

P. MACAR et A. PISSART<sup>1</sup>

## RECHERCHES SUR L'ÉVOLUTION DES VERSANTS EFFECTUÉES A L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Cet article traite des méthodes de recherche utilisées depuis plusieurs années au laboratoire de Géographie Physique de l'Université de Liège pour étudier l'évolution des versants.

Tous ceux qui se sont penchés sur ce problème en ont mesuré la difficulté. Les pentes peuvent en effet être affectées par de très nombreux facteurs, les uns passifs, les autres actifs. Les premiers sont liés à la nature lithologique du substratum: perméabilité, granulométrie, résistance à la désagrégation...; les seconds sont les agents d'érosion qui sculptent ces versants: creep, ruissellement, congéfluxion... En outre, peuvent intervenir des facteurs d'érosion indirects, comme l'érosion verticale et l'érosion latérale des rivières qui, en sapant la base des versants, ont une influence importante sur leur évolution. Tous ces facteurs peuvent d'ailleurs être différents ou d'intensité différente selon le climat, la profondeur de la vallée, la valeur initiale de la pente, la section de versant envisagée, voire l'orientation du versant.

Au total, nombre de facteurs d'intensité variable interviennent, ce qui peut décourager le chercheur désireux de déchiffrer sur le terrain l'histoire des pentes diverses qu'il rencontre. Sans doute ceci explique-t-il que, jusqu'en ces derniers temps, les études de terrain consacrées aux pentes ont été plutôt rares.

La création, en 1952, dans l'Union Géographique Internationale, d'une *Commission pour l'étude des Versants* — dont le Professeur BAKKER fut le premier et très actif secrétaire — fut sans doute l'élément catalyseur qui détermina, en groupant les chercheurs intéressés et en attirant fortement l'attention sur ce problème, l'éclosion d'une véritable floraison de travaux.

Ceux-ci peuvent être classés suivant trois grandes techniques d'approche.

La première consiste à étudier théoriquement l'évolution de modèles par des méthodes d'analyse mathématique. Le Professeur BAKKER a montré de manière remarquable que des résultats de première importance pouvait être obtenus de la sorte.

La seconde, surtout utilisée dans le cadre des études de conservation des sols, consiste à observer de près, pendant un laps de temps assez long, l'évolution de territoires-échantillons, en s'efforçant de reconnaître les processus qui s'y développent par l'examen détaillé des modifications qu'ils produisent.

Quant à la troisième technique, elle réside dans l'étude du terrain lui-même, combinant l'examen attentif de ses formes, des dépôts qui s'y trouvent et éventuellement de traces des processus qui y agissent aujourd'hui. L'ensemble des observations ainsi recueillies permet en général un essai de reconstitution de l'évolution subie par le versant.

C'est dans cette dernière voie que s'est engagé le Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de Liège. Les travaux réalisés à ce jour ont été par ailleurs orientés et facilités en Belgique par la création, en 1959, du Centre National de Recherches Géomorphologiques (C.N.R.G.). Ce centre, qui rassemble des chercheurs des diverses Universités, s'est en effet imposé pour tâche la réalisation d'une carte géomorphologique détaillée de la Belgique, établie par des levés de terrain. Ces levés ont porté tout

<sup>1</sup> Prof. dr. P. MACAR et Dr. A. PISSART, Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de Liège, Belgique.

naturellement l'attention sur les problèmes des pentes, car celles-ci occupent en général la plus grande partie du territoire à cartographier.

Un des problèmes fondamentaux fut celui de la représentation de ces pentes, laquelle, ne pouvant se borner à être uniquement descriptive, força à établir parmi elles des distinctions génétiques, seule base logique d'une classification géomorphologique rationnelle. Les recherches faites à ce sujet sont d'ailleurs toujours en cours.

### II. METHODES D'ÉTUDE

A Liège, l'étude des pentes sur le terrain fut réalisée selon 4 méthodes différentes: le lever de séries de profils, la recherche de valeurs de pente caractéristiques, la cartographie de détail des pentes d'une petite région, et, enfin, l'étude directe de versants sous climat périglaciaire actuel. La dernière méthode découle de ce que les recherches antérieures ont montré que le système d'érosion actif sous ce type de climat froid a joué un rôle largement prépondérant dans l'édification de nos pentes actuelles.

#### A. Séries de profils

Une première méthode de recherche consiste à lever de nombreux profils sur le terrain et à examiner ces profils comme un matériel statistique en s'efforçant de distinguer les variations dues aux différents facteurs. Cette méthode est toutefois d'application délicate car, pour chaque profil, un choix arbitraire de localisation est nécessaire, choix réellement difficile parce que, dans le détail, la forme des versants varie souvent très vite dans le sens latéral. Comme le travail très fastidieux d'établissement des profils limite le nombre de levés, on ne peut faire jouer qu'en partie la loi des grands nombres pour pallier les déficiences inévitables dues au choix de l'observateur.

Il n'empêche que cette méthode a cependant été appliquée avec succès dans une région de Belgique à substratum varié, pour faire ressortir l'influence de ce substratum sur la valeur des pentes et l'allure des versants. Au départ, certaines précautions furent prises pour que les différents profils étudiés soient comparables. Ainsi, pour reconnaître l'effet d'un seul facteur, on s'est efforcé de chercher des emplacements où les autres n'agissent pas, ou agissent de manière constante, le facteur étudié étant pour sa part considéré autant que possible dans toutes ses variations. C'est pour cela que, par exemple, les coupes étaient choisies en des sections droites des rivières, là où l'érosion latérale n'exerçait pas d'effet marqué; elles étaient en outre peu éloignées les unes des autres, de façon que des différences climatiques ne puissent jouer un rôle important.

150 profils furent dressés avec précision, par des mesures de 5 en 5 mètres, sur des versants développés, d'une part dans des grès, des calcaires et des schistes, et d'autre part dans des sables, des argiles et des craies. Ainsi, des exemples étaient pris dans les principales roches meubles et lapidifiées qui affleurent en Belgique.

Les résultats de ce travail, réalisé dans la région de Charleroi par R. FOURNEAU sous la direction de P. MACAR [4, 14], sont brièvement résumés ci-dessous:

1. Sur les différentes roches non cohérentes examinées, les pentes moyennes sont faibles et à peu près du même ordre de grandeur. Comme on s'y attend, les pentes moyennes sont plus fortes dans les roches cohérentes, mais à peu près égales dans les grès et les calcaires<sup>2</sup>, et nettement plus faibles dans les schistes.

L'examen des pentes maxima atteintes sur chaque profil confirme nettement les résultats acquis par l'étude des pentes moyennes. Il apparaît donc que l'inclinaison des ver-

<sup>2</sup> Dans une autre région (Condroz) (7), le peu de différence entre versants sur grès et calcaires put être confirmé, avec toutefois, à cet endroit, des pentes plus raides sur les grès.

sants est, en premier lieu, liée à la résistance de la roche à la désagrégation. Le peu de différence entre les grès, qui donnent en général des crêtes plus élevées, et les calcaires doit sans doute être attribué à l'importance plus grande du ruissellement sur les grès, qui contrebalance sur les versants leur résistance plus grande à la désagrégation.

Si l'on examine d'autre part le rôle éventuel de l'importance du cours d'eau coulant au fond de la vallée, ou encore celui de la hauteur des versants, on constate que, très généralement, les inclinaisons des pentes varient dans le même sens que chacun de ces deux facteurs. La plupart des vallées étant, dans la région étudiée, au stade de jeunesse ou au début de la maturité, on peut y voir l'effet de l'érosion verticale qui, contrecarrant la tendance à l'abaissement des pentes, est plus active quand la rivière est importante et aussi, par conséquent, dans les vallées les plus profondes. Les effets ci-dessus sont toutefois bien plus marqués dans les grès, où l'érosion verticale semble donc moins affectée par leur résistance que ne le sont les agents de transport en masse travaillant sur les versants.

2. Les formes des versants présentent par ailleurs une certaine relation avec la nature du substratum. Laissant de côté les versants de forme complexe qui, dans la région étudiée, groupent cependant la moitié du total, on constate que le profil convexe-concave est le seul qui apparaisse dans les calcaires, tandis que, dans les roches meubles et dans les schistes, c'est-à-dire dans les roches tendres en général, c'est le type convexe-rectiligne-concave qui l'emporte sur l'autre. C'est apparemment l'indice que, dans ce dernier type, la section rectiligne correspond à un état d'équilibre, plus rapidement atteint dans les roches tendres, et surtout dans celles qui résistent le mieux à la congélifluxion, c'est-à-dire les craies, les argiles et les schistes.

La dernière observation semble bien confirmer que ces versants ont été essentiellement façonnés par la congélifluxion lors des phases froides du Quaternaire.

Une autre constatation est digne d'intérêt: les concavités basales, très fréquentes dans les roches calcaireuses (85 à 100 %), de même que dans les roches argileuses (75 à 90 %), n'existent plus que dans la moitié des profils levés dans les sables et les grès. Or, ces roches siliceuses sont précisément celles qui résistent le mieux à la cryergie. D'où l'hypothèse que cette dernière a joué un rôle important dans le façonnement de ces concavités basales.

Un autre travail, réalisé de la même manière dans le Condroz par J. M. LAMBERT (7, 15) a vérifié que, dans les vallées parallèles à la direction des couches géologiques, la disposition de la pente de ces couches a une influence sur l'inclinaison des versants et peut donner naissance à une asymétrie. Ainsi que l'un de nous l'avait prévu théoriquement (11, p. 130), les versants dont la pente est de même sens que celle des bancs (versants conformes) sont systématiquement moins inclinés que ceux dont la pente est inverse (versants contraires). Cette différence provient vraisemblablement de ce que l'altération des versants conformes est facilitée par l'existence de joints de stratification très obliques, qui facilitent la pénétration de l'eau.

## B. Recherches de pentes caractéristiques

Une méthode entièrement différente utilisée à Liège pour étudier les versants consiste à rechercher sur le terrain, avec l'aide préalable de la carte et surtout des photos aériennes, des pentes caractéristiques, pouvant être considérées comme formant un ensemble, et comme ayant, selon toute apparence, la même signification géomorphologique. Ainsi, par exemple, des pentes uniformes d'égale inclinaison constituent un ensemble de formes dont la signification peut être supputée en comparant les circonstances diverses de leur apparition. Cette façon de procéder offre l'avantage de pouvoir étendre rapidement la

recherche à un vaste territoire, et de considérer ainsi, simultanément, un grand nombre de formes semblables, même si elles sont relativement peu fréquentes.

Nous donnerons deux exemples d'application de cette méthode:

1. Les versants essentiellement phylladeux des vallées très encaissées de la Meuse et de la Semois à la traversée de l'Ardenne ont été examinés attentivement par l'un de nous (17), en y recherchant les pentes rectilignes et parallèles qui correspondent à une portion de plan. Pour la commodité de l'étude, une limite de dimension avait été fixée, et seules les parties planes dont la longueur atteignait une valeur de 100 m ont été retenues. Cette investigation a montré que des éléments plans de versants d'une telle longueur n'existent que pour deux inclinaisons déterminées, l'une voisine de  $6^\circ$ , l'autre proche de  $31^\circ$ . Comme nous le verrons plus loin, des pentes semblables ont été retrouvées dans plusieurs autres régions de Haute Belgique. Ces deux valeurs paraissent correspondre à des pentes en état d'équilibre dynamique. La plus faible ( $6^\circ$ ) représente sans doute le seuil d'action d'une certaine forme de congélifluxion: glissements en paquets, en loupes probablement, pour un matériel phylladeux ou schisteux emballé dans une matrice argilo-limoneuse.

La seconde valeur, soit  $31^\circ$ , correspond à la pente d'équilibre de l'éboulis de gravité, mais est observée en des endroits où de tels éboulis n'existent pas. Elle apparaît uniquement dans les parties concaves des méandres. En ces endroits en effet, des conditions particulières sont réunies: d'une part, le versant est sapé à sa base par l'érosion latérale de la rivière qui emporte tous les éléments ayant tendance à s'y accumuler, et d'autre part, l'orientation de ce versant parallèlement à la schistosité<sup>3</sup> permet le détachement aisé de plaquettes qui basculent et glissent le long de la pente. La combinaison de ces conditions, donnant un recul très rapide du versant et l'enlèvement quasi immédiat des éléments désagrégés, permet le façonnement d'un versant rectiligne qui se stabilise à près de  $31^\circ$ .

En effet, jusqu'à cette valeur de  $31^\circ$ , le recul est très rapide. En dessous de cette inclinaison d'autres processus, beaucoup plus lents, entrent en jeu. La pente que nous observons aujourd'hui est celle de la limite inférieure permettant ce processus d'éboulis. Le versant tend évidemment à s'abaisser en-dessous de cette valeur limite, mais sa vitesse d'évolution est alors trop lente pour suivre le recul de sa partie inférieure.

2. Au Pays de Galles, l'examen de photos aériennes a permis à A. PISSART (18) de reconnaître l'existence de versants particuliers, découpés en de gigantesques marches d'escalier. Bien qu'ils soient disséminés sur une étendue considérable, leur étude a pu être menée à bien sur le terrain grâce à leur observation préalable sur photos aériennes. L'ensemble des observations a permis d'établir l'origine périglaciaire de ces versants découpés en replats de cryoturbation. Ces formes nées sous un climat froid sont dues à l'action conjuguée de la nivation et de la solifluxion.

Il n'est malheureusement pas toujours facile de déterminer les caractères précis qui permettent d'isoler des éléments de versants bien distincts, et peuvent ainsi servir de point de départ à semblables recherches. Quand elle peut être appliquée, cette méthode semble cependant être une des voies les plus rapidement fructueuses dans l'étude des versants.

<sup>3</sup> Dans cette région, les méandres s'allongent perpendiculairement à la schistosité en raison de la moindre résistance qu'offrent les roches schisteuses et phylladeuses lorsqu'elles sont attaquées selon cette direction.

### C. Cartographie détaillée

Une troisième méthode, utilisée principalement dans la réalisation de la carte géomorphologique de la Belgique, consiste à cartographier d'une manière très détaillée toutes les pentes d'une région et à se servir de la carte obtenue comme point de départ de l'analyse et de l'interprétation. Cette carte des pentes est faite avec beaucoup de précision: elle mentionne les diverses valeurs mesurées des lignes de plus grande pente et leur direction, elle renseigne tous les changements brusques des pentes, elle indique enfin l'allure générale concave, convexe, rectiligne ou irrégulière des éléments constituant les versants.

Un tel travail de cartographie est extrêmement lent, mais il se révèle souvent fructueux. Il oblige le chercheur à examiner attentivement toutes les formes du terrain et lui fait parfois découvrir directement des phénomènes intéressants. Les pentes mesurées peuvent toujours être exploitées par une méthode statistique pour déterminer si certaines valeurs d'inclinaison ne sont pas particulièrement fréquentes.

1. Une étude réalisée par J. M. DELAHAUT (1) dans la région de Grand Halleux, à l'endroit d'une large dépression dans les phyllades du Cambrien inférieur (Devillien)<sup>4</sup>, fournit un bon exemple d'une interprétation immédiate de la carte des pentes. La cartographie de la dépression fait apparaître l'existence, sur une grande partie de son pourtour, d'un abrupt incliné d'environ 20°, et qui n'était pratiquement pas visible sur la carte topographique. L'étude de l'abrupt sur le terrain montre qu'il correspond à un contact entre deux formations dont la différence lithologique, à cet endroit, n'est guère perceptible à l'oeil nu. Toutefois la résistance à la désagrégation chimique de ces deux assises phylladeuses devait être différente et est à l'origine de l'abrupt.

Une fois cette interprétation vérifiée, le tracé de l'abrupt permet de suivre un contact géologique que l'absence d'affleurements ne permet de situer par l'étude géologique proprement dite que de façon très approximative.

2. Une autre recherche, effectuée par G. SERET (21) dans la région de Han-sur-Lesse (Famenne), donne un exemple plus complet des résultats qui peuvent récompenser le chercheur qui s'astreint à réaliser cette cartographie soigneuse. Le levé l'a conduit à défendre l'idée que presque toutes les pentes de la région étudiée sont formées de sections planes. Concavités et convexités elles-mêmes seraient essentiellement composées de la juxtaposition de sections rectilignes. De plus, en dépouillant statistiquement sa carte des pentes, G. SERET a montré que certaines valeurs de pente étaient plus fréquentes que d'autres, et il déduit de leur localisation qu'il s'agit de pentes d'équilibre significatives, dont l'inclinaison est fonction de leur genèse et, à un moindre degré, de la nature du substratum, tantôt schisteux, tantôt calcaire. Toutefois, l'interprétation génétique des dix maxima observés dans le diagramme de fréquence des pentes s'est révélée très difficile en l'absence de dépôts de couverture, trait caractéristique de la majorité des pentes de la Famenne. Plusieurs maxima sont vraisemblablement d'extension locale.

La même méthode statistique a été utilisée dans quatre thèses de licence différentes se rapportant à diverses régions de Haute Belgique (1, 2, 5, 9). Dans les roches ardennaises, cohérentes et nettement plissées, plusieurs de ces travaux vérifient l'existence de maxima très marqués vers 5-6° (Fig. 1). D'autres maxima beaucoup moins marqués existent ailleurs, mais ils concordent souvent mal d'une région à l'autre. Il apparaît toutefois très vraisemblable que certaines autres pentes significatives se groupent vers les valeurs de 18 à 22°.

Cette méthode d'étude des pentes, qui offre le grand avantage d'être très objective, en ce sens qu'elle laisse très peu de place à l'imagination de l'auteur dans la recherche

<sup>4</sup> A 45 km au S.O. de Liège.

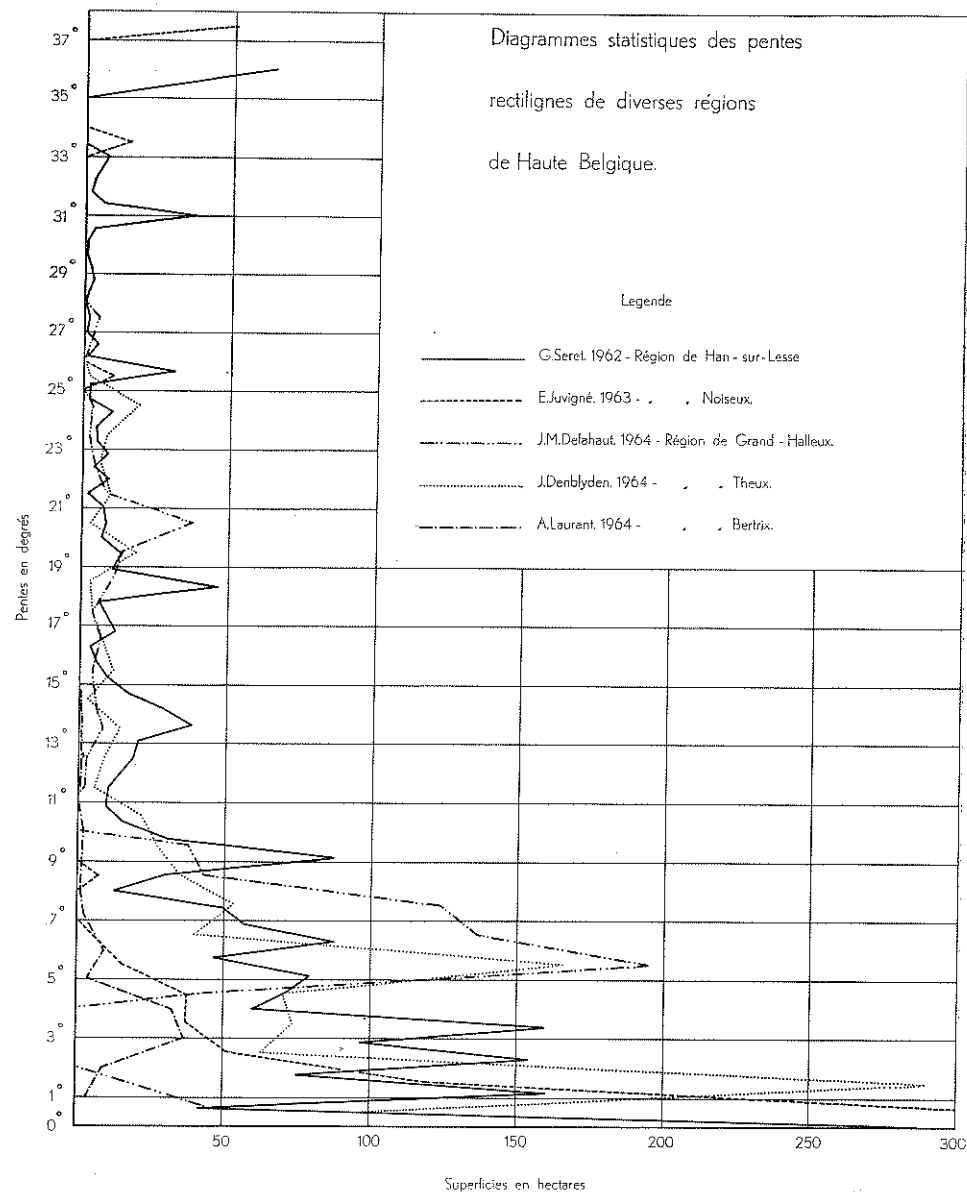


Figure 1. Diagrammes statistiques des pentes rectilignes de diverses régions de Haute Belgique. Un seul maximum important se reproduit sur plusieurs courbes: il correspond à une pente de 6° et se retrouve sur les diagrammes de DELAHAUT, DENBLYDEN, SERET et LAURANT. Une convergence identique mais beaucoup moins apparente existe entre 18 et 22°.

Le diagramme de G. SERET (21) a été publié avec une échelle des pentes exprimée en %. Cette échelle a été convertie en degrés sur cette figure.

de pentes significatives, semble n'être guère utilisable, pratiquement, que pour les pentes rectilignes. Comme déjà dit, elle oblige cependant le chercheur à examiner soigneusement toutes les formes de terrain. Elle permet, ainsi que l'expérience l'a montré, la découverte de certaines lois intervenant dans l'évolution des pentes, mais exige malheureusement un travail de terrain long et fastidieux.

#### D. Etude des versants sous climat périglaciaire

Une des plus récentes méthodes d'étude pratiquée à Liège consiste à examiner les versants de régions à climat périglaciaire. On s'efforce ainsi de déchiffrer directement les règles de leur évolution sous ce climat, qui est selon toute probabilité celui sous lesquels s'est déroulé en majeure partie l'évolution des versants de l'Europe occidentale.

Les études de ce genre sont encore peu nombreuses. Elles postulent l'examen des formes de terrain et des processus qui s'y développent actuellement.

Des observations ont été effectuées par A. PISSART dans l'Arctique Canadien, sur l'île Prince Patrick (76 Lat. N., 120 long. W.). Elles ont permis notamment: 1. de confirmer que ce climat met bien en relief les moindres influences lithologiques, 2. de voir comment la nivation peut y jouer un rôle de premier plan dans les conditions d'humidité très réduite qui y règnent, et 3. de comprendre que la solifluxion y est beaucoup plus active sur les pentes faibles que sur les pentes fortes, indépendamment de toute influence de la granulométrie du matériel. Par ailleurs, l'étude du recul d'un front de cuesta a montré la complexité du phénomène, bien que toute l'évolution se soit faite sous un même climat froid.

### III. QUELQUES PROBLEMES ET RESULTATS

#### A. Convexités et concavités

Les méthodes mentionnées ci-dessus tendant surtout à déterminer la genèse des versants ou de parties de versants en cherchant en particulier à reconnaître les formes qui méritent d'être distinguées sur les cartes géomorphologiques. A côté des sections planes et rectilignes dont nous avons déjà longuement parlé, il est apparu comme fondamental, dès le début de la cartographie géomorphologique, de représenter les autres formes générales que sont concavités et convexités. Leur figuration sur les cartes a permis de noter leur répartition géographique, nettement plus irrégulière que ne le laisseraient supposer les termes de concavité basale et de convexité sommitale, qui désignent des formes, certes fréquentes, mais non exclusives. L'étude de ces formes a permis de dégager, quant à leur évolution, certaines conclusions résumées ci-dessous.

##### 1. Les convexités

Les convexités sommitales, qui occupent de loin la plus grande superficie dans les régions belges étudiées, sont des formes banales qui existent presque toujours au sommet d'un versant. Elles paraissent s'être développées d'une manière continue et progressive au cours des multiples alternances climatiques du Quaternaire. Façonnées par l'action générale des agents de transport en masse, ces convexités se sont élargies très progressivement et leur extension plus ou moins grande ne témoigne guère que de la plus ou moins longue évolution du versant. Celle-ci ne doit évidemment pas avoir été gênée par un autre facteur, comme l'érosion latérale de la rivière. En outre, la conclusion n'est valable qu'en dehors de toute influence lithologique. La présence de bancs plus résistants peut en effet faire apparaître ou conserver des convexités brutales, même sur des versants ayant subi une très longue évolution.

Les convexités sommitales peuvent donc être caractérisées par leur étendue ou, mieux peut-être, par leur angularité, mesurée en principe par leur plus petit rayon de courbure. Ce dernier doit augmenter progressivement avec leur évolution. Si cette notion théorique a été aisément acquise, la mesure de cette angularité s'est cependant révélée difficile en pratique<sup>5</sup>.

Les convexités sommitales sont essentiellement des formes d'érosion, aussi l'épaisseur de la couverture de dépôts superficiels y est-elle toujours réduite: le bed-rock affleure en général à faible profondeur à moins, bien entendu, que la convexité ne se développe au détriment d'une forme d'accumulation antérieure.

##### 2. Les concavités

Les travaux réalisés à ce jour montrent que, dans les régions étudiées, les concavités n'occupent que rarement une superficie étendue. Elles peuvent avoir des origines diverses. Certaines sont dues classiquement à la présence de couches plus résistantes à leur partie supérieure, d'autres sont en relation avec un 'niveau de base' qui peut d'ailleurs, lui aussi, être constitué par un banc plus dur.

Les concavités de ce type sont essentiellement des formes d'érosion façonnées au fur et à mesure du recul du versant, et qui ne portent normalement aucune autre accumulation que l'épaisseur habituelle de débris superficiels. Toutefois, si au cours de l'évolution, une modification des conditions climatiques permet le développement de processus nouveaux, ces nouvelles conditions d'évolution peuvent déterminer l'apparition d'une certaine accumulation sur la concavité préexistante. Ainsi, par exemple, l'apparition de phénomènes de solifluxion sur une concavité évoluant précédemment par ruissellement et creep peut déterminer un engorgement de débris et donc une certaine accumulation là où la pente diminue.

Les concavités dues uniquement à l'accumulation sont par ailleurs, dans notre pays, peu nombreuses. Elles sont limitées au pied de versants qui ont été sapés par un agent d'érosion plus rapide, que constitue par exemple l'érosion latérale d'une rivière. Lorsque cet agent ne façonne plus le pied du versant, les débris descendant de celui-ci, s'y accumulent et sauf, — cas exceptionnel, — où apparaissent des sections rectilignes comme celles des talus d'éboulis, elles donnent naissance à une forme concave caractéristique. C'est généralement le cas au contact terrasse-versant.

La distinction génétique des divers types de concavité permet donc de séparer des formes d'érosion et des formes d'accumulation. Toutefois cette distinction, sur une base morphologique, est difficile.

#### B. Formes qui accidentent ou entament les versants

La cartographie géomorphologique a montré la nécessité pratique de distinguer des pentes complexes, dues à la juxtaposition de fragments concaves, rectilignes ou convexes trop petits pour être figurés. On peut distinguer en outre des pentes irrégulières, qui correspondent notamment à de petits accidents banaux tels que bancs plus durs forment localement saillie, ou à des glissements élémentaires produisant creux ou bombements.

D'autres 'micro-formes' plus régulières ont été étudiées. Ce fut le cas des terrassettes, fréquentes dans les prairies et vergers du Pays de Herve, et dont un travail récent de P. ROBERT (19) est venu confirmer l'origine (due ici au pacage du bétail), montrer leur

<sup>5</sup> Des essais dans ce sens avaient été effectués par D. DEUSE au N. de Liège (3); à Louvain, Mme VANMAERCKE (22) a utilisé dans ce sens un index qui, au point de vue signification, diffère très peu du rayon de courbure proprement dit. La valeur de cet index est obtenue en divisant la longueur de l'arc de la convexité par l'angle entre les tangentes à ses deux extrémités.

mode de façonnement et ses particularités, et fournir divers critères permettant de distinguer ces 'sentiers-de-vaches' des terrassettes d'origine naturelle. De nombreux rideaux accidentant les pentes de la même région firent l'objet d'une étude parallèle, démontrant notamment que certains d'entre eux, à tracé aberrant, étaient des traces ultimes d'anciens chemins aujourd'hui disparus (10).

D'autres formes enfin entament nettement les versants, et l'une d'elles fit l'objet de recherches particulières (5, 6). Il s'agit de petits vallons à fond plat, à pente longitudinale souvent assez prononcée (jusqu'à 14°), qui sont surtout abondants dans les régions à substratum schisteux, et notamment en Famenne. Le fond plat persiste parfois jusqu'au sommet du versant (Fig. 2). L'étude a montré que ces vallons sont en réalité à section en V, au moins à l'amont, et remblayés sur plusieurs mètres par un dépôt fréquemment lité, dû essentiellement au ruissellement diffus, et entrelardé parfois de langues solifluées.

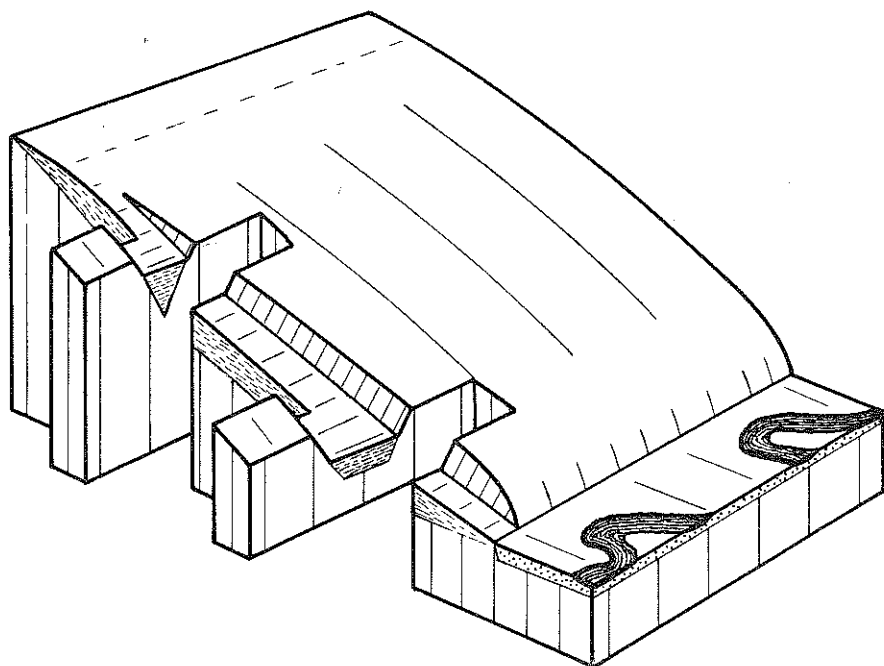


Figure 2. Bloc diagramme schématique de vallons à fond plat et à forte pente longitudinale étudiés en Famenne par E. JUVIGNE (6).

La vallée en V à l'amont, en U à l'aval, a été colmatée par la suite.

#### IV. CONCLUSIONS

L'ensemble des études ici présentées, tout en se rapportant à un sujet unique, apparaît sans doute un peu disparate. Axées sur l'étude des versants, elles ont procédé notamment par l'étude de régions-échantillons, conformément à l'une des méthodes préconisées par la Commission des Versants de l'U.G.I. Ce mode d'étude se trouvait précisément dans la ligne des travaux du Centre National belge de Recherches Géomorphologiques, car dresser une carte géomorphologique détaillée impose, pour établir au préalable une légende convenable, le levé de petites régions réparties dans tout le pays. Ainsi est soulignée une étroite communauté d'intérêt entre la Commission des Versants et la Sous-

Commission des Cartes Géomorphologiques de l'U.G.I., qui s'efforce notamment de promouvoir de tels travaux cartographiques.

Nous l'avons dit au début, l'étude des pentes sur le terrain est complexe et lente. Nous estimons toutefois que les résultats obtenus jusqu'ici aideront à voir plus clair dans la diversité des versants. Ils montrent notamment l'existence de pentes caractéristiques, et précisent la signification des sections concaves, convexes et rectilignes, comme des vallons à fond plat. Ils permettront sans doute de mieux distinguer, dans les versants, les formes d'érosion et d'accumulation, et de ce fait, de fournir des indications sur l'épaisseur probable du manteau de débris. Par cet aspect notamment, ils pourront rendre des services dans le domaine de la Géomorphologie Appliquée.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. DELAHAUT, J. M. — 1964 — *La dépression de Grand Halleux — Etude de géomorphologie.* Mémoire de Licence Sciences Géographiques — Université de Liège. Inédit.
2. DENBLYDEN, J. — 1964 — *Etude de géomorphologie dans la fenêtre de Theux.* Mémoire de Licence Sciences Géographiques — Université de Liège. Inédit.
3. DEUSE, D. — 1963 — *Les terrasses de la Meuse entre Barchon et Dalhem — Etude de géomorphologie.* Mémoire de Licence Sciences Géographiques — Université de Liège. Inédit.
4. FOURNEAU, R. — 1960 — *Contribution à l'étude des versants dans le Sud de la Moyenne Belgique et le Nord de l'Entre Sambre et Meuse. Influence de la nature du substratum.* (Ann. Soc. Géol. Belg. — T. 84, pp. 123-152).
5. JUVIGNE, E. — 1963 — *Etude géomorphologique dans la région de Noisieux.* Mémoire de Licence Sciences Géographiques — Université de Liège. Inédit.
6. JUVIGNE, E. — 1964 — *Etude géomorphologique dans la région de Noisieux.* (Ann. Soc. Géol. Belg. — T. 87, n° 7, pp. B264-270).
7. LAMBERT, J. M. — 1960 — *Contribution à l'étude des pentes du Condroz.* (Ann. Soc. Géol. Belg. — T. 84, pp. 241-250).
8. LAMBION, J. — 1965 — *Le vallon des chantoires — Etude de géomorphologie.* Mémoire de Licence Sciences Géographiques — Université de Liège. Inédit.
9. LAURANT, A. — 1964 — *Etude géomorphologique dans la région de Bertrix.* Mémoire de Licence Sciences Géographiques — Université de Liège. Inédit.
10. LEFEBVRE, J. CL. — 1964 — *La vallée du Bolland entre Herve et Melen. Etude de géomorphologie.* Mémoire de Licence Sciences Géographiques — Université de Liège. Inédit.
11. MACAR, P. — 1946 — *Principes de géomorphologie normale.* Liège, Vaillant-Carmanne, 304 pp.
12. MACAR, P. — 1962 — *Un projet en cours d'étude: l'établissement d'une carte géomorphologique détaillée de la Belgique.* (Zeitschrift für Geomorphologie, Band 6, Heft 3/4, pp. 353-356).
13. MACAR, P. — 1963 — *Etudes récentes sur les pentes et l'évolution des versants en Belgique.* (Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen n° 7, pp. 71-83).
14. MACAR, P. et R. FOURNEAU — 1960 — *Relations entre versants et nature du substratum en Belgique.* (Zeitschrift für Geomorphologie — Supplementband 1, pp. 124-128).

15. MACAR, P. et J. LAMBERT — 1960 — *Relation entre pentes des couches et pentes des versants dans le Condroz (Belgique)*. (Zeitschrift für Geomorphologie — Supplementband I, pp. 129-132).
16. MACAR, P. et A. PISSART — 1964 — *Etudes récentes sur l'évolution des versants effectuées à l'Université de Liège*. (Zeitschrift für Geomorphologie — Supplementband 5, pp. 74-81).
17. PISSART, A. — 1962 — *Les versants des vallées de la Meuse et de la Semois à la traversée de l'Ardenne. Classification des formes et essai d'interprétation*. (Ann. Soc. Géol. Belg. — T. 85, pp. B113-121).
18. PISSART, A. — 1963 — *Des replats de cryoturbation au Pays de Galles (une variété géante de sols en guirlandes)*. (Biuletyn Peryglacialny, n° 12, Lodz, pp. 119-135).
19. ROBERT, P. — 1963 — *Etude de géomorphologie dans la région de Nessonvaux. Essai de cartographie géomorphologique — Etude des terrassettes*. Mémoire de Licence Sciences Géographiques — Université de Liège. Inédit.
20. ROBERT, P. — 1964 — *Quelques problèmes géomorphologiques dans la région de Nessonvaux — Etude des terrassettes*. (Ann. Soc. Géol. Belg. — T. 87, n° 9, pp. B273-293).
21. SERET, G. — 1963 — *Essai de classification des pentes en Famenne*. (Zeitschrift für Geomorphologie — Band 7, Heft 1, pp. 71-85).
22. VANMAERCKE, M. C. — 1965 — *De geomorphologische Kaart van het Zwalmbeekken*. Documents de travail du Centre national de recherches géomorphologiques — volume IV — Diffusion restreinte.

#### SUMMARY

Field studies on valley slopes, dealing with the examination of their shapes and of correlated deposits, have been conducted at Liège University for more than five years. Several methods have been used:

1. the detailed surveying of slope profiles with a statistical analysis of the results;
2. looking for characteristic slopes, occurring with the same inclination in a large region, and their significance;
3. detailed mapping of all the slopes in a limited area;
4. valley-slope studies under different climates.

Several results, some with important implications, were obtained. The main ones are:

1. groups of plane slope facets gather around the same slope inclinations, each of which seems to represent an equilibrium value for process and material;
2. convexities are erosional forms, the minimum curvature of which seems to be their most important characteristic;
3. erosional concavities are as frequent as accumulation ones;
4. flat floored dales with a rather steep longitudinal profile, which are frequent in the Famenne region, are due to the filling of V-shaped valleys.

A. J. PANNEKOEK<sup>1</sup>

#### THE RIA PROBLEM

THE RÔLE OF ANTECEDENCE, DEEP WEATHERING, AND PLEISTOCENE SLOPE-WASH IN THE FORMATION OF THE WEST-GALICIAN RIAS

#### The problem

The problem posed by the West-Galician rias, which once served VON RICHTHOFEN (1886) as prototypes for drowned valleys in a submerged coast, is that they actually show evidence of uplift as well as of submergence. CARLÉ (1947) clearly stated that the "enigma of the rias" lies in "the contradiction between the assumedly drowned valleys and the rising land", and BIROT & SOLÉ SABARIS (1954) describe the relief of this area as embarrassing and disordered, discouraging any attempt at an explanation.

This applies to the middle section of the coast (Fig. 1) where the four large rias are found, penetrating some 30 km into the land and separated by peninsulas containing mountain massifs more than 600 m high. Any attempt at an explanation should, however, also account for the differences between this area and the sections without true rias to the north and south of it. Towards the north, the so-called Galician peneplain extends to a steep, though indented, coast, whereas towards the south the rectilinear Portuguese coast is accompanied by elevated abrasion platforms (TEIXEIRA 1949).

Most authors have sought the solution of the problem by assuming an alternation of uplift and subsidence both in time and in space. SCHEU (1913) went no further than to admit a subsidence of the ria coast by a simple tilting along a N-S axis. TEIXEIRA (1944) envisaged a partition of the coastal strip into blocks uplifted to various heights, the uplift being least in the ria area and increasing to the south; TORRE ENCISO (1958) gave a more differentiated picture of such blocks. CARLÉ (1947) put forward the idea of a separate relative subsidence of each of the rias with respect to the rising peninsulas between them; later, the rias took part in a general uplift of which the 'raised beaches' around the rias are a result. This idea was further elaborated by BIROT & SOLÉ SABARIS (1954) who accepted an early rift-like subsidence of each of the rias and a later subsidence of the whole ria area with respect to the northern and southern sections. This led COTTON (1956) to rehabilitate the West-Galician rias to the status of true rias in the sense of VON RICHTHOFEN, i.e. as determined by mountain ranges parallel to the rias and perpendicular (or oblique) to the coast.

Although most authors admit that the rias, with depths of no more than 70 m, must have been dry during at least the later glacial phases, they apparently do not think that denudation and erosion during these cold periods, with their low stand of the sea-level, sufficed to erode the valleys that were transformed into rias after each rise of the sea-level; accordingly, some form of tectonic subsidence is invoked to explain their existence. As expressed by BIROT & SOLÉ SABARIS (1954, p. 53), the answer to the question "depends on our evaluation of the volume taken away by erosion during a glacial period".

Among the authors who have studied this area, MENSCHING (1961) seems to be the only one who directly attributes the rias to erosion during glacial phases. He claims to have observed an almost complete set of marine terraces, unaffected by differential movements, in northern Galicia (Ria de Foz), and assumes the same for the West-Galician rias. Already TEIXEIRA (1949) and especially NONN (1958) observed that at

<sup>1</sup> Professor of Physical Geology, University of Leyden, The Netherlands.