

VARIATIONS SAISONNIERES DU CREEP SUPERFICIEL
EN REGION TROPICALE HUMIDE
(LUPUMA, SHABA, ZAÏRE)

Seasonal superficial Soil Creep
in a Tropical Environment
(Lupuma, Shaba, Zaïre)

J. SOYER *

ABSTRACT

Movements in the uppermost 10 cm soil mantle along a savanna woodland covered hillslope were monitored by T-plates during 2 years. Superficial creep is strongly seasonal with two periods of maximal relative movements at the beginning and at the end of the rainy season when the largest changes in moisture content occur. Downslope tilting of plates generally happens in wetting stages after recent rains ; upslope tilting usually occurs during drying stages. Quick response to individual rains was checked by rainfall simulations. However, in natural conditions, many other factors than the migration of the wetting front are involved, as the 17 plates never moved all in the same direction at the same time. Most important plate tilts were not measured on the upper 29 - 31° section of the hillslope but on the 23 - 26° median part, probably in relation to the thickness of loose material and texture, as well as drainage properties. Trends in local creep movements along hillslope profile are consistent from one year to the other, enlightening present-day morphogenic evolution.

RESUME

Les mouvements affectant les 10 cm supérieurs du sol ont été observés pendant deux ans par la mesure des déplacements angulaires d'une série de plaques en T échelonnées du sommet à la base d'une colline. Le creep superficiel est fortement saisonnier, avec deux périodes de mouvements différentiels importants au début et à la fin de la

* Département de Géographie, Université de Lubumbashi, B.P. 1825, Lubumbashi, Zaïre.
Actuellement, Laboratoire de Géomorphologie tropicale, Université de Liège, 7, place du XX Août, B - 4000, Liège.

saison des pluies, lorsque les changements de la teneur en eau du sol sont les plus grands. Un basculement généralisé des plaques vers le bas de la pente a tendance à se produire pendant la saison des pluies après quelques jours pluvieux. Un basculement opposé vers le haut de la colline se produit plutôt après une séquence de jours pas ou peu arrosés. Les effets rapides d'averses successives ont été vérifiés par des expériences de simulation de pluie. Dans les conditions naturelles, de nombreux facteurs interviennent en plus de la migration d'un front d'humectation, puisqu'on n'a jamais relevé au cours d'une même période un basculement de l'ensemble des 17 plaques dans une même direction. Les basculements les plus importants n'ont pas été mesurés dans la partie supérieure à pente raide (29 - 31°) de la colline, mais bien dans la section médiane aux pentes de 23 à 26°, probablement en relation avec l'épaisseur du manteau de débris et sa texture, ainsi qu'avec les propriétés du drainage. Les caractères des mouvements superficiels du sol sont restés semblables en un même endroit d'une année à l'autre, révélant ainsi les tendances locales de l'évolution morphogénétique actuelle.

INTRODUCTION

Les lents mouvements de masse qui affectent le régolithe et les sols sur les pentes ont été répartis par TERZAGHI (1950) en creep continu, dû à la gravité, et en creep saisonnier provoqué par diverses causes occasionnelles et variables de nature principalement météorologique comme les alternances de gel-dégel ou d'humectation-dessiccation. Les cycles d'expansion et de contraction entraînent ainsi un déplacement des particules du sol en zig-zag dont le comportement théorique a été notamment analysé par DAVISON (1889) puis par KIRKBY (1967). Comme le déplacement réel des composants du sol ne s'effectue pas toujours vers le bas de la pente, CULLING (1963, 1965, 1983 a, 1983 b) a développé une théorie sur l'action aléatoire de nombreuses petites forces dans le sol, induites par exemple par la bioturbation ou l'altération, qui provoquent le déplacement des particules des zones de potentiel énergétique plus grand vers des zones de potentiel plus faible. Diverses techniques de mesure du creep ont été utilisées (STATHAM, 1981), dont les plus connues sont les tranchées de YOUNG (1960), les tiges en T de KIRBY (1967), les cylindres ou anneaux de RUDBERG (1958), les cônes de SELBY (1966) ou les tubes flexibles d'ANDERSON & FINLAYSON (1975).

Sur une colline des environs de Lubumbashi, les techniques des piquets, des plaques en T et des colonnes d'anneaux dans le sol ont

été utilisées. Dans la présente étude, on s'attachera seulement aux enseignements sur le creep superficiel qu'ont livré les mesures des plaques en T pendant deux ans (novembre 1983 à novembre 1985).

Le Shaba méridional est caractérisé par un climat tropical à deux saisons très contrastées et permet de mettre ainsi particulièrement en évidence l'influence des variations d'humidité du sol sur la saisonnalité du creep. En outre les mouvements du sol ont été observés de haut en bas d'une colline afin de mieux percevoir les relations du creep superficiel avec la pente et la position sur le versant. Les résultats seront donc présentés sous l'aspect temporel puis spatial en vue de mieux comprendre la dynamique du creep dans les régions tropicales.

Site d'étude

Les observations ont été effectuées sur la colline de Lupuma, située à 28 km au NNE de Lubumbashi, à proximité de la route de Kasenga. Elle culmine à 1.281 m et domine d'environ 80 m une surface d'aplanissement où coule, à quelques centaines de mètres de son pied, la Luiswishi. Elle est formée de grès et de schistes gréseux précambriens du Kundelungu inférieur, dont la résistance est renforcée par la présence de nombreux filonnets de quartz et d'hématite. Le sol est texturalement hétérogène avec localement des blocs, des cailloux et une charge graveleuse abondante en profondeur. La colline est couverte d'une forêt claire (miombo) à *Brachystegia taxifolia*, *Uapaca nitida*, *Monotes katangensis* et *Diplorynchus mozambicensis*. La strate herbacée est peu dense mais continue, en sorte que même si la litière est très peu épaisse en raison du passage périodique des feux de brousse, la partie supérieure du sol contient cependant un abondant chevelu radicaire.

Lupuma reflète la morphologie typique des collines résiduelles de la région (SOYER & KAKISINGI, 1981).

D'un sommet étroit, une convexité nette mène aux pentes les plus fortes (32 - 29°), suivies d'une section régulière (26 - 23°) puis d'une large concavité basale conduisant au pédiment de pente inférieure à 3° (fig. 1).

Un pluviographe CASELLA à enregistrement quotidien a été installé au pied de la colline de Lupuma. On y a relevé 1.105 mm pendant la saison des pluies 1983-84 et 1.135 mm en 1984-85, c'est-à-dire une pluviométrie un peu inférieure à la moyenne de 1.237 mm ($\sigma = 186$ mm) établie

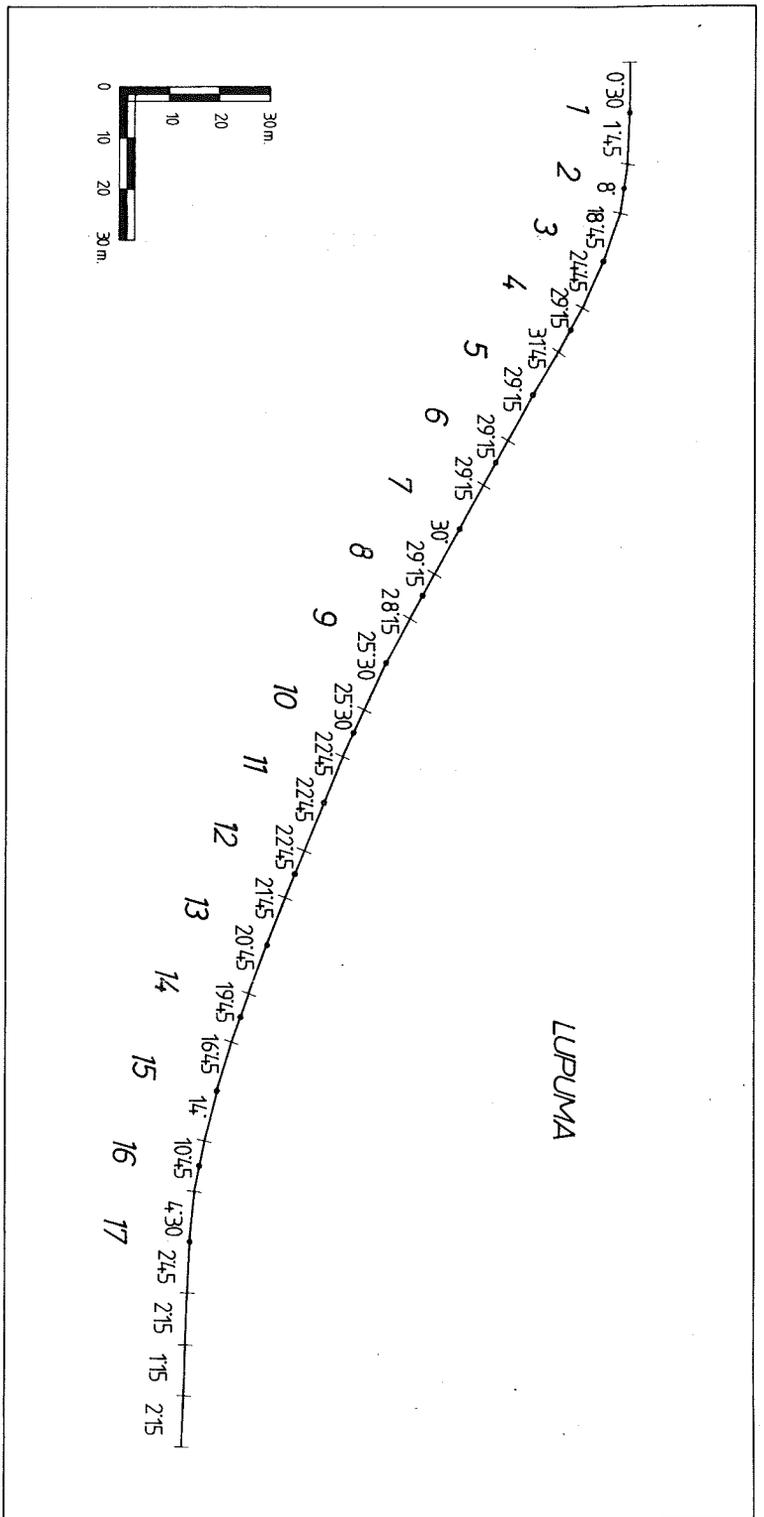


Fig. 1 : Profil topographique, sans exagération des hauteurs, du secteur étudié sur la colline de LUPUMA. Les pentes, exprimées en degrés, ont été mesurées à l'éclimètre BREITHAUPT sur des tronçons successifs de 10 m. Les 17 plaques en T dont la position est représentée par un point ont été insérées tous les 15 m.

sur 64 ans à Lubumbashi (SOYER & NTOMBI, 1982).

Méthodes et techniques

Un secteur régulier de la colline de Lupuma non influencé par des têtes de vallon a été choisi et 17 plaques en T ont été placées tous les 15 m du sommet à la base (fig. 1).

Le type d'instrument utilisé est apparenté à l'inclinomètre d'EVANS (1967), qui dérive lui-même des piquets en T de KIRKBY (1963). Il est constitué d'une plaque métallique sur le haut de laquelle est fixée une pièce en V au sommet de laquelle est soudé le support d'un niveau à bulle de précision (fig. 2).

Chaque plaque a 20 cm de large et a été placée perpendiculairement à la ligne de plus forte pente, avec un enfoncement de 10 cm dans le

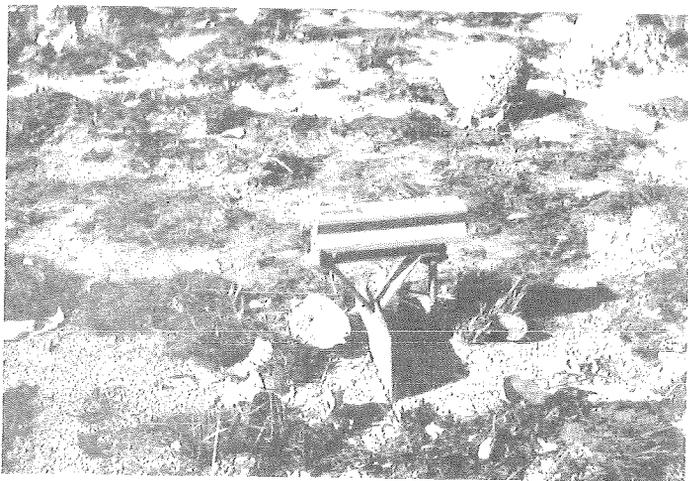


Fig. 2 : Plaque en T, large de 20 cm, enfoncée verticalement de 10 cm dans le sol. On aperçoit la barre horizontale soudée à la plaque par deux lames en V, sur laquelle on pose le niveau de précision (1 graduation = 1 minute d'arc). D'un côté se trouve une encoche permettant un positionnement précis du niveau et de l'autre une tige filetée calée par une vis papillon, qui permet le rattrapage de l'horizontalité du niveau.

sol (*). L'insertion des plaques a été faite de manière à perturber le moins possible le sol. Les plaques ont été en effet introduites dans une fente ouverte par enfoncement au marteau d'une machette.

Les variations d'inclinaison des plaques ont été mesurées par un niveau d'ingénieur dont les graduations équivalaient à 0,3 mm/m, soit 1 min.d'arc. Les lectures ont été faites au dixième de division. Dans les cas de faibles changements d'inclinaison, chaque mesure représente la moyenne d'au moins 5 lectures ne divergeant pas de plus 0,2 division (théoriquement 12 sec. d'arc). Dans le cas, relativement peu fréquent, de basculements supérieurs à 0,3 % ou 10 min. d'arc, la mesure se faisait par rattrapage de l'horizontalité au moyen d'une vis latérale dont le pas avait été préalablement calibré.

Le principal inconvénient de la technique des plaques en T (STATHAM, 1981) est que la position exacte de l'axe du pivot autour duquel s'effectue le déplacement angulaire objet de la mesure n'est pas connu. Ce type d'appareil n'est donc pas adapté à l'observation des vitesses réelles du creep, d'autant plus que le frottement et le poids de l'instrument ralentissent les mouvements. En outre l'orientation de la plaque suivant une direction déterminée préjuge du sens réel des mouvements de creep. Enfin la partie épigée de l'instrument risque d'être heurtée par des animaux ou manipulée par l'homme. Malgré ces inconvénients, ce type d'instrument possède d'importants avantages. Outre sa simplicité et sa robustesse, il permet surtout de faire des mesures comparatives très précises entre de nombreux endroits en peu de temps. Il est donc possible de recueillir des observations fréquentes sur l'évolution spatio-temporelle d'un phénomène qui a été pourtant spécifiquement défini comme "imperceptible" (SHARPE, 1938).

A Lupuma, les 17 plaques en T ont été installées en novembre 1983 en début de saison des pluies. Après une période de stabilisation de 15 jours, les mesures ont été faites toutes les semaines, sauf durant la deuxième saison sèche puisqu'il était apparu que les mouvements y étaient particulièrement faibles. Au total, 87 séries de mesures ont été réalisées.

(*) En effet, d'après les études déjà consacrées au creep sous divers climats, les couches superficielles du sol sont en général les plus actives et sont normalement sujettes aux mouvements les plus importants.

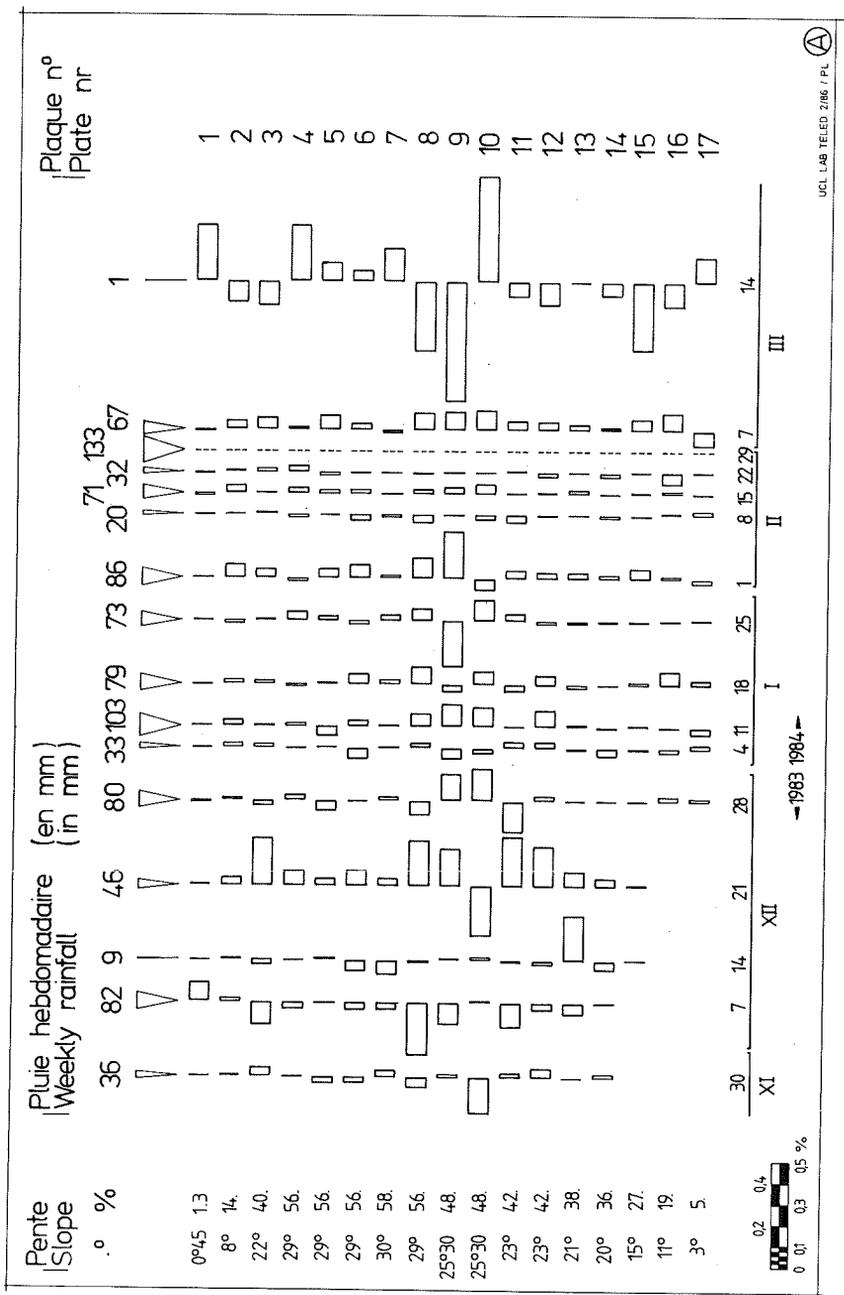
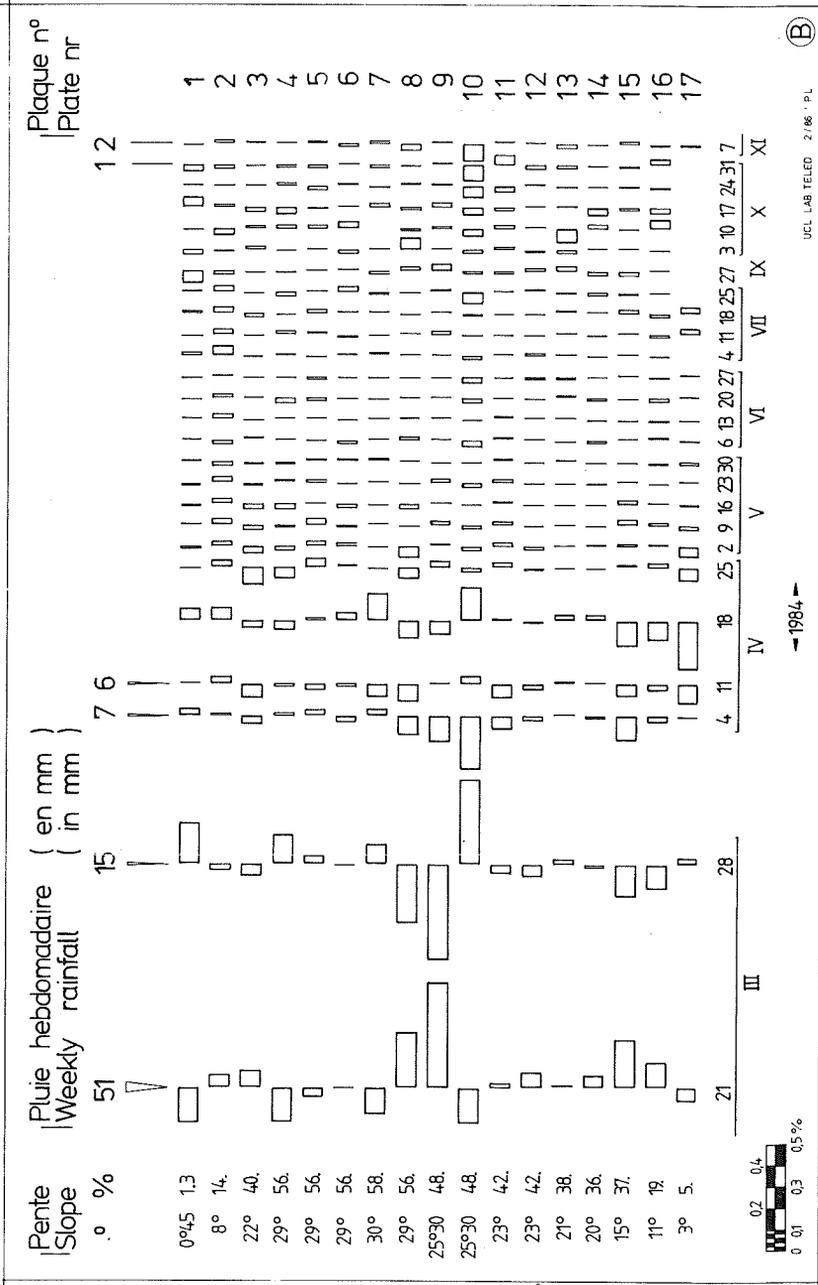


Fig. 3 A : voir légende page 143.



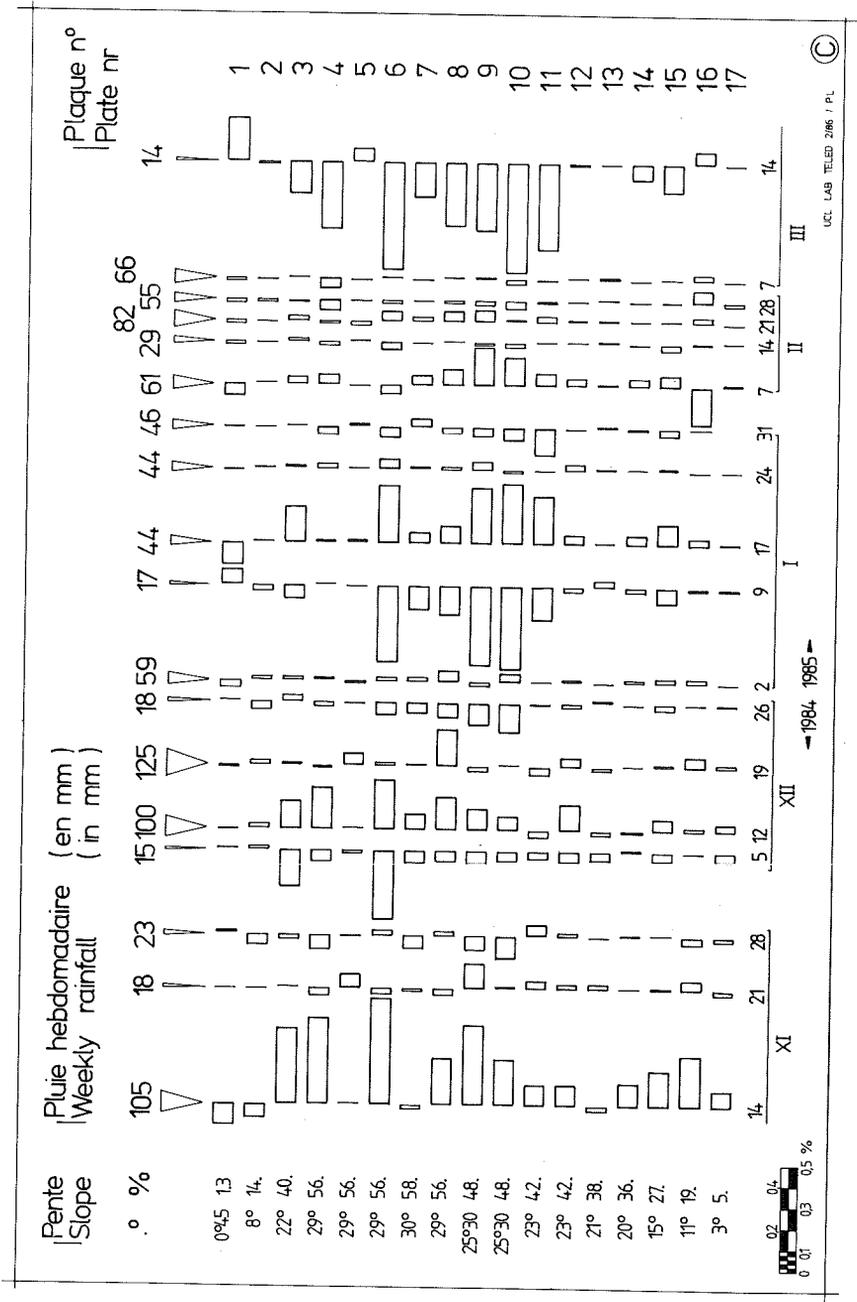
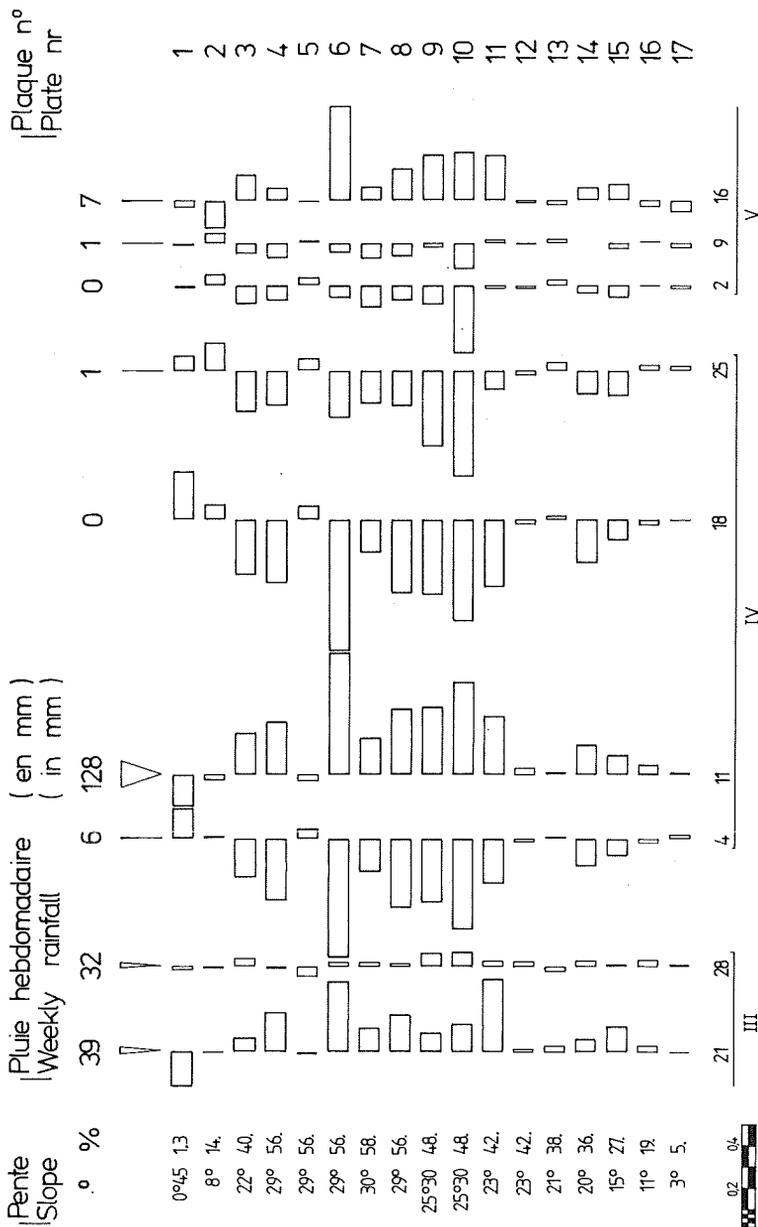
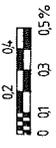


Fig. 3 B et C : voir légende page 143.



UCL LAB TELED 206 / PL. (D)

IV
→ 1985 ←



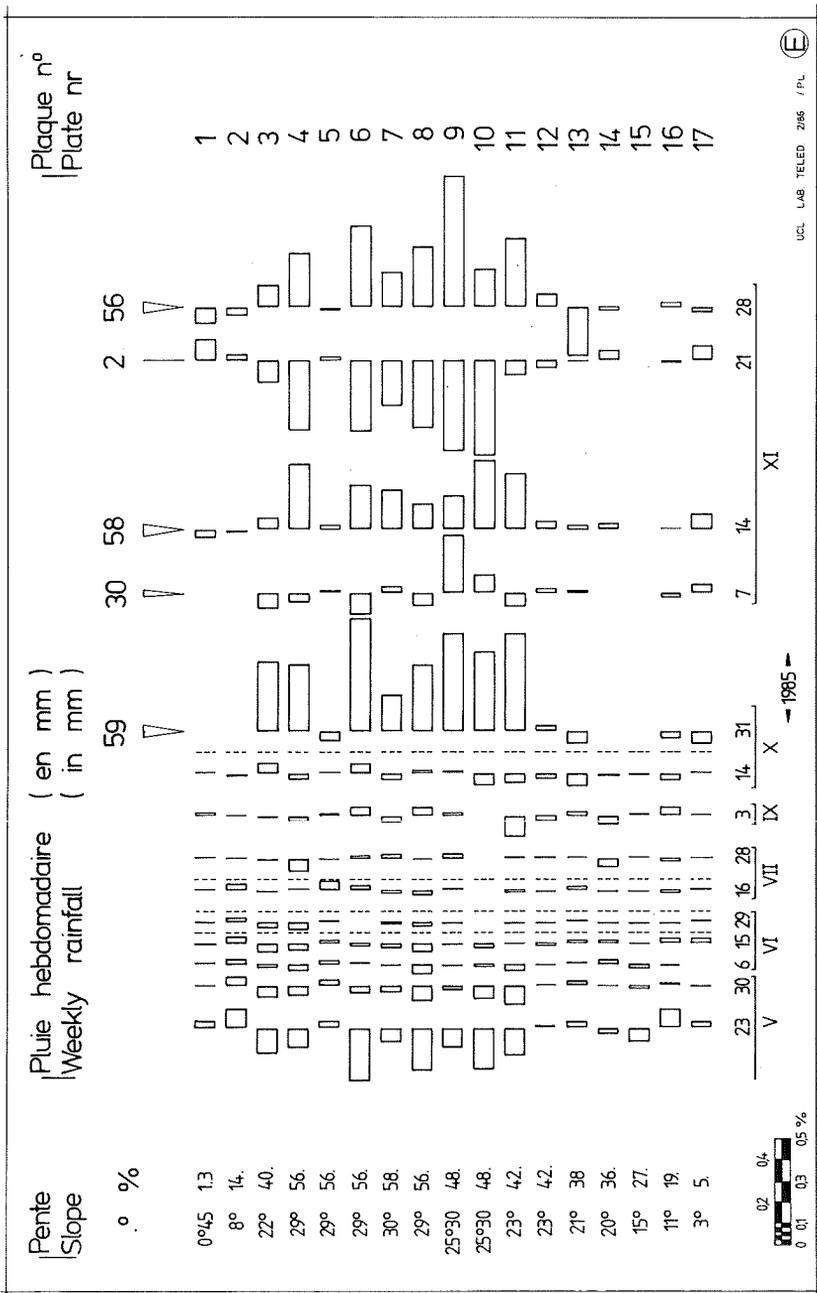


Fig. 3 : Variations des déplacements angulaires des plaques en T du haut (plaque 1) au bas (plaque 17) de la colline de IUPUMA. Une barre orientée vers la droite indique un basculement vers le bas de la pente par rapport à la situation de cette plaque lors de la mesure précédente. Une barre orientée vers la gauche indique un basculement vers le sommet de la colline. La quantité totale de pluie tombée entre 2 séries de mesures successives est représentée par un triangle isocèle; la hauteur de la lame d'eau, en mm, est indiquée au-dessus de chaque triangle.

En octobre 1984 (fin de saison sèche), trois autres plaques en T ont été placées à mi-versant sur des pentes comprises entre 45 et 50 % (24 à 27°) aux fins d'expériences de simulation de pluie. Des enclos carrés de 60 cm de côté, bordés par des feuilles de plastique, ont été délimités autour des plaques. Pour éviter le splash et le ruissellement, de très fines gouttelettes ont été projetées par un pulvérisateur. Les effets d'averses artificielles successives ont été ainsi observés de même que les conséquences de précipitations équivalentes au total pluviométrique annuel de la région.

La teneur en eau du sol a été mesurée régulièrement à partir de décembre 1984 par la méthode pondérale. Les échantillons de sol prélevés à environ 8 cm de profondeur et débarrassés des graviers, des gravillons et des radicelles ont été séchés à 105° C pendant au moins 48 heures et l'humidité a été exprimée en pourcentage du poids sec.

Résultats

Une synthèse des résultats est présentée sur la figure 3. Le changement d'inclinaison de chaque plaque par rapport à la mesure précédente a été indiqué avec une barre dirigée conventionnellement vers la gauche (signe -) dans le cas d'un mouvement relatif vers le haut de la pente et vers la droite (signe +) dans le cas d'un mouvement relatif vers le bas de la pente. La quantité cumulée de pluie tombée dans l'intervalle entre deux séries de mesures a été représentée par un triangle isocèle avec la valeur numérique en mm arrondie à l'unité la plus proche.

Variations temporelles

Les mouvements dans la partie superficielle du sol apparaissent marqués d'une très forte saisonnalité. On constate en effet (fig. 3) que les périodes de mouvements les plus importants se produisent d'une part à la fin d'octobre et en novembre et d'autre part en mars et en avril, c'est-à-dire au début et à la fin de la saison des pluies.

Du point de vue du creep superficiel l'année peut se subdiviser en réalité en 5 parties : la saison sèche et 4 périodes en saison des pluies.

Les caractères typiques de la saison sèche s'observent sur environ la moitié de l'année, à partir de trois ou quatre semaines après les dernières pluies, soit fin avril en 1984 ou début juin en 1985.

Les mesures des plaques révèlent des mouvements extrêmement réduits, inférieurs en moyenne à 0,02 % (40 sec. d'arc) d'inclinaison par semaine. Un grand nombre d'observations a été effectué en 1984 et cependant aucun mouvement local supérieur à 0,055 % par semaine n'a été enregistré durant cette période. Cela signifie que la bioturbation tant animale que végétale, les écarts de température, la formation de rosée, l'évapotranspiration, bref tous les facteurs qui jouent un rôle à ce moment n'ont aucun effet comparable à ceux causés directement ou indirectement par la pluie. Cette période de creep excessivement faible se termine en octobre ou en novembre avec les premières pluies. Il est apparu que lorsque les averses sont très faibles, de quelques mm seulement, comme on en a observé en 1984, elles n'ont guère de conséquences sur le creep superficiel.

La première période de la saison des pluies s'étend sur une durée assez brève (une semaine en 1984, un mois en 1985), principalement en novembre, dès que des précipitations de quelques dizaines de mm sont enregistrées. Les déplacements angulaires sont en moyenne dix fois plus importants (0,2 % par semaine) qu'en saison sèche. La majorité des plaques basculent vers le bas de la pente.

La deuxième période comprend décembre et janvier qui correspondent aux deux premiers mois de pleine saison des pluies. Durant cette période, les mouvements enregistrés sont très variables, en valeur absolue et en sens.

La troisième période est à nouveau assez brève, de l'ordre de 3 ou 4 semaines, entre fin janvier et début mars. Malgré des précipitations aussi abondantes que durant la période précédente, les déplacements angulaires sont très faibles, avec des valeurs moyennes de 0,007 à 0,031 % par semaine.

Enfin la quatrième période est caractérisée par les mouvements superficiels les plus importants de toute l'année. Cette période a commencé à la mi-mars durant les deux années d'observation pour s'achever à la mi-avril en 1984 et à la fin mai en 1985. Des déplacements hebdomadaires de 0,3 à 0,5 % avec un maximum de 0,67 % (environ 1/3 de degré) ont été observés, particulièrement dans la partie médiane du flanc de la colline. Comme cela ressort particulièrement des mesures effectuées en 1985, la majorité des basculements sont dirigés vers le haut de la pente. Durant cette période, les pluies s'atténuent, s'espacent et cessent.

La dynamique du creep superficiel n'est donc pas seulement conditionnée par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies. Les mesures d'inclinaison des plaques mettent en évidence des contrastes de mobilité du sol superficiel au cours même de la saison des pluies. Les mouvements peuvent changer notamment de sens d'une semaine à l'autre, comme par exemple lors des situations relevées les 14, 21 et 28 mars 1984 ou encore les 9 et 17 janvier, les 14 et 21 mars, les 4 et 11 avril ou les 16 et 23 mai 1985. Ces inclinaisons alternées des plaques révèlent que tantôt la couche subsuperficielle du sol se déplace plus rapidement que la couche superficielle (mouvement négatif (-), basculement vers le haut de la pente), tantôt c'est l'inverse (mouvement positif (+)).

Le tableau I établit le bilan algébrique des mouvements des plaques. On constate qu'après deux ans les mouvements cumulés indiquent un basculement vers le bas de la colline dans 10 cas sur 17 seulement. Au cours des différentes périodes, les mouvements ne sont pas systématiquement orientés dans un sens déterminé bien qu'on constate une forte majorité de mouvements positifs en début de saison des pluies et une dominance de mouvements négatifs en fin de saison des pluies, surtout en 1985. D'importants déplacements angulaires des plaques étant liés à des vitesses de creep superficiel plus grandes par rapport au creep subsuperficiel, il est probable qu'à un front d'humectation progressant de la surface vers la profondeur en début de saison des pluies soient associés des mouvements positifs, tandis que lorsque la couche superficielle se dessèche les mouvements deviennent davantage négatifs. Comme ce phénomène de mouvements opposés apparaît aussi au cours de la saison des pluies cela laisserait soupçonner de rapides changements dans les mouvements relatifs des particules du sol à différentes profondeurs. Ces modifications sensibles de l'état du sol sont vraisemblablement à mettre en relation avec la succession des averses. Ainsi la dynamique du creep superficiel serait étroitement liée à la distribution temporelle des pluies et pas tellement à leur volume. On reviendra sur ce point dans la discussion, à la lumière des enseignements fournis par les expériences de simulation de pluie.

L'examen synoptique des résultats montre déjà qu'une quantité élevée de pluie ne provoque pas nécessairement des basculements importants des plaques. Les exemples abondent à cet égard : ainsi, les déplacements hebdomadaires relevés le 19.12.1984 sont tous sauf un inférieurs à 0,05 % malgré des précipitations de 125 mm; le mouvement maxi-

Plaque s Périodes Saison sèche Saison des pluies

	I		II		III		IV		Total
	A	B	A	B	A	B	A	B	
1	a	+ 31	- 113	+ 88	- 35	+ 53	+ 391	+ 444	
	b	+ 18	- 13	- 152	- 296	- 68	+ 308	- 56	
	c		+ 5						+ 393
2	a	+ 339	+ 407	+ 199	+ 367	+ 91	+ 290	+ 37	+ 327
	b	+ 103	+ 88	- 40		- 27	+ 340	+ 268	+ 608
	c								+ 1.023
3	a	- 185	+ 174	+ 186	+ 332	+ 89	+ 461	- 202	+ 259
	b	- 56	+ 255	+ 158		+ 40	+ 372	- 678	- 306
	c								
4	a	- 171	+ 234	+ 101	+ 282	+ 52	+ 153	+ 200	+ 353
	b	- 209	+ 292	+ 48		- 136	+ 146	- 857	- 711
	c								
5	a	+ 181	+ 187	- 5	+ 293	+ 71	+ 66	+ 99	+ 165
	b	+ 45	+ 39	+ 106		- 26	+ 267	+ 259	+ 526
	c								
6	a	+ 75	+ 577	+ 20	+ 306	+ 19	+ 39	+ 46	+ 85
	b	+ 118	+ 802	- 271		- 10	+ 296	- 941	- 645
	c								
7	a	+ 8	- 9	+ 58	- 21	- 34	+ 24	+ 223	+ 247
	b	- 98	+ 242	- 12		+ 11	- 10	- 534	- 544
	c								
8	a	+ 47	+ 269	+ 162	+ 521	+ 55	+ 217	- 612	- 395
	b	- 75	+ 264	+ 252		+ 31	+ 552	- 889	- 337
	c								
9	a	+ 257	+ 380	+ 250	+ 650	+ 169	+ 419	- 713	- 294
	b	+ 48	+ 1085	+ 13		+ 23	+ 673	- 872	- 199
	c								+ 640

10	a	- 636	+ 219	- 417	- 56.	- 225	- 642	+ 169	+ 113	+ 666	+ 779	- 1.278
	b	- 91	+ 514	+ 423				- 73	- 715	- 1765	- 2480	
	c											
11	a	+ 212	+ 97	+ 309	+ 115	- 19	+ 290	+ 17	+ 132	- 223	- 91	+ 544
	b	- 182	+ 913	+ 731				+ 8	+ 298	- 394	- 96	
	c											
12	a	- 33	+ 97	+ 64	+ 374	+ 233	+ 297	+ 18	+ 392	- 155	+ 237	+ 564
	b	- 67	+ 111	+ 44				+ 9	+ 306	- 23	+ 283	
	c											
13	a	- 61	- 25	- 86	+ 236	+ 21	- 65	+ 51	+ 287	+ 58	+ 345	+ 199
	b	- 1	- 256	- 257				+ 33	- 32	+ 143	+ 111	
	c											
14	a	- 131	+ 109	- 22	- 18	+ 63	+ 41	- 26	- 44	- 5	- 39	- 328
	b	- 71	+ 59	- 12				+ 16	+ 25	- 302	- 277	
	c											
15	a	+ 7	+ 171	+ 178	+ 90	+ 87	+ 265	+ 60	+ 150	- 550	- 400	- 503
	b	- 27		- 27				- 31	+ 234	- 310	- 76	
	c											
16	a	- 58	+ 247	+ 189	+ 86	+ 68	+ 121	+ 58	+ 144	- 271	- 127	+ 270
	b	- 3	- 46	- 49				+ 118	+ 239	+ 207	+ 446	
	c											
17	a	- 70	+ 74	+ 4	+ 12	- 26	- 22	- 51	- 39	- 305	- 344	- 284
	b	+ 37	+ 94	+ 131				- 29	- 51	- 20	- 71	
	c											
Nombre de semaines	a	29	1		10			5		6	21	
	b				12			4		12	58	
	c	19	6								25	

Tab. I : Bilan algébrique des déplacements angulaires des plaques (en ‰). A : déplacement; B : Bilan partiel.
Périodes a : du 30 novembre 1983 au 18 avril 1984; b : du 25 avril 1984 au 30 mai 1985; c : du 6 juin 1985
au 28 novembre 1985.

mal mesuré le 11/1/84 a été de + 0,11 % après 103 mm de pluie hebdomadaire; les mouvements mesurés après 86 mm, 82 mm et 80 mm de pluies hebdomadaires les 1/2/85, 7/12/84 et 28/12/84 n'ont pas dépassé en général 0,05 %.

Inversément, après des pluies totalisant moins de 2 mm sur une semaine, on a mesuré des mouvements relativement importants de l'ordre de 0,3 %, comme par exemple le 18/4/85, le 25/4/85, le 21/11/85 ou le 14/3/84.

Si la technique utilisée met particulièrement en évidence la différence des forces s'exerçant sur les parties supérieure et inférieure des plaques, il est clair qu'on ne peut en déduire tous les aspects réels du creep. Si, en pleine saison des pluies, on n'a relevé que des basculements de faible amplitude entre fin janvier et début mars, cela n'implique évidemment pas que le sol se déplace peu durant cette période. Il se pourrait en effet que la totalité des 10 cm où sont ancrées les plaques glissent vers le bas de la pente. Une batterie de plaques de longueur croissante pourrait le montrer ou mieux encore un tube flexible (ANDERSON & FINLAYSON, 1975) enfoncé jusqu'au substrat rocheux.

Avant de pousser plus avant l'interprétation des caractères du creep superficiel en saison des pluies, il importe d'abord d'examiner l'aspect spatial du phénomène du sommet à la base de la colline.

Variations spatiales

L'examen d'ensemble des données de Lupuma montre que certains endroits sur la colline présentent des caractères particuliers. Ainsi, les mesures de la plaque 5 mettent en évidence des déplacements angulaires généralement réduits, dont le sens est en outre souvent contraire à celui des plaques situées au-dessus et en-dessous d'elle le long du profil. De même, la plaque 13 a connu des mouvements d'inclinaison presque toujours très faibles et de sens souvent opposé à celui des plaques situées au-dessus.

La comparaison des données regroupées sur la figure 3 permet ainsi de subdiviser le système des pentes le long du profil étudié en unités distinctes :

- a) la plaque 1 sur le sommet de la colline a connu des déplacements angulaires extrêmement faibles pendant la première saison des pluies puis d'importants mouvements, de l'ordre de 0,2 % en fin de saison

des pluies (mars 1984). Après la stabilité de la saison sèche, la plaque a été soumise à des mouvements presque constamment négatifs jusqu'à une nouvelle période de mouvements importants à la fin de la seconde saison des pluies, qui ont finalement abouti à redresser la plaque.

- b) la plaque 2 est implantée dans la convexité sommitale de la colline. Pendant 10 mois d'abord (jusqu'au 13/9/84), 86 % des mesures ont été positives; ensuite il y a eu 2 mois de déplacements angulaires surtout négatifs, suivis d'une relative stabilité jusqu'à mi-avril 1985 et enfin une reprise de la tendance très nette aux déplacements angulaires positifs.
- c) les plaques 3 et 4 ont connu une évolution variée avec des successions de mouvements généralement concordants.
- d) la plaque 5 se caractérise d'abord, on l'a vu, par la faiblesse des déplacements angulaires. Pendant les deux années d'observation, ceux-ci n'ont en effet jamais dépassé hebdomadairement 0,09 %. La tendance générale a été celle d'un basculement de la plaque vers le bas de la pente avec une majorité nette (66 %) de mouvements positifs.
- e) les plaques 6 à 11 ont donné lieu aux déplacements angulaires les plus importants en valeur absolue. A la fin des saisons des pluies, des mouvements hebdomadaires de 0,3 à 0,5 % étaient fréquents. Dans le détail, il existe toutefois de nombreuses différences, mais c'est au niveau de ces plaques qu'on a le mieux remarqué les effets des agents atmosphériques.
- f) les plaques 12, 13 et 14 ont révélé des mouvements généralement faibles, avec des déplacements angulaires rarement supérieurs à 0,1 %. Ces plaques ont connu des phases prolongées de mouvements tantôt positifs, tantôt négatifs.
- g) les plaques 15, 16 et 17 ont enfin révélé une évolution concordante avec des mouvements d'importance moyenne aux périodes de fin de saison des pluies. Les périodes de stabilité, de mouvements à tendance négative ou positive correspondent assez bien entre elles.

Cette analyse fort schématique permet cependant de tirer quelques enseignements intéressants.

Il n'y a apparemment pas de relation directe entre l'importance des mouvements de creep superficiel mis en évidence par le basculement des plaques et la valeur de la pente. Les déplacements angulaires les plus élevés n'ont pas été systématiquement mesurés au niveau des plaques 4 à 8 situées sur les tronçons les plus raides. Au contraire, un des secteurs les plus raides où est localisée la plaque 5 (29 °) a connu les déplacements angulaires les plus faibles. Inversement, des secteurs de pentes modérées comme en bas de la colline ou sur le sommet presque plat ont connu des variations très sensibles d'inclinaison de plaques. Il serait donc exclu à partir des données de Lupuma de formuler une loi stricte déterminant la valeur du creep superficiel en fonction de la pente.

Ces mouvements de creep ne paraissent cependant pas aléatoires, les caractères de la mobilité du sol au niveau de chaque plaque ont été très cohérents au cours des deux années d'observation. Il ressort ainsi clairement que dans le cas de Lupuma c'est dans la partie moyenne du flanc de la colline que les mouvements différentiels dans les couches superficielles du sol sont les plus accusés. Cette partie centrale est encadrée par des secteurs à mouvements différentiels faibles. Il est donc possible de mieux percevoir la dynamique réelle d'un versant. Chaque endroit ne réagit pas de manière indépendante aux divers processus responsables du creep. La couverture de débris superficiels se déplace sur l'ensemble du versant à des vitesses différentes avec ralentissement apparent à certains niveaux, peut-être causé par un relèvement local du substrat rocheux, et accélération à d'autres où une forme très atténuée de glissement se produit sans doute.

Ces interprétations pourront être confirmées lorsqu'une excavation au site de chaque plaque permettra de mieux connaître la composition du sol à cet endroit, sa pierrosité et sa structure.

DISCUSSION

Au long des deux ans d'observation, on n'a jamais relevé, à l'occasion d'une série de mesures effectuées le même jour, des déplacements angulaires qui étaient orientés tous dans le même sens par rapport à la situation lors de la mesure précédente. Cela montre bien la complexité des phénomènes responsables du creep superficiel. Ainsi, malgré la saisonnalité très accentuée des mouvements, qui a bien montré que le principal facteur est la pluie, ou plus précisément les variations d'humid-

dité du sol, il n'y a pas d'effet strictement identique et prédominant en tous les points du profil.

La combinaison de multiples facteurs entraînera donc une grande variété dans le sens du basculement des plaques à un moment donné. L'histogramme de la figure 4 montre bien que seules les situations extrêmes sont exclues. Par contre, on a relevé toutes les situations intermédiaires. Il y a pratiquement autant de cas (50,6 %) où le nombre de plaques à déplacement angulaire vers le haut de la colline est majoritaire que l'inverse. A Lupuma, on n'a donc pas observé systématiquement une vitesse de la couche superficielle du sol supérieure à celle de la couche subsuperficielle, sinon on aurait enregistré une dominance de mouvements positifs.

Puisque des facteurs sans doute locaux influencent la mobilité relative des couches superficielles du sol, il convient de considérer un

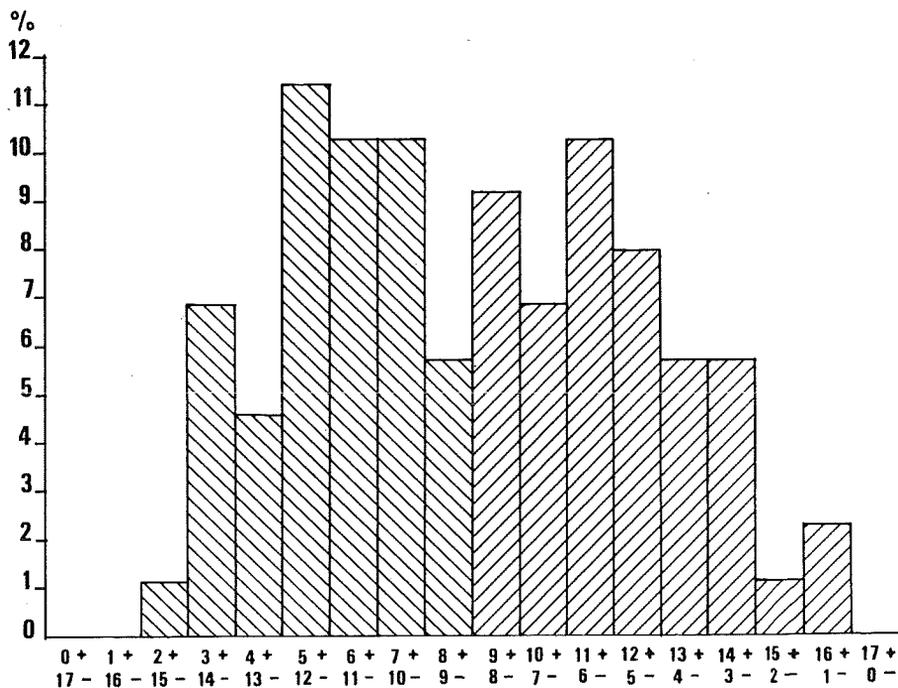


Fig. 4 : Histogramme des différentes combinaisons de basculement positif ou négatif, réalisé simultanément sur l'ensemble des 17 plaques, au cours de 87 séries de mesures. Par exemple : la combinaison de 2 plaques à basculement positif et de 15 plaques à basculement négatif s'est réalisée une seule fois, celle de 3 plaques à basculement positif et de 14 plaques à basculement négatif s'est réalisée 7 fois, sur 87 séries de mesures.

groupe plus homogène de plaques. L'unité spatialement la plus étendue est celle de la partie médiane de la colline comprenant les plaques 6 à 11 se suivant sur quelques 75 m.

Comme le révèle le tableau II, la classe modale regroupant un peu plus du quart des cas est constituée par les situations où 3 plaques avaient basculé vers le bas de la pente et les 3 autres vers le haut. Les situations où les plaques à mouvements positifs sont majoritaires équilibrent à peu près les cas inverses (37,4 contre 36,1 %).

Afin de mettre en évidence l'influence de la répartition des pluies pendant la période qui précède les mesures de creep, on a établi les tableaux III et IV, qui concernent des groupes extrêmes d'importance presque égale, d'une part les cas où les plaques avaient connu un mouvement négatif et d'autre part les cas où 6 ou 5 plaques avaient connu un mouvement positif.

Il ressort très nettement de ces données que le basculement généralisé des plaques vers le bas de la pente se produit presque toujours en saison des pluies. Un seul cas de pleine saison sèche (28/7/85) a fait exception. Les totaux pluviométriques hebdomadaires sont généralement élevés, avec 61,3 mm en moyenne. On constate qu'habituellement il est tombé plusieurs dizaines de mm de pluie dans les quatre derniers jours précédant la mesure de l'inclinaison des plaques. Une humectation récente du sol superficiel accroît donc sa mobilité par rapport à la couche subsuperficielle.

Le tableau IV des cas de basculement généralisé vers le haut de la pente montre au contraire que cette situation se produit soit au début de la saison sèche (mai-juin), soit à la fin de la saison des pluies (mars-avril) ou pendant une phase d'atténuation des précipitations pendant la saison des pluies. C'est ainsi que la moyenne du total pluviométrique hebdomadaire est très basse (11,2 mm). On note en outre qu'il n'a pas plu la veille du jour des mesures ou du moins qu'il est tombé sensiblement moins de pluie que l'avant-veille ou les jours précédents. Il y a donc un assèchement relatif de la couche superficielle, tandis que la couche subsuperficielle conserve encore une humidité résiduelle plus élevée, qui expliquerait la plus grande mobilité à ce niveau.

Nous avons voulu tester l'influence des averses successives en procédant à des expériences de simulation de pluies.

6 +	5 +	4 +	3 +	2 +	1 +	0 -
10,9 %	12,0 %	14,5 %	26,5 %	6,0 %	8,4 %	21,7 %
37,4 %			36,1 %			

Tab. II : Distribution des séries de mesures de six plaques (N° 6 à 11) de la partie médiane de la colline, entre novembre 1983 et novembre 1985, classées selon le sens du basculement (+ : vers le bas de la colline; - : vers le sommet).

6 P L A Q U E S . + E T 0 -

5 P L A Q U E S + E T 1 -

Date de mesure du creep	17/1	21/2	21/3	28/3	11/4	16/5	31/10	14/11	28/11	21/12	11/1	1/2	15/2	7/3	14/11	12/12	2/1	7/2	28/7	Σ	\bar{x}	σ
- 1 jour	3,9	32,6	1,2	3,0	1,3	0,2	0	0	0,3	13,1	17,6	32,8	1,2	17,7	17,4	6,8	1,3	3,3	0	153,7	8,1	10,8
- 2 jours	28,9	45,9	35,9	11,9	25,0	0,3	1,0	0	1,8	15,6	17,6	41,4	1,2	17,7	43,7	51,5	1,3	20,1	0	360,8	19,0	17,8
- 3 jours	28,9	45,9	39,2	16,9	25,0	0,3	1,0	9,0	55,4	15,6	18,8	52,7	22,2	25,7	44,1	73,5	5,0	20,1	0	499,3	26,3	20,7
- 4 jours	28,9	52,6	39,2	16,9	48,8	6,7	19,8	50,1	55,5	15,6	49,6	52,7	43,2	26,4	44,5	84,0	32,6	20,9	0	688,0	36,2	20,4
- 5 jours	36,9	59,8	39,2	19,1	91,6	6,7	19,8	56,1	57,8	39,0	57,5	52,7	62,6	26,4	78,0	88,7	35,4	28,6	0	855,9	45,0	25,6
- 6 jours	37,5	81,9	39,2	29,4	95,2	6,7	19,8	56,3	57,8	43,2	58,2	85,6	66,5	67,4	80,1	98,7	59,4	48,9	0	1031,8	54,3	28,0
- 7 jours	41,5	81,9	42,5	32,1	127,9	6,8	19,8	57,6	57,8	46,0	102,8	85,6	71,0	67,4	104,9	99,7	59,4	60,6	0	1165,3	61,3	34,2

Tab. III : Cumul des pluies antécédentes (en mm) aux jours de mesures de creep où 6 ou 5 plaques de la partie médiane du flanc de la colline (N° 6 à 11) ont été affectées par un déplacement angulaire vers le bas de la pente.

1 9 8 4

1 9 8 5

Date de mesure du creep	8/2	27/6	5/12	26/12	9/1	28/2	14/3	17/3	4/4	14/4	18/4	25/4	28/4	2/5	23/5	30/5	15/6	21/11	°			
- 1 jour	2,3	0	1,3	0	0,5	0,3	1,2	0	0,3	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	6,0	0,3	0,6	
- 2 jours	3,7	0	6,9	1,0	0,5	15,0	1,2	0	3,4	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	31,9	1,8	3,8	
- 3 jours	13,7	0	6,9	7,5	0,5	47,4	1,2	3,3	3,4	0	0	0,2	0,1	0	0	0	0	0	2,0	86,2	4,8	11,3
- 4 jours	19,9	0	7,5	7,5	3,6	51,1	1,2	4,5	4,9	1,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0	0	0	0	2,0	104,1	5,8	12,3
- 5 jours	19,9	0	14,9	7,5	3,6	51,1	1,2	4,5	4,9	25,0	0,1	0,2	0,3	0,1	0	0	0	0	2,2	136,0	7,6	13,2
- 6 jours	19,9	0	14,9	18,3	3,6	51,1	4,9	4,5	4,9	25,0	0,1	0,2	0,3	0,1	0	0	0	0	2,2	150,0	8,3	13,3
- 7 jours	19,9	0	14,9	18,3	16,6	55,1	13,8	4,5	5,5	48,8	0,1	1,2	0,3	0,2	0	0	0	0	2,2	201,4	11,2	16,5

Tab. IV : Cumul des pluies antécédentes (en mm) aux jours de mesures de creep où toutes les 6 plaques (No 6 à 11) de la partie médiane du flanc de la colline étaient affectées d'un déplacement angulaire vers le haut de la pente.

Tab. V - A : Expérience de simulation de pluie sur pente de 48 %
(plaque A).

		16/10/84								
P L U I E	a	heure du début	11.50	12.53	13.51	14.50	15.50	16.50		
	b	heure de la fin	12.09	13.07	14.05	15.07	16.05	17.03		
	c	lame d'eau cumulée en mm	25	50	75	100	125	150		
C R E E P	d	heure de mesure	12.15	-	14.07	15.09	16.07	17.05		
	e	inclinaison en ‰	+1,49	-	+0,05	+0,16	+0,11	+0,17		
	f	heure de mesure	12.50	13.50	14.49	15.48	16.46	17.48		
	g	inclinaison en ‰	-0,39	-0,15	-0,49	-0,32	-0,20	-0,38		
	h	déplacement cumulé en ‰	+1,10	+0,95	+0,51	+0,35	+0,26	+0,05		
		16/10	18/10/84							
P L U I E	a	17.50	-	9.35	10.08	10.40	11.12	11.43	12.15	12.48
	b	18.05	-	9.45	10.17	10.48	11.20	11.51	12.24	12.56
	c	175	-	195	215	235	255	275	295	315
C R E E P	d	18.07	-	9.46	18.18	10.50	11.22	11.53	12.28	13.00
	e	+0,24	-	+0,23	+0,14	+0,24	+0,21	+0,25	+0,34	+0,32
	f	-	9.31	10.05	10.38	11.07	11.40	12.12	12.45	13.15
	g	-	-0,53	-0,13	-0,13	-0,18	-0,25	-0,28	-0,37	-0,27
	h	-	-0,24	-0,14	-0,13	-0,07	-0,11	-0,14	-0,17	-0,12
		18/10/84								
P L U I E	a	13.18	13.50	14.20	14.58	15.28	16.01	16.31	17.02	17.34
	b	13.26	13.59	14.29	15.06	15.37	16.09	16.39	17.12	17.44
	c	335	355	375	395	415	435	455	475	495
C R E E P	d	13.30	14.02	14.31	15.10	15.39	16.20	16.42	17.14	17.46
	e	+0,14	+0,04	+0,12	+0,17	+0,06	+0,15	+0,20	+0,14	+0,17
	f	13.46	14.19	14.56	15.20	15.57	16.29	16.59	17.30	17.58
	g	-0,13	-0,07	-0,15	-0,15	-0,05	-0,23	-0,17	-0,12	-0,17
	h	-0,11	-0,14	-0,17	-0,15	-0,14	-0,22	-0,19	-0,17	-0,17

		20/10/84								
P L U I E	a	-	9.24	9.55	10.25	10.51	11.21	11.49	12.22	12.55
	b	-	9.33	10.04	10.33	11.01	11.30	11.58	12.31	13.03
	c	-	515	535	555	575	595	615	635	655
C R E E P	d	-	9.35	10.05	10.34	11.03	11.31	11.59	12.35	13.05
	e	-	+0,05	+0,20	+0,22	+0,24	+0,19	+0,30	+0,24	+0,33
	f	9.04	9.53	10.22	10.48	11.20	11.47	12.15	12.51	13.22
	g	-0,04	-0,19	-0,17	-0,24	-0,20	-0,25	-0,24	-0,24	-0,20
	h	-	-0,35	-0,32	-0,34	-0,30	-0,36	-0,30	-0,30	-0,17
		20/10/84				21/10/84				
P L U I E	a	13.24	13.52	14.20	14.48	-	9.24	9.52	10.19	10.48
	b	13.33	14.00	14.29	14.56	-	9.32	10.00	10.27	10.56
	c	675	695	715	735	-	755	775	795	815
C R E E P	d	13.34	14.02	14.30	14.58	-	9.35	10.02	10.29	10.57
	e	+0,14	+0,22	+0,18	+0,26	-	+0,22	+0,18	+0,25	+0,23
	f	13.49	14.18	14.44	15.07	9.10	9.48	10.16	10.44	11.14
	g	-0,14	-0,19	-0,23	-0,22	-0,15	-0,19	-0,22	-0,24	-0,23
	h	-0,17	-0,14	-0,19	-0,15	-	-0,27	-0,31	-0,30	-0,30
		21/10/84								
P L U I E	a	11.18	11.47	12.17	12.45	13.14	13.42	14.12	14.40	15.10
	b	11.26	11.55	12.25	12.54	13.22	13.50	14.20	14.48	15.18
	c	835	855	875	895	915	935	955	975	995
C R E E P	d	11.27	11.56	12.27	12.56	13.24	13.52	14.21	14.50	15.20
	e	+0,25	+0,41	+0,28	+0,29	+0,11	+0,25	+0,15	+0,16	+0,17
	f	11.44	12.14	12.43	13.10	13.39	14.09	14.36	15.08	15.35
	g	-0,25	-0,41	-0,23	-0,20	-0,20	-0,13	-0,25	-0,17	-0,20
	h	-0,30	-0,30	-0,25	-0,16	-0,25	-0,13	-0,23	-0,24	-0,27
		21/10/84				25/10/84				
P L U I E	a	15.38	16.07	16.35	17.04	17.32	-	9.14	9.44	10.11
	b	15.47	16.15	16.44	17.13	17.40	-	9.23	9.52	10.20
	c	1015	1035	1055	1075	1095	-	1115	1135	1155
C R E E P	d	15.49	16.17	16.46	17.15	17.43	-	9.24	9.53	10.21
	e	+0,22	+0,20	+0,25	+0,14	+0,19	-	+0,21	+0,19	+0,22
	f	16.04	16.32	17.02	17.29	17.49	8.58	9.39	10.09	10.36
	g	-0,21	-0,21	-0,23	-0,10	-0,08	-0,16	-0,19	-0,24	-0,16
	h	-0,26	-0,27	-0,25	-0,21	-0,10	-	-0,24	-0,29	-0,23

		25/10/84						
P L U I E	a	heure du début	10.40	11.09	11.39	12.12	12.41	13.10
	b	heure de la fin	10.49	11.17	11.47	12.15	12.50	13.18
	c	lame d'eau cumulée en mm	1175	1195	1215	1235	1255	1275
C R E E P	d	heure de mesure	10.50	11.21	11.51	12.20	12.52	13.26
	e	inclinaison en ‰	+0,23	+0,14	+0,21	+0,26	+0,28	+0,16
	f	heure de mesure	11.06	11.36	12.05	12.38	13.08	13.37
	g	inclinaison en ‰	-0,25	-0,22	-0,10	-0,29	-0,17	-0,16
	h	déplacement cumulé en ‰	-0,25	-0,33	-0,22	-0,25	-0,14	-0,14

		25/10/84								
P L U I E	a	13.41	14.15	14.45	15.14	15.45	16.14	16.40	17.16	17.41
	b	13.51	14.23	14.53	15.24	15.54	16.22	16.50	17.19	17.49
	c	1295	1315	1335	1355	1375	1395	1415	1435	1455
C R E E P	d	13.53	14.26	14.55	15.25	15.55	16.24	16.52	17.20	17.51
	e	+0,26	+0,17	+0,24	+0,11	+0,20	+0,19	+0,19	+0,20	+0,14
	f	14.11	14.42	15.11	15.42	16.10	16.38	17.07	17.37	18.03
	g	-0,25	-0,24	-0,20	-0,10	-0,19	-0,19	-0,19	-0,18	-0,14
	h	-0,13	-0,20	-0,16	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,12	-0,12

		27/10	30/10/84				
P L U I E	a	-	-				
	b	-	-				
	c	-	-				
C R E E P	d	-	-	Σ	n	\bar{x}	σ
	e	-	-	+1,54 ‰	71	+0,22	\pm 0,09
	f	9.27	8.25				
	g	-0,23	-0,67	-1,50 ‰	71	-0,21	\pm 0,09
	h	-	-				

Tab. V - B : Expérience de simulation de pluie sur pente de 49 %
(plaque B).

		16/10/84								
P L U I E	a	heure du début	11.02	12.26	13.26	14.25	15.25	16.25		
	b	heure de la fin	11.20	12.40	13.42	14.39	15.39	16.39		
	c	lame d'eau cumulée en mm	25	50	75	100	125	150		
	d	heure de mesure	11.24	12.43	13.43	14.41	15.40	16.40		
C R E E P	e	inclinaison en ‰	+0,36	+0,08	-0,40	-0,02	-0,05	0,0		
	f	heure de mesure	12.25	13.26	14.20	15.20	16.20	17.25		
	g	inclinaison en ‰	+0,11	-0,05	+0,04	-0,05	+0,02	-0,01		
	h	déplacement cumulé en ‰	+0,47	+0,50	+0,14	+0,07	+0,04	+0,03		
		16/10	18/10/84							
P L U I E	a	17.25	-	9.20	9.53	10.25	10.55	11.28	12.00	12.31
	b	17.39	-	9.28	10.01	10.33	11.04	11.36	12.08	12.32
	c	175	-	195	215	235	255	275	295	315
	d	17.40	-	9.28	10.03	10.34	11.05	11.38	12.10	12.42
C R E E P	e	+0,03	-	+0,23	0,0	+0,01	+0,02	+0,01	-0,05	-0,03
	f	-	9.13	9.47	10.22	10.52	11.25	11.57	12.30	13.00
	g	-	-0,57	+0,03	-0,06	-0,01	-0,02	-0,03	0,0	+0,02
	h	-	-0,51	-0,25	-0,31	-0,31	-0,31	-0,33	-0,38	-0,39
		18/10/84								
P L U I E	a	13.02	13.34	14.06	14.42	15.14	15.44	16.15	16.46	17.17
	b	13.10	13.42	14.15	14.50	15.22	15.53	16.26	16.54	17.27
	c	335	355	375	395	415	435	455	475	495
	d	13.13	13.45	14.16	14.54	15.25	15.55	16.27	16.56	17.30
C R E E P	e	0,0	0,0	+0,01	-0,01	-0,03	-0,02	+0,01	-0,03	-0,01
	f	13.32	14.04	14.35	15.10	15.41	16.12	16.44	17.16	17.56
	g	+0,02	+0,02	-0,02	+0,01	+0,03	-0,01	0,0	+0,04	-0,04
	h	-0,37	-0,35	-0,36	-0,36	-0,36	-0,39	-0,38	-0,37	-0,42

		20/10/84								
P L U I E	a	heure du début	-	9.09	9.40	10.09	10.37	11.06		
	b	heure de la fin	-	9.19	9.49	10.12	10.45	11.15		
	c	lame d'eau cumulée en mm	-	515	535	555	575	595		
	d	heure de mesure	-	9.21	9.50	10.20	10.47	11.17		
C R E E P	e	inclinaison en ‰	-	-0,06	+0,01	-0,01	-0,01	+0,01		
	f	heure de mesure	9.03	9.39	10.06	10.36	11.14	11.33		
	g	inclinaison en ‰	+0,07	+0,03	-0,01	+0,02	0,0	-0,02		
	h	déplacement cumulé en ‰	-	-0,38	-0,38	-0,37	-0,38	-0,39		
		20/10/84				21/10/84				
P L U I E	a	11.35	12.04	12.38	13.09	13.38	14.05	14.35	-	9.12
	b	11.43	12.12	12.47	13.18	13.46	14.13	14.42	-	9.20
	c	615	635	655	675	695	715	735	-	755
	d	11.45	12.14	12.50	13.19	13.48	14.15	14.43	-	9.23
C R E E P	e	+0,01	-0,01	+0,01	-0,04	-0,01	-0,05	-0,01	-	+0,41
	f	12.00	12.36	13.06	13.35	14.04	14.31	15.06	9.09	9.37
	g	0,0	-0,01	+0,03	+0,04	+0,03	+0,02	-0,01	-0,06	+0,02
	h	-0,38	-0,38	-0,34	-0,34	-0,32	-0,35	-0,34	-	0,0
		21/10/84								
P L U I E	a	9.38	10.05	10.33	11.03	11.32	12.03	12.31	13.00	13.28
	b	9.45	10.12	10.41	11.11	11.40	12.11	12.39	13.08	13.36
	c	775	795	815	835	855	875	895	915	935
	d	9.47	10.14	10.42	11.13	11.42	12.12	12.41	13.09	13.37
C R E E P	e	-0,08	-0,01	-0,04	-0,01	+0,06	+0,02	-0,01	-0,01	-0,01
	f	10.03	10.30	11.00	11.28	11.57	12.28	12.57	13.25	13.55
	g	-0,07	0,0	+0,01	-0,02	-0,05	-0,02	-0,01	+0,03	+0,02
	h	-0,15	-0,16	-0,19	-0,22	-0,21	-0,21	-0,23	-0,21	-0,20
		21/10/84								25/10
P L U I E	a	13.57	14.25	14.54	15.24	15.52	16.21	16.50	17.18	-
	b	14.05	14.34	15.03	15.33	16.01	16.30	16.59	17.27	-
	c	955	975	995	1015	1035	1055	1075	1095	-
	d	14.07	14.35	15.06	15.34	16.03	16.31	17.01	17.28	-
C R E E P	e	-0,05	+0,03	-0,02	+0,02	+0,01	-0,02	+0,01	-0,01	-
	f	14.23	14.52	15.21	15.50	16.18	16.48	17.16	17.48	8.55
	g	+0,03	-0,01	0,0	-0,02	+0,01	+0,01	+0,01	+0,02	-0,49
	h	-0,22	-0,20	-0,22	-0,22	-0,20	-0,21	-0,19	-0,18	-

25/10/84

P L U I E	a	8.59	9.28	9.57	10.25	10.54	11.25	11.57	12.26	12.56
	b	9.09	9.37	10.06	10.33	11.02	11.33	12.03	12.34	13.05
	c	1115	1135	1155	1175	1195	1215	1235	1255	1275
C R E E P	d	9.10	9.38	10.08	10.35	11.04	11.35	12.08	12.37	13.07
	e	+0,42	+0,04	+0,01	-0,02	+0,01	-0,03	+0,05	-0,01	-0,01
	f	9.25	9.55	10.22	10.51	11.23	11.52	12.22	12.53	13.21
	g	-0,01	-0,02	+0,03	-0,01	-0,01	0,0	-0,06	+0,01	+0,05
	h	-0,26	-0,24	-0,20	-0,23	-0,23	-0,26	-0,27	-0,27	-0,23

25/10/84

P L U I E	a	13.26	14.00	14.30	14.59	15.31	15.59	16.28	16.56	17.25
	b	13.35	14.08	14.39	15.07	15.40	16.07	16.36	17.04	17.34
	c	1295	1315	1335	1355	1375	1395	1415	1435	1455
C R E E P	d	13.36	14.10	14.41	15.09	15.41	16.09	16.37	17.06	17.35
	e	-0,01	+0,02	+0,01	+0,01	0,0	+0,01	-0,01	-0,01	+0,01
	f	13.54	14.27	14.56	15.27	15.56	16.25	16.54	17.21	18.02
	g	-0,02	-0,01	0,0	+0,02	-0,01	+0,01	+0,01	+0,01	-0,01
	h	-0,26	-0,25	-0,24	-0,21	-0,22	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20

27/10 30/10/84

P L U I E	a	-	-				
	b	-	-				
	c	-	-				
C R E E P	d	-	-	Σ	n	\bar{x}	σ
	e	-	-	+0,71 ‰	71	+0,010	\pm 0,102
	f	9.25	8.25				
	g	-0,20	-0,50	-0,50 ‰	71	-0,007	\pm 0,074
	h	-	-				

Tab. V - C : Expérience de simulation de pluie sur pente de 46 %
(plaque C).

		27/10/84								
P L U I E C R E E P	a	heure du début	9.35	10.05	10.35	11.05	11.35	12.05		
	b	heure de la fin	9.57	10.25	10.53	11.24	11.54	12.24		
	c	lame d'eau cumulée en mm	40	80	120	160	200	240		
	d	heure de mesure	9.59	10.29	10.55	11.26	11.56	12.25		
	e	inclinaison en ‰	+0,24	+0,14	+0,10	+0,15	+0,07	+0,08		
	f	heure de mesure	10.03	10.34	11.02	11.33	12.04	12.33		
	g	inclinaison en ‰	-0,05	-0,06	-0,09	-0,09	-0,10	-0,07		
	h	déplacement cumulé en ‰	+0,19	+0,27	+0,28	+0,34	+0,31	+0,32		
		27/10/84				30/10/84				
P L U I E C R E E P	a	12.35	13.05	13.35	14.05	14.35	-	8.32	9.00	9.30
	b	12.53	13.24	13.55	14.24	14.54	-	8.52	9.21	9.51
	c	280	320	360	400	440	-	480	520	560
	d	12.55	13.26	13.58	14.27	14.56	-	8.54	9.23	9.52
	e	+0,06	+0,05	+0,12	+0,04	+0,02	-	+0,37	+0,11	+0,09
	f	13.03	13.35	14.01	14.34	15.07	8.29	8.59	9.29	9.59
	g	-0,10	-0,20	-0,09	-0,04	-0,11	-1,78	-0,08	-0,13	-0,07
	h	+0,28	+0,13	+0,16	+0,16	+0,07	-	-1,42	-1,44	-1,42
		30/10/84								
P L U I E C R E E P	a	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00
	b	10.18	10.49	11.20	11.50	12.21	12.50	13.20	13.48	14.28
	c	600	640	680	720	760	800	840	880	920
	d	10.20	10.51	11.21	11.51	12.21	12.51	13.21	13.49	14.29
	e	+0,09	+0,06	+0,10	+0,13	+0,08	+0,05	+0,03	+0,04	+0,05
	f	10.28	10.58	11.29	11.59	12.29	12.59	13.29	13.59	14.32
	g	-0,10	-0,10	-0,10	-0,14	-0,09	-0,05	-0,05	-0,05	0,0
	h	-1,43	-1,47	-1,47	-1,48	-1,49	-1,49	-1,51	-1,52	-1,47

30/10/84

P L U I E	a	14.34	15.00	15.30	16.00	16.30	17.00	17.30
	b	14.52	15.25	15.52	16.20	16.50	17.20	17.50
	c	960	1000	1040	1080	1120	1160	1200
C R E E P	d	-	15.28	15.53	16.21	16.52	17.22	17.51
	e	-	+0,11	+0,03	+0,01	+0,02	+0,02	+0,01
	f	14.58	-	15.57	16.29	16.59	17.29	18.00
	g	-0,14	-	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01
	h	-1,61	-1,50	-1,48	-1,49	-1,48	-1,48	-1,48

P
L
U
I
E

	d	Σ	n	\bar{x}	σ
C R E E P	e	+2,47 ‰	29	+0,085	\pm 0,075
	g	-2,17 ‰	29	-0,075	\pm 0,047
	h				

Trois tests ont été réalisés en fin de saison sèche, au moment où les sols ont une humidité d'environ 9 %. Des plaques identiques aux 17 autres ont été installées à mi-pente sur le flanc de la colline, à quelques mètres de distance l'une de l'autre, sur une pente locale respectivement de 48 % (plaque A), de 49 % (plaque B) et de 46 % (plaque C). Les tests concernant les plaques A et B sont caractérisés par une même distribution des pluies artificielles, avec des averses simulées de 25 mm le premier jour, puis de 20 mm les autres jours. Au total 524 l. d'eau représentant une lame d'eau cumulée de 1.455 mm ont été vaporisés sur les placeaux de 60 X 60 cm en 4 séances réparties sur 10 jours. Dans le cas du test de la plaque C, des averses de 40 mm ont été simulées, entraînant la pulvérisation de 432 l. (ou une lame d'eau de 1.200 mm) sur le placeau en 2 séances séparées par 3 jours. Immédiatement après chaque précipitation, le déplacement angulaire était évalué par la moyenne de trois mesures. Avant chaque nouvelle aspersion, le déplacement angulaire était à nouveau mesuré de la même façon. Il faut noter qu'à aucun moment il n'y a eu de ruissellement visible sur la surface des placeaux. Par contre, des suintements sont apparus à la longue en contrebas des placeaux.

L'ensemble des données d'expérimentation et les résultats figurent sur les tableaux V-A, V-B et V-C.

Il ressort des expériences aux sites A et C qu'une remarquable régularité de mouvements alternés s'est produite à chaque épisode de pluie simulée. La mesure effectuée tout de suite après la précipitation indique chaque fois un basculement vers le bas de la pente. Dans le cas du site A, le mouvement a été en moyenne deux fois et demi plus important que dans le site C, soit + 0,22 % (\pm 0,09) contre + 0,09 % (\pm 0,08). La mesure faite à la fin de la phase sans pluie, après 8 minutes ou plus, indique toujours un basculement vers le haut de la pente. L'ampleur des mouvements est dans la même proportion qu'en ce qui concerne les mouvements positifs, soit - 0,21 % (\pm 0,09) au site A contre - 0,08 % (\pm 0,05) au site C. Au cours de l'infiltration de l'eau dans le sol, une variation de la pression d'eau dans les pores se traduit par une force plus grande dirigée vers le bas de la pente s'exerçant d'abord dans la couche superficielle (mouvements +) puis, plus tard, dans la couche subsuperficielle (mouvements -). Cela n'implique pas nécessairement un déplacement corrélatif important des particules minérales et des expériences complémentaires devraient être

menées en laboratoire pour déterminer leur trajectoire réelle. Les tests effectués à Lupuma montrent néanmoins que les variations de conditions physiques dans le sol superficiel sont rapides. Les effets potentiels de chaque averse sont ainsi mis en évidence. Une confirmation est ainsi apportée à l'influence déjà pressentie de la répartition des pluies sur la dynamique du creep superficiel.

Les mesures effectuées au site B, où les conditions expérimentales constituaient une réplique de celles du site A, ont fait apparaître une succession de mouvements notablement différente. Après la phase de pluie artificielle, il y a eu 25 % de cas où les déplacements ont d'abord été positifs puis, après un temps d'assèchement, négatifs, comme dans les tests des sites A et C. Par contre, il y a 30 % de cas inverses avec des mouvements négatifs tout de suite après l'aspersion puis, plus tard, positifs. En outre, des mouvements orientés successivement dans le même sens négatif ont été observés dans 14 % des cas, et dans le même sens positif dans 11 % des cas. Dans les 18 % de cas restants, une des deux mesures n'a révélé aucun déplacement angulaire apparent. Il faut noter aussi qu'au site C la valeur absolue des déplacements a été en général très petite.

Puisque les valeurs de pente des sites A et B sont analogues et que les conditions expérimentales sont identiques, l'influence de la texture du matériel et des conditions locales d'infiltration et de drainage est ainsi mise en évidence. Cela permet de mieux comprendre les particularités qui ont été soulignées à propos de certaines plaques à mouvements faibles et antagonistes des autres, comme les plaques 5 ou 13.

CONCLUSION

La technique des plaques en T est particulièrement adaptée à la mise en évidence des mouvements différentiels dans les couches superficielles du sol. Ceux-ci atteignent la plus grande ampleur pendant les périodes de changement de saison. Lorsque le terrain commence à s'humecter au début de la saison des pluies, il semble que la partie tout à fait supérieure du sol ait tendance à migrer vers le bas de la pente. Au début de la saison sèche, au contraire, c'est la couche sub-superficielle du sol qui paraît la plus mobile, comme le révèle le basculement généralisé des plaques vers le haut de la pente.

En pleine saison sèche et en pleine saison des pluies, les plaques basculent très peu. Dans le premier cas, cela signifie que ni la bioturbation, ni les autres causes du creep, ne provoquent de mouvement différentiel important dans le sol superficiel. Dans le second cas, il s'ensuit que toute la partie supérieure du sol où étaient insérées les plaques était soit stable soit plus probablement affectée d'un glissement uniforme vers le bas de la pente.

Outre les grandes variations saisonnières du creep superficiel, il existe des mouvements caractéristiques induits par la succession même des averses au cours de la saison des pluies. L'analyse des déplacements angulaires des 6 plaques de la partie médiane du flanc de la colline a montré une tendance très nette au basculement vers le bas de la pente après des jours pluvieux et un basculement inverse après des jours pas ou peu arrosés.

Les expériences de simulation de pluie ont même mis en évidence le fait que des modifications physiques très rapides se produisaient, puisqu'on a obtenu systématiquement dans certains tests un déplacement angulaire vers le bas de la pente lors des mesures tout de suite après une aspersion et un mouvement inverse déjà une dizaine de minutes plus tard.

Toutefois, l'influence d'autres facteurs comme la composition texturale du sol, sa structure, sa pierrosité jouent certainement un rôle, car il existe d'autres successions de mouvements malgré des conditions expérimentales identiques. Des études en laboratoire seraient de nature à mieux préciser l'influence de ces divers facteurs.

Il est malgré tout vraisemblable que la succession des pluies sous un certain climat aurait tendance à déterminer une évolution différentielle du creep superficiel. On peut imaginer qu'une région caractérisée par des pluies fréquentes, comme en zone équatoriale ou tempérée humide, connaîtrait un creep dont la vitesse décroîtrait progressivement à partir de la surface. Une autre région arrosée par des pluies irrégulières entrecoupées de jours de sécheresse, comme en zone tropicale, pourrait bien avoir un niveau de vitesse maximale de creep à faible profondeur en relation avec une humidité moyenne plus élevée et plus constante qu'en surface.

REMERCIEMENTS

Je remercie le Professeur J. ALEXANDRE pour les remarques et suggestions suscitées par la lecture du manuscrit. Je suis également reconnaissant à Jean-Paul PASSAGEZ, qui m'a aidé avec beaucoup de persévérance sur le terrain. Ce travail est dédié à la mémoire du Docteur Léopold JACQUERYE, décédé le 5 février 1986, dans la propriété duquel les observations sur la colline de Lupuma ont été réalisées.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON, E.W. & FINLAYSON, B., 1975. Instruments for measuring soil creep. *British Geomorphological Research Group, Technical Bulletin 16*, Norwich, 51 p.
- CULLING, W.E.H., 1963. Soil creep and the development of hillside slopes. *J. Geol.*, 71, 127-162.
- CULLING, W.E.H., 1965. Theory of erosion on soil-covered slopes. *J. Geol.*, 73, 230-254.
- CULLING, W.E.H., 1983 a. Slow particulate flow in condensed media as an escape mechanism : mean translocation distance. *In* : J. DE PLOEY (Ed.), Rainfall simulation, runoff and soil erosion, *Catena*, supplement 4, 161-190.
- CULLING, W.E.H., 1983 b. Rate process theory of geomorphic soil creep. *In* : J. DE PLOEY (Ed.), Rainfall simulation, runoff and soil erosion, *Catena*, supplement 4, 191-214.
- DAVISON, C., 1889. On the creeping of the soilcap through the action of frost. *Geological Magazine*, 6, 255-261.
- EVANS, R., 1967. Inclinometers or T - bars. *In* : Field methods for the study of slope and fluvial processes, *Revue Géomorphol. Dyn.*, 17, 176-177.
- KIRBY, M.J., 1967. Measurement and theory of soil creep. *J. Geol.*, 75, 359-378.
- RUDBERG, S., 1958. Some observations concerning mass movement on slopes in Sweden. *Geol. Foren. Stockholm Forh.*, 80, 114-125.
- SELBY, M.J., 1966. Methods of measuring soil creep. *J. Hydrol. (N.Z.)*, 5, 54-63.
- SHARPE, C.F.S., 1938. *Landslides and related phenomena*. Columbia University Press, 137 p.
- SOYER, J. & KAKISINGI, M., 1981. Inselbergs des environs de Lubumbashi. *Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain*, 31, 85-97.

- SOYER, J. & NTOMBI, M., 1982. Variabilité spatiale des pluies à Lubumbashi (Zaïre). *Geo-Eco-Trop*, 6, 1-20.
- STATHAM, I., 1981. Slope processes. In : A. GOUDIE (Ed.), *Geomorphological Techniques*, Allen and Unwin, London, 156-180.
- TERZAGHI, K., 1950. Mechanism of landslides, application of geology to engineering practice. *Geol. Soc. America*, Berkley volume, 83-123.
- YOUNG, A., 1960. Soil movement by denudational processes on slopes. *Nature*, 188, 120-122.

