessus de l'isotherme 0° C.

(2) Volume de neige retenu (VR).

(3) Coefficient nivale (VR/Précipitation annuelle).

(4) VR/Superficie située à plus de 2000 m d'altitude (Hm3/Km2).

(5) Date moyenne du commencement de la fonte, comptée à partir du 1er janvier.

(6) Date moyenne de la fin de la fonte, comptée à partir du 1er janvier.

Source : García-Ruiz *et al.*(1986)

Une autre question importante du point de vue géomorphologique est le comportement variable de la fonte par rapport à la topographie. Sur les pentes ensoleillées la fonte commence très tôt. Même en plein hiver, après une chute de neige, la fonte rapide qui survient sature le sol et l'expose de cette façon aux contrastes thermiques quotidiens. Par contre, les versants septentrionaux connaissent des conditions plus stables dues à la protection permanente de la couverture estivale pendant la saison froide. On observe un phénomène très semblable sur les versants convexes et concaves ; les premiers subissent des processus de gelée intenses et de brusques changements de température, sans compter qu'ils retiennent n outre beaucoup moins d'humidité. Les seconds abritent de grandes masses de neige et développent aux alentours des conditions microclimatiques très froides et des milieux saturés.

PHOTO. 1

Terrassettes à *Festuca eskia* sur sols érodés dans le flysch d'âge éocène.
Vallée de Lubiene, Pyrénées centrales, juillet 1986.

PHOTO. 2

Glissements et niches d'arrachements sur des versants déboisés à 1 700 m d'altitude.
Sierra Lucar (Aso), vallée du Gállego, juillet 1982.

La plus grande partie de l'étage supra-forestier s'étend sur les matériaux paléozoïques de l'axe central de la chaîne et, dans une moindre mesure, sur les sédiments mésozoïques des Sierras intérieures et sur le flysch. Granites, schistes, ardoises, calcaires de résistance différente, grès, etc., sont les éléments d'une grande diversité lithologique qui est mise en relief dans divers aspects de l'évolution géomorphologique. Les formes périglaciaires dépendent des différents types de roches, et tout spécialement de leur capacité à engendrer des sols de puissance et de texture différentes (Höllermann, 1967, et Brosche, 1978). La distribution spatiale des grands complexes morphodynamiques des Pyrénées orientales a reçu de même une explication d'ordre lithologique (Soutadé, 1980). La lithologie est le facteur principal par lequel on explique la présence ou l'absence de sols profonds fréquents dans les Pyrénées sur des flysch, calcaires marneux et schistes ; ces sols sont clairement absents sur les granites et les calcaires purs. Il s'agit là de sols bien structurés, riches en matière organique, jouissant d'une bonne perméabilité : ils contiennent un taux élevé de sables (40-50 %), leur pH est voisin de 5 et il n'y a aucune trace de carbonates (García-Viñao *et al.*, 1986). Ces sols atteignent fréquemment une puissance de 50 cm et leur influence sur la dynamique des versants est considérable. Leur présence se réduit sensiblement à partir de 2 000 m d'altitude en conséquence de la diminution de la météorisation chimique et biologique.

II. Les activités humaines à l'étage supra-forestier

Sur le versant espagnol des Pyrénées la forêt s'arrête fréquemment vers 1 650-1 850 m d'altitude. Quelques ensembles de *Pinus uncinata* peuvent dépasser un peu 2 000 m et certains exemplaires isolés sont observés à près de 2 300 m sur le massif granitique de Panticosa. En dehors des zones très rocheuses et escarpées, soumises aux chutes de neige et de pierres, les conditions climatiques permettraient le développement de forêts denses jusqu'à 2 100-2 200 m, où elles occuperaient l'étage sub-alpin. A partir de ce niveau, les arbres seraient plus espacés, courts et touffus, avec une faible productivité et formeraient une brève frange de transition correspondant au *krumholz*. Au-dessus, dans l'étage alpin la densité floristique des associations herbacées diffère selon l'altitude, la topographie, la lithologie et la pente.

Les pâturages supraforestiers occupent donc une étendue supérieure à celle qui devrait leur revenir de façon potentielle, ce dont l'explication tient à l'élevage traditionnel basé sur la transhumance. La présence de divers monuments mégalithiques au-delà de 1 600 m, ainsi dans la vallée de Echo, atteste que ces milieux ont été fréquentés par l'homme depuis très longtemps, mais nous ne savons guère à quel moment se produisirent les grandes transformations du paysage consécutif aux défrichements généralisés.

Du début juillet à la fin septembre, voire mi-octobre, les pâturages supra-forestiers laissent tirer parti de leurs ressources pour le bétail. La transhumance qui s'appuie sur les grands troupeaux, exigeait que le bétail à laine soit conduit vers les steppes et les jachères de la dépression de l'Ebre où il restait jusqu'en mai (Puigdefàbregas et Balcells, 1966 ; Rinschede, 1974). Pour des raisons climatiques et compte tenu des cultures de céréales pour l'alimentation humaine, le bétail à laine ne pouvait demeurer dans les vallées pyrénéennes pendant l'hiver. On combinait donc deux sortes de ressources : en hiver, il était installé dans la dépression de l'Ebre, et en été, dans les pâturages supra-forestiers pyrénéens. Ces derniers furent certainement un facteur de limitation du développement de l'élevage, puisque par leur faible extension, ils offraient moins de ressources que les pâturages d'hiver : toute augmentation du bétail devait s'accompagner d'un accroissement des ressources en été.

Coupes de bois et incendies ont permis une remarquable extension des pâturages supra-forestiers en même temps qu'ils entraînent un abaissement de la limite supérieure de la forêt. Il semble que ce phénomène, qui n'a pas été encore tout à fait situé dans le temps, soit antérieur au XVII^e siècle. L'utilisation du feu dans ce milieu est attestée par la présence de branches brûlées et de cendres dans divers horizons du sol. En outre, les genévriers (*Juniperus communis*) et l'*Echinospatum horridum*, que l'on rencontre à la lisière supérieure de l'actuelle forêt, suggèrent que l'usage du feu fut traditionnel pour contrôler le progrès des arbres vers leur ancien domaine. De tout cela résulte une notable expansion des associations herbacées de haute montagne vers le bas. Aux niveaux inférieurs de l'étage supra-forestier le pâturage est habituellement plus dense. Sur les versants ensoleillés, ceux composés de *Festuca eskia*, *Iris latifolia*, *Crocus nudiflorus*, *Deschampsia flexuosa* et *Ranunculus pyrenaicus*, prédominent sur des sols profonds siliceux ou décalcifiés. Dans le secteur occidental, les sols profonds mais mal humidifiés sont le domaine du *Nardus stricta* avec une proportion variable de *Trifolium alpinum*. Les pâturages à *Bromus erectus*, *Festuca rubra* et *Medicago suffruticosa* prédominent dans les environs de la limite actuelle de la forêt. Là où l'activité géomorphologique superficielle est très intense, la couverture végétale est incomplète et s'organise en petites terrasses formées par des hémicryptophytes cespiteux comme les *Festuca gautieri*, *F. eskia*, *Sesleria albicans* et autres. Les pâturages rocailloux peu denses (pelouses écorchées) se caractérisent par la présence d'*Avena montana*, *Koeleria valesiana*, *Festuca ovina* et *Poa alpina*, entre autres plantes. A des niveaux supérieurs, l'influence du gel et de la neige tout autant que la pauvreté du sol et la présence de rocaille sont à l'origine plus ouvertes aux espèces mieux adaptées à la rigueur du climat.

L'étendue des pâturages supra-forestiers reflète l'importance historique de la transhumance ; ainsi dans les vallées de Tena et Ansó : 40 et 30 % des surfaces totales respectivement. Par tradition, la

pression de l'élevage a été très forte, surtout s'agissant des ovins, qui profitaient mieux des versants que le bétail bovin et les chevaux élevés au fond des vallées, plus humides et à la topographie plus douce. Actuellement, plusieurs zones sont consacrées au seul pâturage très extensif, compte tenu de la grande réduction du bétail à laine. Au contraire, on a vu s'accroître de façon considérable les troupeaux de bovins qui utilisent également une partie des pentes. Les pâturages les moins accessibles et ceux qui sont situés à une altitude plus élevée, réservés d'ailleurs aux moutons, ne sont plus utilisés que très occasionnellement.

TABLEAU 2

SURFACES OCCUPÉES PAR LA FORÊT, LES PÂTURAGES SUPRAFORESTIERS ET LES INCULTES DANS QUELQUES VALLÉES PYRÉNÉENNES (en pourcentage des superficies totales).

Les terrains improductifs correspondent en gros à l'étage alpin le plus élevé, où les affleurements rocheux sont étendus.

	Forêts	Pâturages supraforestiers	Improductif
Vallée de Aisa	22,2	21,7	19,7
Vallée de Aragüés	46,4	17,8	12,2
Vallée de Echo	41,1	16,1	9,3
Villanda	32,8	17,6	15,6
Vallée de Tena	3,6	40,2	42,6
Vallée de Ansó	27,1	30,6	19,2

Source : Balcells (1983)

D'autres usages furent introduits plus récemment dans les hautes montagnes des Pyrénées. Certains ont peu d'influence géomorphologique. C'est le cas par exemple de la construction de petits barrages sur des lacs glaciaires pour la production d'énergie électrique. D'autres ont eu en revanche un effet plus important : des pistes d'accès ont été ouvertes et surtout plusieurs stations de ski ont été mises en place, entre 1 700 et 2 300 m en général, sur des pâturages supra-forestiers denses et dont la topographie n'est pas particulièrement accidentée. De telles stations ont marqué l'environnement de façons très diverses bien que toujours ponctuelles.

III. Changements récents de la distribution spatiale des processus géomorphologiques

La limite supérieure de la forêt est actuellement à plus de 1 600 m d'altitude et marque la frontière d'un système morphogénétique,

dominé par un désenneigement prolongé, de forts contrastes thermiques et un volume considérable de précipitations solides et liquides. C'est la raison pour laquelle les sols profonds, qui se trouvaient autrefois sous une couverture forestière, ont été exposés à des changements radicaux des facteurs d'environnement à la suite de la suppression de la forêt : le contraste thermique s'accroît, l'effet d'interception des précipitations est annulé, tandis que l'instabilité hydromorphologique du sol est de plus en plus réelle.

Une étude sur les montagnes des latitudes moyennes (Höllermann, 1985), conclut que de tels changements favorisent l'extension vers des altitudes inférieures des processus qui, potentiellement, correspondent à l'espace supra-forestier originel. L'abaissement de la limite supérieure de la forêt entraînerait par conséquent un abaissement général de la limite inférieure de la solifluxion que l'on peut évaluer à 400 m environ. Ainsi a-t-on signalé (Soutadé, 1986) que, dans le massif de Puigmal (Pyrénées orientales), il existe un seuil aux environs de 1 500 m d'altitude, au-delà duquel les processus cryoniques l'emportent sur les processus de ruissellement superficiel ; cette limite coïncide à peu près avec la limite actuelle de la forêt dans plusieurs secteurs et elle sépare les processus péri-glaciaires de ceux qui correspondent aux climats humides et plus ou moins tempérés.

L'élimination d'une partie de la forêt permet de distinguer deux niveaux morphodynamiques de l'étage supra-forestier (Höllermann, 1985) ; le niveau supérieur, dominé par la fréquence et l'intensité des cycles de gel-dégel, est caractérisé par la présence de terrains couverts de blocs, de rochers et dallages de pierres, ainsi que de glaciers rocheux et de sols structurés (« patterned grounds ») dont la limite inférieure est la frontière entre les deux zones ; le niveau inférieur est étendu sur les versants occupés autrefois par la forêt et se caractérise par des mouvements de masse, lents ou rapides, issus des sols profonds, ou encore par des processus secondaires qui agissent sur l'horizon C de ces sols une fois qu'ils ont été démantelés.

Le seuil d'altitude qui sépare les deux niveaux selon Höllermann se situe autour de 2 400 m compte tenu de la fréquence avec laquelle, à partir de ce seuil, se présentent les processus et les formes par rapport à l'action de la neige et du gel. Le niveau inférieur est celui auquel nous nous intéressons ici, car une bonne partie de sa dynamique est en rapport avec la déforestation et l'expansion des pâturages supra-forestiers. En revanche, le niveau supérieur ne présente pas de traces d'effets humains significatifs et son fonctionnement dépend des seuls mécanismes naturels.

Le niveau péri-glaciaire inférieur est dominé par des mouvements de masse d'amplitude variée et d'autres processus liés au ruissellement superficiel. La répartition de ces deux groupes de processus est déterminée par la présence ou l'absence de sols profonds. Lorsque de tels sols couvrent le substrat rocheux, les traces d'écoulement superficiel sont très rares à cause de l'infiltration, et en plus, les mou-

vements de masse bloquent la formation des lignes de drainage naissantes. Dans ces milieux où la concentration d'humidité au printemps est importante, sont visibles des glissements de plans, des lobes de solifluxion et des blocs laboureurs (« *ploughing blocks* »), ainsi que de grandes langues de décollement.

Les glissements constituent le processus le plus caractéristique du démantèlement des versants au sol profond. Plus fréquents sur les pentes exposées au soleil et les versants rectilignes, ils sont en forme de niche semi-circulaire aux dimensions variées (métriques ou décimétriques), limitée par un talus d'une hauteur de 40 cm environ. Au pied du glissement se trouve généralement un lobe irrégulier et convexe connecté au reste du versant. Parfois les glissements sont reliés entre eux dans le sens de la pente lorsque la concentration de l'eau est favorisée. L'effondrement progressif des bords de la niche provoque le démantèlement de zones étendues du versant, difficilement colonisées à cause du piétinement du bétail (Puigdefàbregas et García-Ruiz, 1984 ; García-Ruiz et Arbella, 1981). Des essais mécaniques réalisés sur ces sols démontrent que les angles de friction ont une faible variabilité ($30,3^\circ \pm 1,3^\circ$) (Puigdefàbregas et García-Ruiz, 1983). En se basant sur l'hypothèse de glissements de plans sur un versant infini (Van Asch, 1980) on peut conclure que les pentes à plus de 30° d'inclinaison ne sont pas stables, même avec un sol sec, tandis que les plans d'inclinaison inférieurs à 15° le sont y compris avec un sol saturé. Des observations sur le terrain attestent que les pentes de plus de 30° sont, en effet, pratiquement démantelées et que la plupart des glissements les plus récents se situent sur des pentes de 20 à 25° (García-Ruiz et Puigdefàbregas, 1984).

Les glissements sont localisés sur des versants autrefois couverts de forêts. Il faut en conclure que la récente expansion de ce phénomène est liée à l'élimination de la forêt, puisque leur fréquence est nulle à l'intérieur de cette dernière. Coupes et incendies seraient responsables de la perte de stabilité des versants et du changement de régime final du sol. On observe couramment des lentilles de glace qui restent à l'intérieur du sol jusqu'à la fin du printemps, tandis que les eaux de fonte coulent dans les niveaux sablonneux et y augmentent la pression hydrostatique, entraînant parfois des ruptures locales. Les glissements provoquent ainsi une plus grande diversification des associations herbacées du fait de la variété de micro-milieus qu'ils créent ; ils sont en même temps facteur de rajeunissement du sol puisqu'ils apportent en surface des matériaux issus des niveaux inférieurs, contrecarrant les effets de la lixiviation (García-Viñao *et al.*, Puigdefàbregas et García-Ruiz, 1984). En forêt les mouvements de masse se réduisent à la reptation ; les éboulements sont peu fréquents et les glissements de plans sont inconnus à l'inverse de ce qui se passe dans les pâturages « mésophytes » au sol profond (García-Ruiz et Puigdefàbregas, 1982).

Des glissements successifs associés à d'autres processus plus lents (reptation) ont causé d'importantes accumulations de sol au pied des

versants et sur des replats suspendus. De tels milieux reçoivent l'eau superficielle et hypodermique venue des zones plus hautes et qui augmente l'humidité du sol. C'est là que l'on observe la formation des meilleurs exemples de lobes de solifluxion parmi lesquels certains sont complètement fonctionnels. (Creus et García-Ruiz 1977) ont signalé l'existence de lobes actifs dans la haute vallée du Gállego et en ont conclu que le mouvement des lobes est en rapport avec l'humidité du sol et la proportion d'argile. La plus grande part du déplacement annuel (entre 20 et 60 mm) a lieu au printemps et coïncide avec la fonte des neiges. (García-Ruiz et Arbella, 1981) ont fait une description de solifluxion en couverture sur des sols limoneux du massif du Monte Perdido. D'autres insistent sur l'importance du substrat rocheux car il agit comme un facteur de contrôle des propriétés mécaniques et hydriques du sol. C'est ainsi que Gutierrez et Peña, (1981) ont, dans la zone de la Bonaigua (Pyrénées catalanes), situé la solifluxion seulement sur des versants d'ardoise et de schistes, bien que sa présence soit beaucoup plus étendue, car pour des raisons topographiques on peut trouver de grandes accumulations de sol en certains endroits.

Sur les versants où le sol profond a été démantelé on observe de petits mouvements de masse très superficiels et, localement, des réseaux denses de drainage. Les terrassettes occupent de vastes étendues, de formes généralement secondaires sur l'horizon C de sols déjà érodés (García-Ruiz et Arbella, 1981) ; selon Brosche (1978), elles constituent un phénomène de solifluxion laminaire retardée ou retenue par la végétation (*gehemte solifluktion*). Dans les Pyrénées, elles apparaissent normalement dans des zones où la fonte est relativement précoce, c'est-à-dire sur des versants droits et convexes, jamais dans des concavités, où le sol a une puissance plus grande (Soutadé, 1980). Del Barrio et Puigdefàbregas (1987) localisent ces terrassettes sur la partie supérieure des versants, sur des reliefs convexes et des pentes élevées (27°). Elles apparaissent fréquemment accompagnées de petites coulées de pierres (« *stone-banked lobes* »), en particulier près des lignes de partage des eaux dont les pentes sont prononcées.

D'autres formes de relief sont mises en rapport avec l'écoulement superficiel, là où la faible puissance du sol et la pente forte réduisent les possibilités d'infiltration. Ainsi naissent des têtes de sources actives de torrents, toujours sur des pentes supérieures à 50 %, avec pâturages xérophytiques ou sur une roche nue, dans le cas d'expositions septentrionales (García-Ruiz et Puigdefàbregas, 1982). Certaines de ces atteintes sont très récentes et coïncident avec des événements pluviométriques particulièrement intenses et sur des versants défrichés, comme ceux signalés sur le Canigou (Soutadé, 1980).

Sur le flysch éocène le défrichement a favorisé l'installation de réseau de drainage denses. Ils se situent au-dessus de l'actuelle forêt, près de lignes de partage des eaux, sur des versants régularisés. Il s'agit d'un réseau dense de rigoles rectilignes et parallèles qui s'in-

tègrent difficilement dans des canaux d'ordre supérieur. Dans certains cas, leur fonctionnement actuel est douteux : on assiste en effet, au début d'une colonisation par les jeunes pins. Ils s'étendent fréquemment dans la forêt, ce qui signale l'existence d'un net déséquilibre hydromorphologique dans la partie supérieure du versant : le défrichement a favorisé le démantèlement d'une grande partie du sol et la réduction de l'infiltration stimule le ruissellement concentré. Cet « excédent hydrique » se prolonge jusque vers la partie moyenne et basse du versant occupée par la forêt, où les rigoles peuvent même se convertir en de profondes roubines.

Les effets négatifs du défrichement ont pu être prouvés en comparant la production d'écoulement et de sédiments dans deux petits bassins aux substrats, altitude, inclinaison et orientation similaires, l'un avec des pâturages supra-forestiers et l'autre avec une forêt dense de *Pinus sylvestris* et de *P. uncinata*. L'écoulement est en moyenne deux fois plus intense dans les pâturages ($12,9 \text{ l/s/km}^2$) que dans les bois ($6,2 \text{ l/s/km}^2$). Les sédiments en suspension atteignent une valeur dix fois plus forte dans les pâturages. Une fois de plus, la forêt exerce une plus grande régulation hydrique et son élimination, même si elle est remplacée par une bonne couverture herbacée, augmente la production de sédiments.

Une autre question importante est celle du comportement des zones supra-forestières du point de vue des éléments dissous (Puigdefàbregas et Alvera, 1986). Sur le flysch, en-dessous de 2 000 m, la concentration en phosphore augmente en même temps que le calcium, le sodium et le potassium se diluent, pendant la fonte des neiges. On peut l'expliquer parce qu'au printemps le sol est saturé et partiellement gelé ; avec l'écoulement superficiel dominant, il s'enrichit d'éléments très abondants dans l'humus, tel le phosphore. Dans ce cas, l'infiltration est moins importante, de telle sorte que les oligo-éléments sont dilués et leurs réserves se trouvent dans l'horizon minéral et dans le substrat. Dès la fin de la fonte, la concentration en phosphore diminue, sauf s'il y a des restes de sol gelé, ce qui tient largement à l'élimination de la forêt sous laquelle la meilleure régulation thermique rend le gel du sol plus difficile dans les horizons inférieurs.

La récente diminution de la pression du bétail ne semble pas exercer pour l'instant d'influence sur la dynamique géomorphologique. Montserrat (1964) évoque une *écologie du pâturage* en référence à l'équilibre qui s'établit entre pression du bétail et associations herbacées, de telle sorte que la réduction du pacage conduirait à la « lignification » sur des versants occupés autrefois par la forêt. Cependant cette tendance est encore trop récente pour en noter les effets. En aucun cas la réduction de la pression du bétail ne donnera lieu à une augmentation des mouvements de masse bien que ses effets soient une inconnue quand il s'agit de la production de sédiments en solution et en suspension.

Nous disposons, en revanche, de renseignements sur les conséquences hydromorphologiques de l'installation des stations de sports d'hiver. L'aménagement des pentes a donné lieu à de nombreux mouvements des terres et a même provoqué une altération du drainage superficiel et hypodermique en créant des replats artificiels et en remplissant quelques concavités. Le tassement de la neige pour faciliter le ski, entraîne une fonte plus brusque et plus tardive accompagnée en conséquence d'une augmentation de l'écoulement superficiel. En outre, le réseau de drainage est parfois réorganisé pour le concentrer dans un petit nombre de canaux ce qui favorise l'incision de petits torrents qui accusent sensiblement leur profil transversal. Tout cela, sans compter l'élimination locale, parfois seulement temporaire, de la couverture herbacée, augmente la capacité de produire des sédiments. C'est dans ce sens que Puigdefàbregas et Alvera (1986) ont réalisé un suivi bimensuel de la composition chimique et sédimentologique des ruisseaux qui drainent deux bassins aux caractéristiques similaires et situés à la source de l'Aragon, entre 1 500 et 2 500 m d'altitude. L'un de ces bassins, la vallée d'Astún, a vu l'installation récente d'une station de ski ; dans l'autre, la seule activité reste l'élevage traditionnel du bétail (tabl. 3). Les principales différences entre les deux bassins tiennent au comportement des nitrates et des sédiments en suspension. Les premiers ont une concentration trois fois plus élevée dans la vallée d'Astún, ce qui s'explique d'ailleurs par une pollution par les rejets d'origine humaine. Les sédiments en suspension sont 8 à 10 fois plus élevés à Astún qu'à Canal Roya, avec une augmentation certaine en été. On en déduit que les zones dont le sol est retourné à l'aide de machines sont la source principale de matériaux. La protection due à la neige en hiver atténue les différences qui sont plus importantes lorsque la couverture nivale disparaît. Il est très important de tenir compte du fait que la charge dissoute est

TABLEAU 3

CONCENTRATIONS MOYENNES DES DÉCHARGES D'UN BASSIN NATUREL (CANAL ROYA), A DROITE, ET D'UN BASSIN ALTÉRÉ (ASTÚN), A GAUCHE, DANS UN MILIEU SUDALPIN.

	Concentration (mg/l)	
Charge en suspension annuelle	34,5	4,6
Charge en suspension en hiver	19	6,5
Charge en suspension en été	65,6	2,9
Charge dissoute	56	74,9
Conductibilité (us/cm)	106	119
Na	1,27	1,24
K	0,25	0,20
Ca	14	17,5
Cl	0,6	0,54
N-NO3	289	79

Source : Puigdefàbregas et Alvera (1986).

sensiblement plus forte à Canal Roya qu'à Astún. Cela prouve que dans le premier bassin l'infiltration domine, alors que dans le second, la circulation hydrique est plus superficielle.

Il convient enfin de préciser que quelques-uns des grands mouvements de masse, dont le plan profond affecte le substrat, ne paraissent pas liés à la déforestation, bien que la plupart d'entre eux se produisent sur des versants autrefois occupés par la forêt. Ils sont formés de grandes langues de décollement qui laissent à leur début une cicatrice ou une niche d'arrachement. Ils prédominent sur des matériaux paléozoïques météorisés en profondeur (ardoises et schistes). Leur plus grande densité est à la source du Gállego (station de ski d'El Formigal), dans la vallée de Benasque (station de ski de Cerler) et dans la vallée de Gistáin.

Conclusions

L'élimination de la forêt à une époque historique qui n'a pas encore été déterminée a favorisé l'expansion des associations herbacées et leur utilisation estivale par une partie du bétail transhumant. La conséquence géomorphologique la plus importante est l'abaissement en altitude de quelques processus de type périglaciaire ainsi qu'une réactivation de la dynamique hydromorphologique. Sur cet étage qui s'étend entre 1 700 et 2 400 m, divers types de mouvements en masse sont dominants, accompagnés du démantèlement du sol profond sur les versants régularisés de plus de 25 ou 30° d'inclinaison ; on y trouve aussi des accumulations de puissantes épaisseurs de sol sur les replats et au pied des pentes. On rencontre également des réseaux de rigoles denses, peu intégrées, dont le fonctionnement actuel est douteux, dans des zones déterminées. Conséquence immédiate, les pâturages supra-forestiers présentent des coefficients d'écoulement supérieurs à ceux des forêts ; de même la production de sédiments en suspension y est sensiblement plus élevée. En revanche, dans la forêt, compte tenu de la prédominance de l'infiltration et de l'écoulement hypodermique, la plupart des sédiments exportés sont dissous. Malgré tout, le système traditionnel d'exploitation, basé sur l'élevage, a su maintenir une productivité élevée et le paysage conserve une valeur esthétique notable. La présence de sols profonds garantit une remarquable régulation hydrique et une couverture herbacée dense. Par contre, l'installation de stations de ski a des effets plus locaux mais aussi plus intenses. Les mouvements des sols, la grande concentration touristique et l'élimination de la végétation dans certains secteurs — volontaire ou pas — sont à l'origine de grands changements dans le fonctionnement hydrologique et la dynamique des sédiments.

Bibliographie

- BALCELLS, E. — Evolución socioeconómica reciente de tres comunidades comarcales pirenaicas y destino actual de las superficies más productivas de su demarcación. *Cuadernos de investigación geográfica*, 9, pp. 41-82, 1983.
- BROSCHKE, K.V. — Formas actuales y límites inferiores periglaciares en la Península Ibérica. *Estudios geográficos*, 151, pp. 131-162, 1978.
- CREUS, J. et GARCIA-RUIZ, J.M. — Observaciones sobre solifluxión en el Alto Valle del río Gállego. *Actas II Reunión grupo español trabajo Cuaternario*, pp. 57-64, Madrid, 1977.
- CREUS, J. — *El clima en el Alto Aragón occidental*. Instituto de estudios pirenaicos, Jaca, 1983 (monografía).
- DEL BARRIO, G. et PUIGDEFABREGAS, J. — Mass wasting features above the timberline in the Central Pyrenes and their topographic controls. *Pirineos. Revista de ecología de montaña*, 130, pp. 29-51, 1987.
- DEL BARRIO, G., CREUS, J. et PUIGDEFABREGAS, J. — Thermal seasonality on the high mountain belts of the Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 10 (3), pp. 227-233, 1990.
- GARCIA-RUIZ, J.M. et ARBELLA, M. — Modelos de erosión en el piso subalpino: la degradación de los loess del macizo de Monte Perdido (Pirineo central español). *Pirineos*, 114, pp. 35-58, 1981.
- GARCIA-RUIZ, J.M. et PUIGDEFABREGAS, J. — Formas de erosión en el flysch eoceno surpirenaico. *Cuadernos de investigación geográfica*, 8, pp. 85-128, 1982.
- GARCIA-RUIZ, J.M. et PUIGDEFABREGAS, J. — Inestabilidad de laderas en el Pirineo aragonés: tipos de movimientos y su distribución geográfica. *Jornadas sobre inestabilidad de laderas en el Pirineo*, Barcelona, pp. 141-152, 1984.
- GARCIA-RUIZ, J.M., PUIGDEFABREGAS, J. et CREUS, J. — *Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón*. Huesca, Instituto de estudios altoaragoneses, 1985.
- GARCIA-RUIZ, J.M., PUIGDEFABREGAS, J. et CREUS, J. — La acumulación de nieve en el Pirineo Central y su influencia hidrológica. *Pirineos*, 127, pp. 27-72, 1986.
- GARCIA-RUIZ, J.M., ALVERA, B. et al. — Geomorphic processes above the timberline in the Spanish Central Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 10 (3), pp. 201-214, 1990.
- GARCIA-VIÑAO, A., ALVERA, B. et al. — Sistemas de erosión en pastos del flysch eoceno surpirenaico. *XVI Reunión de la S.E.E.P.*, pp. 233-248, Oviedo, 1986.
- GUTIERREZ, M. et PEÑA, J.L. — Los glaciares rocosos y el modelado acompañante en el área de la Bonaigua. *Boletín geográfico y minero*, 92(2), pp. 101-110, 1981.
- HÖLLERMANN, P. — The periglacial belt of mid-latitude mountains from a geoecological point of view. *Erdekunde*, 39, pp. 259-270, 1985.
- MONTSERRAT, P. — Ecología del pasto, *Publicaciones Centro pirenaico Biología experimental*, 1(2), 68 p., 1964.

- PUIGDEFABREGAS, J. et BALCELLS, E. — Resumen sobre el régimen de explotación ovina trashumante en el Alto Aragón, especialmente en el valle de Ansó. *Publicaciones Centro pirenaico Biología experimental*, 1(6), 18 p., 1966.
- PUIGDEFABREGAS, J. et GARCIA-RUIZ, J.M. — Parámetros físicos del suelo y dinámica de vertientes en el Pirineo Central. *VIII Coloquio de geógrafos españoles*, pp. 131-138, Barcelona, 1983.
- PUIGDEFABREGAS, J. et GARCIA-RUIZ, J.M. — Dynamique des versants au niveau supraforestier: glissements massifs des sols anciens dans les Pyrénées centrales. *Documents d'écologie pyrénéenne*, 3-4, pp. 449-545, 1984.
- PUIGDEFABREGAS, J. ALVERA, B. — Particulate and dissolved matter in snowmelt runoff from small watersheds, *Z. Geomorph.*, Suppl. Bd. 58, 1986.
- PUIGDEFABREGAS, J. et ALVERA, B. — Aspectos biogeoquímicos de los ambientes de montaña. *Jornades sobre bases ecològiques per la gestió ambiental*, pp. 79-84, Barcelona, 1986.
- RINSCHDE, G. — *Die Transhumance in den französischen Westalpen und in den Pyrenäen*, Munster, 1974. Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften.
- SOUTADÉ, G. — *Modèle et dynamique actuelle des versants supraforestiers des Pyrénées orientales*, Albi, Impr. Coop. Sud-Ouest, 1980.
- VAN ASCH, T. W.J. — Water erosion on slopes and landsliding in a mediterranean landscape. *Utr. Geogr. Stud.*, 20, pp. 12-38, Utrecht, 1980.

RÉSUMÉ. — La plus grande partie de l'espace supra-forestier des Pyrénées espagnoles soumise à une exploitation humaine est le produit du défrichement de la bande supérieure de la forêt subalpine originelle. Par suite, le sol a subi des altérations géomorphologiques et hydrologiques, ce qui peut être pris comme une conséquence de l'extension descendante de la domination de la solifluxion active. Cependant l'exploitation traditionnelle basée sur l'élevage semble maintenir un équilibre dans ce système, en conservant une productivité élevée. En revanche, des altérations localement intenses ont été détectées, dues à une concentration touristique survenue au cours des dernières années.

SUMMARY. — GEOMORPHOLOGICAL IMPACTS OF HUMAN ACTIVITIES ABOVE THE TIMBERLINE IN THE SPANISH PYRÉNÉES. In most areas situated above the present timberline in the Spanish Pyrénées which are usually exploited by man for economic purposes, the genuine forest was cleared off and its initial upper limit altitude was reduced. The former forest soils in this altitudinal belt are presently suffering from erosion or have already been eroded as a consequence of a downward extension of the solifluxion domain in the recent past; in spite of this erosion it seems that animal husbandry helps and keeps the balance of such a combination while it reaches a satisfactory level of production of meat, milk, etc. On the contrary any turist concentration induces local but heavy disturbances.

RESUMEN. — EFECTOS GEOMORFOLÓGICOS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS EN LOS AMBIENTES SUPRAFORESTALES DE LOS PIRINEOS ESPAÑOLES. — La mayor parte del espacio supraforestal de lo Pirineos españoles está sometida a explotación humana como consecuencia de la eliminación de la banda superior del bosque subalpino original. Tras la deforestación estos suelos han sufrido alteraciones geomorfológicas e hidrológicas que pueden entenderse como consecuencia de una extensión descendente del dominio de la solifluxión activa. A pesar de ello la explotación ganadera tradicional parece mantener un equilibrio en este sistema, conservando una elevada productividad. Por el contrario, se han detectado alteraciones localmente intensas debidas a la concentración turística ocurrida en los últimos años.

Mots-Clés. — Espagne, montagne, Pyrénées, étage supraforestier, défrichement, pâturages, glyptogenèse, solifluxion, glissements, terrassettes, activités humaines, élevage, tourisme, historique.