

## Le creep sur les talus de l'autoroute « E5 » entre Waremme et Liège (1)

par J. L. SCHEPERS

Licencié en Sciences géographiques

Résumé. — *Pour mesurer le creep, nous avons mis au point deux appareils. Ils permettent de mesurer : a) le déplacement du sol vers le bas de la pente; b) les mouvements du sol perpendiculaires à la surface.*

*Les résultats des mesures faites du 1/10/1973 au 31/5/1975 sur les talus de l'autoroute « E5 » entre Loncin et Waremme sont les suivants : a) la cause principale du creep est la variation de la quantité d'eau contenue dans le sol. Cette variation résulte soit des alternances gel-dégel, soit des alternances de périodes pluvieuses et non pluvieuses; b) le creep apparu à la suite des alternances de gel-dégel représente de 40 à 85 % du creep annuel; c) l'importance du creep annuel varie beaucoup suivant l'orientation des talus.*

Summary. — *In order to study creep, we have developed two pieces of apparatus, the first to measure the displacement of soil towards the foot of a slope, the second to record the movements of the soil perpendicular to the surface.*

*The following conclusions were drawn from measurements made between 1/10/1973 and 31/5/1975 on the slope of the motorway E5 between Loncin and Waremme : a) the principal cause of creep is the change in the amount of water in the soil. This change may be due to freeze-thaw or to the alternation of rainy and dry spells; b) frost creep amounts to 40 to 85 % of the total creep; c) the importance of creep varies greatly with the orientation of the slope.*

---

(1) Cet article reprend les résultats d'une partie de notre travail inédit de fin d'études en Sciences géographiques présenté à l'Université de Liège en 1975 et intitulé : « *L'évolution des talus d'autoroutes* ». Tout au cours de cette recherche, j'ai bénéficié des conseils, de l'expérience et de l'aide matérielle de M. le professeur P. Macar, M. A. Pissart, professeur associé, M. C. Ek, professeur à l'Université de Montréal, M<sup>me</sup> S. Alexandre, chef des travaux, ainsi que du Ministère des Travaux publics (province de Liège) et du Service de météorologie de la base de Bierset. Nous remercions tout particulièrement M. le professeur A. Pissart qui a relu avec attention cette note. Que ceux qui, de près ou de loin, ont collaboré à ce travail trouvent ici l'expression de ma plus profonde gratitude.

## I. — INTRODUCTION

Les mécanismes du *creep* et les méthodes de mesures ou d'évaluation de son activité ont été remarquablement synthétisés dans le livre de A. Young [11] (2) auquel nous renvoyons le lecteur. A. Young a souligné la rareté des mesures précises du *creep* en climat tempéré alors que tous les auteurs s'accordent pour dire que cet agent de transport en masse a une importance considérable dans le modelé de nos régions. En outre, ces études ont généralement envisagé le *creep* globalement (déplacement annuel de la surface du sol) sans se soucier des variations journalières de celui-ci. Si quelques recherches ont suivi les mouvements journaliers de la surface du sol en temps de gel (ainsi : K. R. Everett et J. Schmid dans A. Young [11], A. L. Washburn [9] et P. Winkin [10]), rares sont celles qui ont étudié les mouvements du sol engendrés par d'autres agents que le gel. La raison en est très simple : les mouvements produits par le gel sont très importants et donc faciles à mesurer. Il en est tout autrement des mouvements plus faibles qui sont causés par les variations de la quantité d'eau contenue dans le sol; ces mouvements, bien qu'étant nettement moins importants, ne sont pas pour autant négligeables.

Pour mesurer ces mouvements de faible amplitude (quelques centièmes de mm), nous avons réalisé deux types d'appareils que nous décrivons ci-dessous.

## II. — APPAREILS ET MÉTHODES DE MESURE DU CREEP

Les appareils que nous avons réalisés sont de deux grands types :

- des appareils qui permettent de mesurer le déplacement du sol le long de la ligne de pente, pendant un temps déterminé. Ces appareils mesurent directement le *creep*;
- des appareils qui permettent de mesurer les soulèvements de la surface du sol dans une direction perpendiculaire à celle-ci. On peut estimer le

*creep* engendré par ces mouvements par la formule :  $c = S \operatorname{Tg} \frac{\varphi}{K}$

(voir fig. 1):

$c$  : *creep* pendant une période donnée;  $S$  : soulèvement du sol cumulé pendant cette période;  $\varphi$  : angle de pente;  $K$  : coefficient variable suivant la cohésion du sol;  $K = 1$  si le sol est sans cohésion;  $K = 2$  lors des alternances de gel-dégel (voir à ce sujet M. J. Kirkby, J. Schmid dans A. Young [11]).

---

(2) Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie *in fine*.

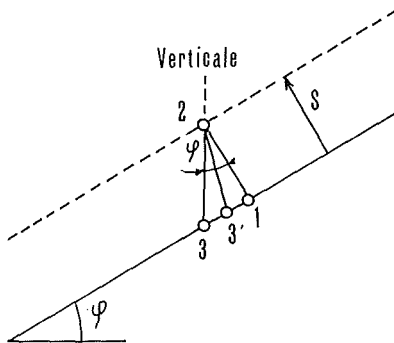


FIG. 1. — Le creep : trajets d'une particule de sol.

Légende : — : position initiale de la surface du sol; - - - : position de la surface du sol après soulèvement; s : soulèvement du sol; 1 : position initiale d'une particule; 2 : position de cette particule après soulèvement; 3 : position théorique de cette particule après retour de la surface du sol à sa position initiale; 3' : position réelle de cette particule après retour de la surface du sol à sa position initiale; 1-3' : creep réel; 1-3 : creep potentiel.

A. — LES APPAREILS POUR MESURER DIRECTEMENT LE CREEP

Ils sont composés de deux piquets métalliques rigides de 1 m de long enfoncés entièrement dans le sol (fig. 2). Le *creep* diminuant exponentiellement avec la profondeur [11], on peut considérer que sous nos climats, il devient négligeable au-delà de 500 mm de profondeur. Ainsi, les deux piquets de 1 m de long sont supposés fixes.

Entre ces deux repères fixes, distants de 1 m l'un de l'autre, nous disposons suivant une même ligne, un ou deux repères de 15 cm de long enfoncés entièrement dans le sol. Ces repères sont donc solidaires du sol superficiel; ils sont donc entraînés par le *creep*.

Ces deux types de repères sont surmontés d'une partie aérienne démontable de 150 mm de long. La partie aérienne des repères fixes est munie d'un dispositif permettant de fixer un fil de nylon très fin. Ce fil est tendu entre les deux repères fixes à l'aide de deux contrepoids (fig. 2b). Tout ce dispositif est aligné suivant une même courbe de niveau et disposé perpendiculairement à la surface du sol (fig. 2b).

Pour connaître le déplacement des repères mobiles, nous mesurons l'espace compris entre le fil de nylon et la partie aérienne des repères mobiles au moyen d'un canif à lames calibrées (précision : 0,05 mm). Plusieurs mesures consécutives ont montré que la précision des mesures est de 0,15 mm.

Les principaux avantages de ce type d'appareil sont les suivants :

- le *creep* ainsi que ses variations mensuelles sont données directement avec une bonne précision;
- l'introduction de repères mobiles de longueurs différentes permet d'observer l'évolution du *creep* à différentes profondeurs;

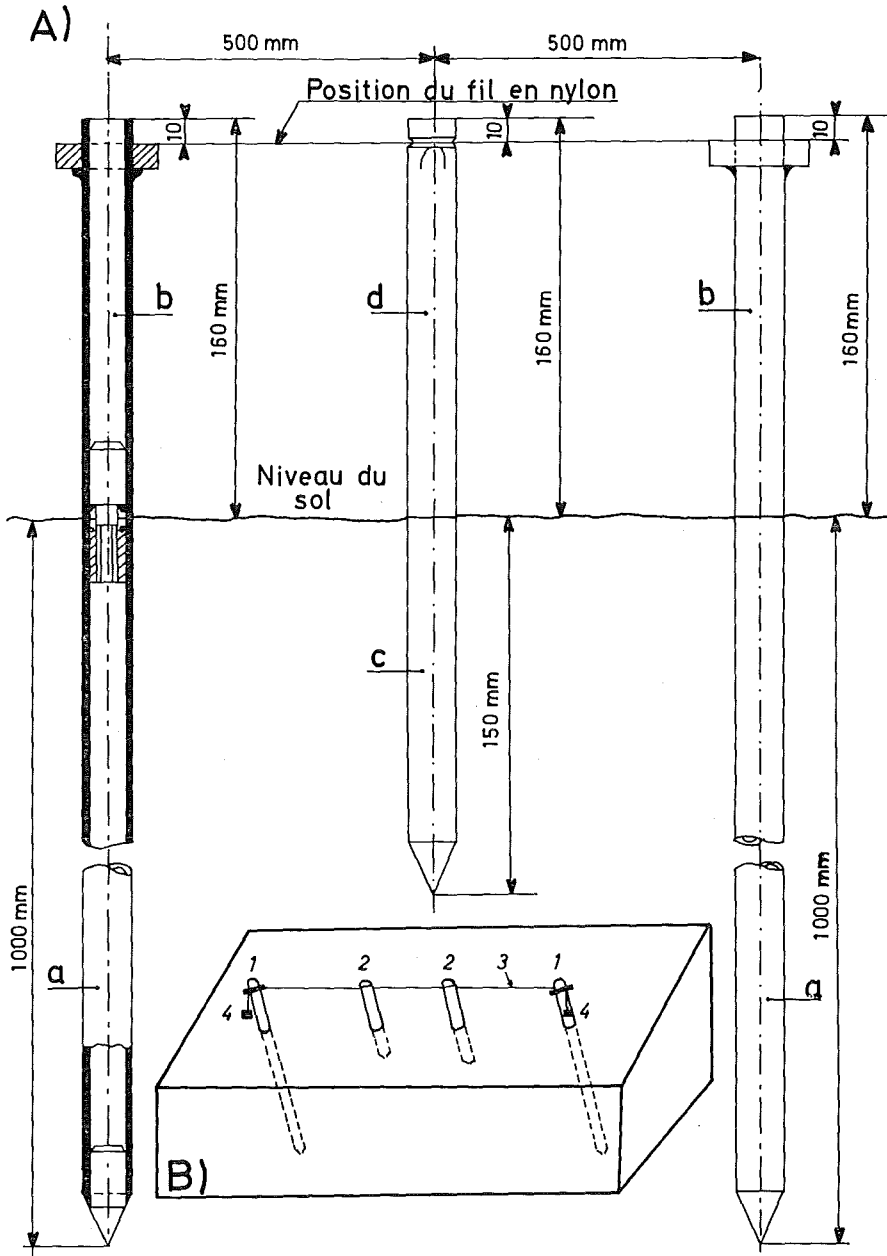


FIG. 2. — Appareil pour mesurer le creep.

- A) Plan. — a : repère fixe; b : partie aérienne du repère fixe; c : repère mobile; d : partie aérienne du repère mobile.
- B) Position des témoins dans le sol. — 1 : repère fixe; 2 : repère mobile; 3 : fil en nylon; 4 : contrepoids.

- après le démontage des parties aériennes, l'appareil est discret et n'est nullement gênant pour le passage de tondeuses, d'animaux...

#### B. — LES APPAREILS POUR MESURER LE SOULÈVEMENT DU SOL

Ils comprennent :

- un témoin fixe formé par un tube en acier de 1 100 mm de long surmonté d'un disque coaxial pourvu de trois alésages équidistants (disposés à 120°) et dont les axes sont parallèles à celui du tube (fig. 3). Ces alésages permettent le passage, par frottement doux, de la tige d'un comparateur donnant des mesures avec une précision de 0,01 mm. Ce repère est enfoncé jusqu'à 1 m de profondeur;
- un témoin mobile, posé sur le sol, formé par une rondelle de même diamètre extérieur que le disque du repère fixe (fig. 3);
- un tube en plastique de 530 mm de long et enfoncé jusqu'à 500 mm de profondeur. L'intérieur du tube est vidé de façon à ce qu'il n'existe d'adhérence qui puisse provoquer des mouvements du témoin fixe lors des soulèvements du sol.

La précision des mesures moyennant un certain nombre de précautions (maintenir propres les surfaces de mesure; éviter d'exercer des contraintes sur le repère mobile et sur le sol à proximité de celui-ci) est de l'ordre de 0,01 à 0,02 mm.

Les avantages de cet appareil pour mesurer les soulèvements du sol sont les suivants :

- il donne une idée de la répartition journalière du *creep* et il permet de distinguer entre les mouvements causés par les alternances gel-dégel et ceux engendrés par les variations du taux d'humidité dans le sol;
- il n'altère pas le milieu : seule la surface nécessaire à l'application du témoin mobile voit la couverture végétale disparaître; le témoin fixe n'est pas (ou presque pas) vecteur de calories ou de frigories dans le sol grâce à la protection du tube en plastique et de l'isolant qui s'y trouve (fig. 3);
- il permet trois mesures de soulèvement autour de chaque témoin fixe en plaçant successivement le comparateur dans chaque alésage (fig. 3). Ces trois points de mesure sont distants de 37,5 mm de l'axe du témoin fixe.

### III. — CONDITIONS D'OBSERVATION

L'étude que nous avons réalisée permet de mettre en évidence l'importance de différents facteurs influençant le *creep* et cela grâce au fait que sur les talus étudiés, un certain nombre de paramètres sont fixes : la pente (tableau I) et le type de sédiment (fig. 4); d'autres paramètres varient partout de la même façon (du moins en première approximation) : les conditions météorologiques. Seules les conditions mésoclimatiques, déterminées par

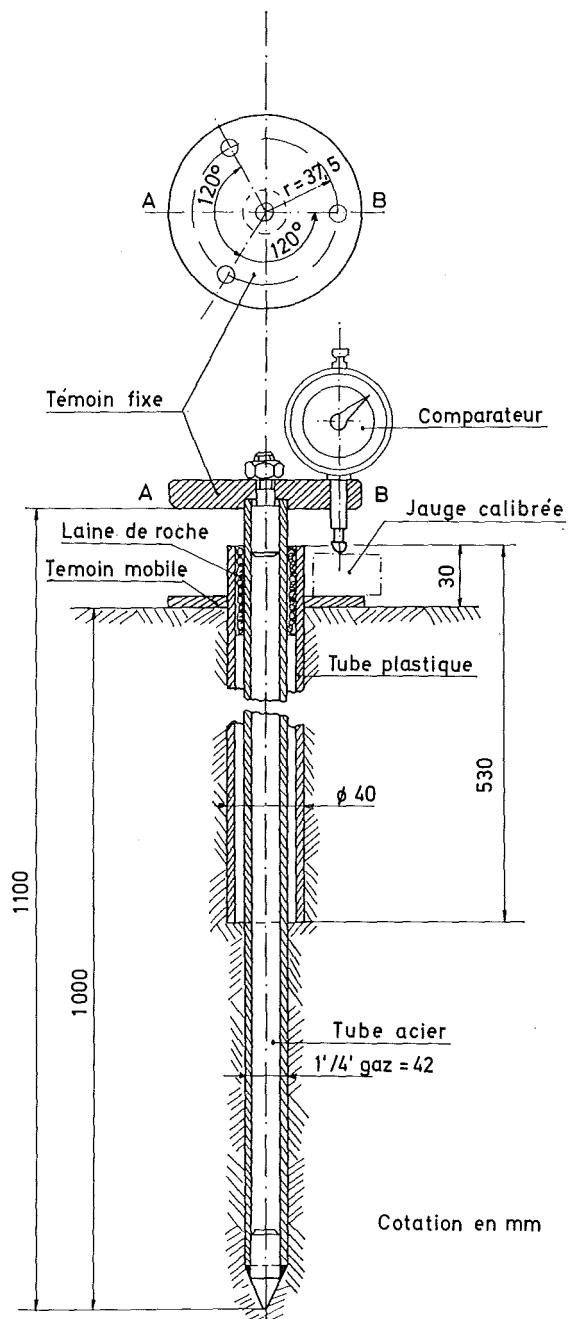


FIG. 3. — Appareil pour mesurer le soulèvement du sol.

TABLEAU I. — Caractéristiques des différentes stations.

Station n°	Commune	Type de talus	Pente	Orientation	Types d'appareil		
					Mesure du creep	Mesure du soulèvement	Température dans le sol
1	Waremmé	Remblai	27°20'	ONO	×	×	
2	Waremmé	Remblai	27°40'	ESE	×	×	
3	Waremmé	Déblai		N	×	×	×
4	Waremmé	Déblai	27°	S	×	×	×
5	Waremmé	Remblai	26°20'	N	×	×	×
6	Waremmé	Remblai	26°	S	×	×	×
7	Hodeige	Remblai	25°50'	NNE	×		
8	Hodeige	Remblai	26°20'	SSO	×		
9	Hodeige	Déblai		SSO	×		
10	Hodeige	Déblai		NNE	×		
11	Kemexhe	Remblai	26°30'	NNE	×		
12	Kemexhe	Remblai	26°10'	SSO	×		
13	Awans	Déblai		SSO	×		
14	Awans	Déblai		NNE	×		

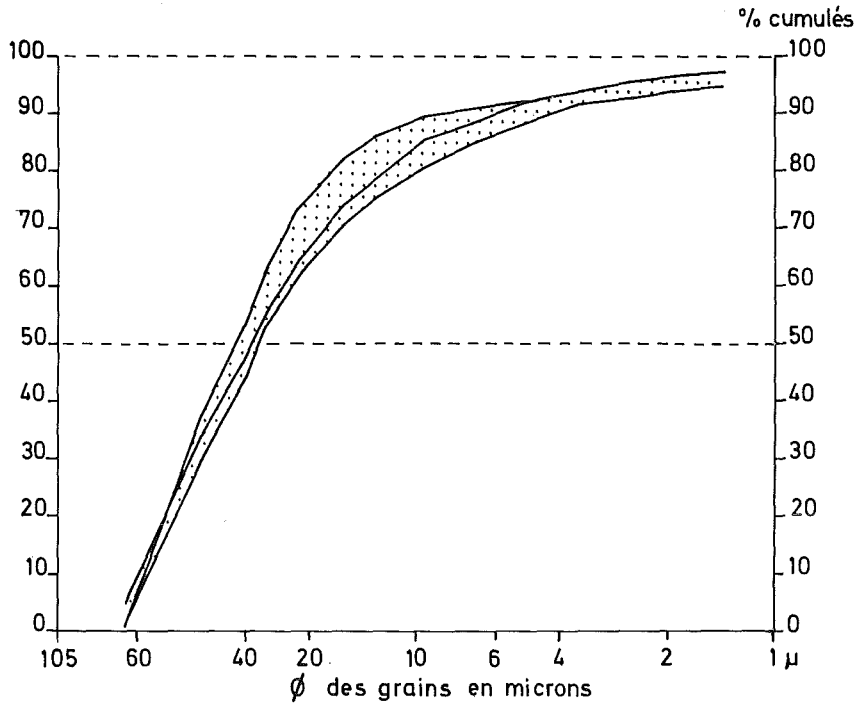


FIG. 4. — Granulométrie du sol des stations n°s 1 à 14. Toutes les courbes granulométriques sont comprises dans la zone en pointillé.

l'orientation des pentes, varie dans une large mesure, mais ces paramètres peuvent être évalués par un choix judicieux des sites d'observation. Comme les appareils pour mesurer les soulèvements du sol doivent être relevés à heures fixes de une à deux fois par jour, nous les avons groupés tous les six sur un tronçon d'autoroute, de  $\pm 1$  km de long, représentant les diverses orientations et substrats des pentes de l'autoroute « E5 » entre Loncin et Waremme (tableau I, fig. 5). Afin de pouvoir comparer le *creep* aux soulèvements du sol, les mêmes sites ont été munis d'appareils pour mesurer le *creep* (relevés une fois par mois). En plus de ces 6 sites, nous en avons choisis 9 autres où nous avons disposé des appareils pour mesurer le *creep* (fig. 5; tableau I).

#### IV. — LES RÉSULTATS DES MESURES

Nos mesures ont été réalisées du 1<sup>er</sup> novembre 1973 au 31 mai 1975 sur l'autoroute « E5 » entre Waremme et Loncin (fig. 5).

Pendant cette période, les conditions météorologiques ont été marquées par les faits suivants : pendant les hivers 1973-1974 et 1974-1975, les gelées



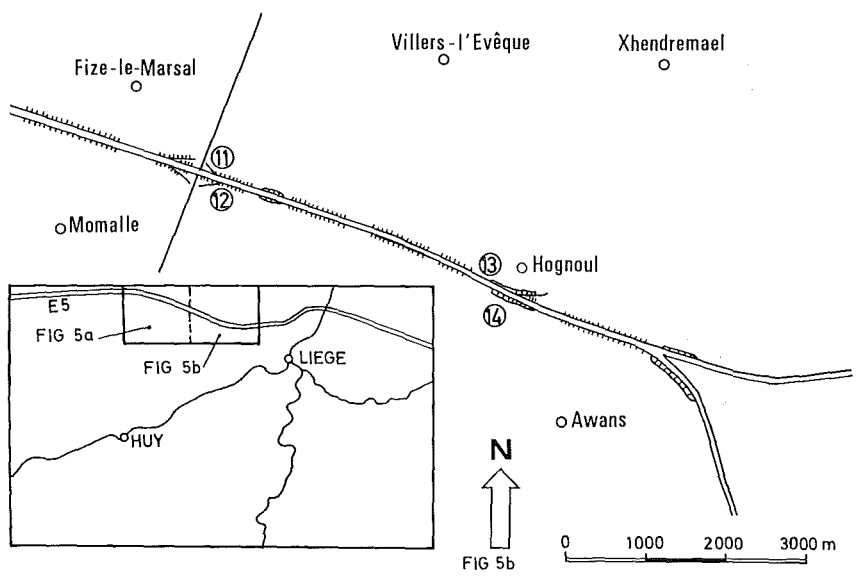
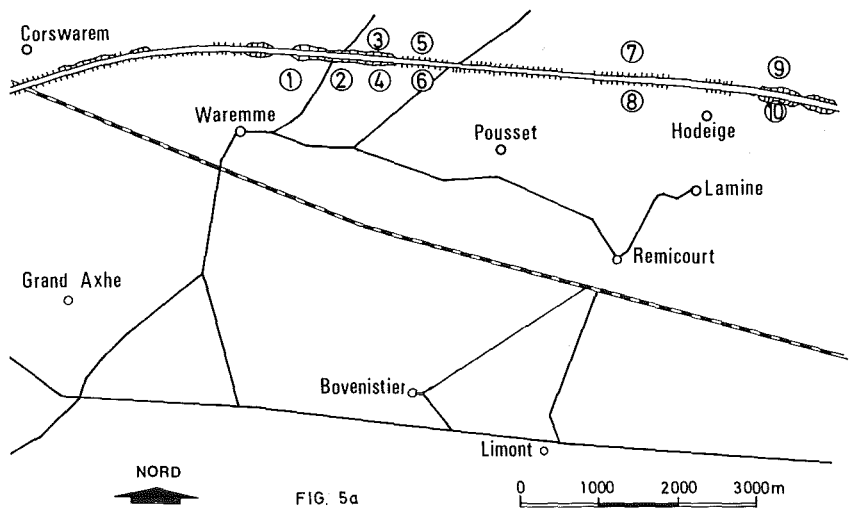


FIG. 5. — Autoroute « E5 ». Secteur étudié et répartition des différentes stations. 1 à 14 n° des stations ; barbules dirigées vers l'extérieur : autoroute en remblai ; barbules dirigées vers l'intérieur : autoroute en déblai.

furent peu nombreuses : 38 jours (dont 3 avec couverture neigeuse) et 31 jours respectivement contre 46,5 en moyenne (3); de plus, les gelées furent

(3) Ces chiffres sont obtenus en additionnant les nombres de jours de gels pendant les mois de décembre, janvier, février et mars.

peu importantes ainsi qu'en témoignent les moyennes mensuelles plus élevées pendant les hivers 1973-1974 et 1974-1975 ([7] et [2]). Les précipitations quant à elles ont été particulièrement importantes pendant les mois de septembre, octobre, novembre et décembre 1974. Ces différentes données sont résumées dans le tableau II ([7] et [2]).

#### A. — RÉPARTITION ANNUELLE DU CREEP PAR LES MESURES DIRECTES

La mesure des déplacements moyens mensuels de nos repères mobiles dans les différentes stations montre les faits suivants :

- La vitesse du *creep* se répartit en deux grandes familles de stations :
  - a) le groupe A, qui englobe les stations dont le talus est exposé au nord ou à l'est, où nous observons les déplacements les plus importants;
  - b) le groupe B, qui ne présente que des stations exposées au sud ou à l'ouest (fig. 5 et 6);
- Le mouvement de reptation du sol n'est pas uniforme au cours du temps. En effet, de décembre 1973 à mars 1974 et en février 1975, nous avons observé des déplacements mensuels nettement plus importants et ceci simultanément dans toutes les stations (fig. 6).

D'autres périodes d'accélération du *creep*, mais de moindre importance, peuvent être notées sur le graphique : en juin et septembre 1974.

La mise en parallèle des données fournies par la station de Bierset (station météorologique importante située à proximité de l'autoroute) d'une part et le déplacement de nos repères d'autre part, montre clairement (fig. 6) :

- que les déplacements mensuels les plus importants correspondent aux mois où il y a eu des périodes de gel;
- que les petites accélérations de juin 1974 et de septembre 1974 ne peuvent être mises en relation avec les conditions météorologiques de ces périodes. En effet, ni l'importance des précipitations mensuelles ni la grandeur des précipitations journalières ne sont différentes pendant ces périodes de ce qu'elles ont été pendant d'autres mois de l'année où nous observons des déplacements moins importants. Ces accélérations résultent peut-être du passage des engins de tonte.

#### B. — RÉPARTITION ANNUELLE DU CREEP D'APRÈS LES SOULÈVEMENTS DU SOL

Les stations ayant des appareils pour mesurer les soulèvements du sol sont au nombre de 6 (tableau I). Elles sont localisées sur des talus diversement orientés.

##### 1. — Influence des différents facteurs sur le soulèvement du sol.

Une analyse sommaire de la figure 7 montre qu'il existe deux types de soulèvement se différenciant à la fois par leur rapidité et leur amplitude : le premier type est très lent (de 2 à 5 jours) et de faible amplitude (0,5 mm

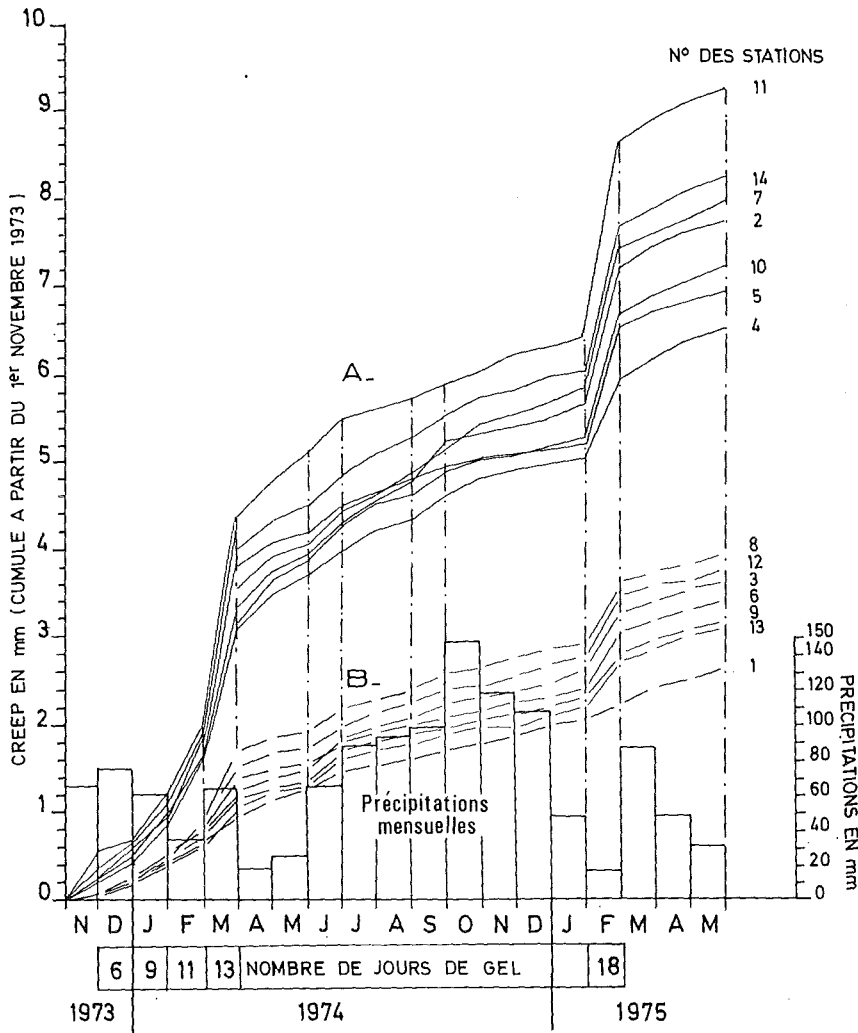


FIG. 6. — Relations entre le creep, les précipitations et le nombre de jours de gel par mois.

au maximum), le second type est rapide (quelques heures) et de forte amplitude (de 0,5 à plusieurs millimètres).

Les soulèvements rapides se produisent uniquement lorsque le sol gèle; les soulèvements lents et de faible amplitude se font par température positive et lorsque le taux d'humidité dans le sol augmente à la suite des précipitations (fig. 7). Bien entendu, la quantité d'eau accumulée dans la croûte gelée suit assez fidèlement les soulèvements du sol. Ces variations très importantes

TABLEAU II. — Comparaison des conditions météorologiques de la période de nos mesures à celles de la période 1947-1963 à la station météorologique de Bierset.

Précipitations relevées à Bierset (valeurs en mm/mois).

Mois	Minimum *	Moyenne *	Maximum *	1973 **	1974 **	1975 **
Janvier	21,6	70,8	103,2	—	59,7	48,8
Février	4,1	61,9	150,2	—	35	19,3
Mars	14,9	45,7	85,6	—	63,8	86,9 m
Avril	11,9	64,2	127,6	—	18,6	49,9
Mai	36,7	71,5	117,2	—	25,9	31,4 m
Juin	14,0	78,4	175,8	—	65,4	—
Juillet	24,7	85,7	136,2	—	89,2	—
Août	7,1	89,—	175,2	—	92,2	—
Septembre	12,3	72,4	151,8	—	98,2	—
Octobre	7,5	53,3	129,9	67,7	146,9	—
Novembre	11,9	66,7	117,8	64,8	118,9	—
Décembre	37,1	70,1	146,0	74,0	109,6	—
Année		831,7			924 m	

Mois	T° moy. mens.				Jours où T° min. < 0°				Nb. max. de jours où T° min. < - 10°			
	47-63 *	73 **	74 **	75 **	47-63 *	73 **	74 **	75 **	47-63 *	73 **	74 **	75 **
Janvier	2,2		5,2	6,0	12,9		6	3	11			
Février	2,0		4,0	3,3	14,0		10	19	22			
Mars	5,7		5,7	4,1	8,5		9	9	2			
Avril	8,9		9,1	7,4	2,9		4	0	0			
Mai	12,5		11,2		0,3							
Juin	15,5		14,8		0							
Juillet	16,9		15,5									
Août	16,9		16,9									
Septembre	14,9		13		0							
Octobre	10,5		6,3		1,0							
Novembre	5,8		6,2		4,9	10 (5)			0			
Décembre	3,2	2,1	6,3		11	13 (3)	0		2	3		

\* : Valeurs pour la période 1947-1963 (voir à ce sujet A. Hufty [2]).

\*\* : Données du Service de Météorologie de la Base Militaire de Bierset [7].

(3) et (5) : Jours de gel avec couverture neigeuse.

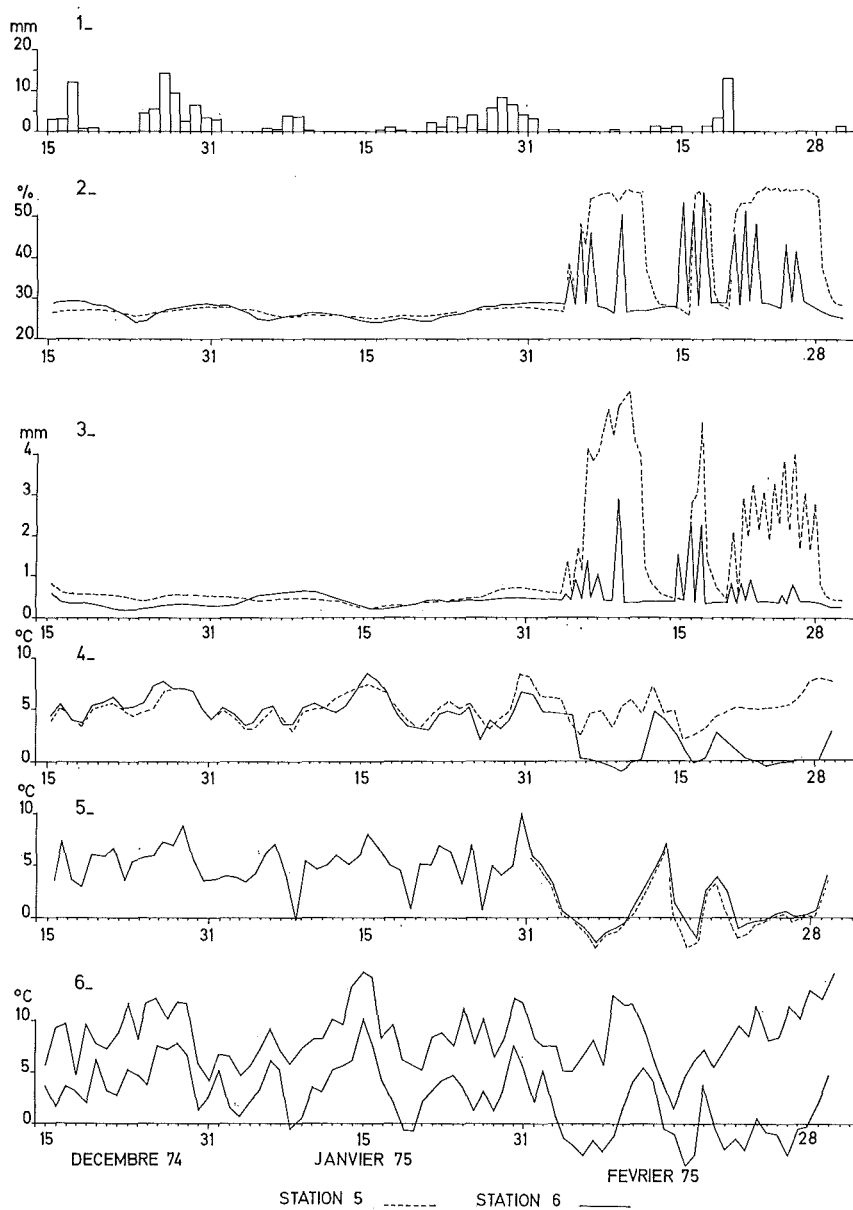


FIG. 7. — Stations 5 et 6 : soulèvement du sol.

1 : précipitations journalières observées à Bierset; 2 : teneur en eau du sol; 3 : soulèvement du sol; 4 : température dans le sol à 5 cm; 5 : température au niveau du sol; 6 : températures minimum et maximum observées à Bierset.

de la teneur en eau du sol sont à mettre en relation avec la formation de glace de ségrégation (voir à ce sujet A. Pissart [5] et A. L. Washburn [9]).

La comparaison des soulèvements du sol dans nos 6 stations permet, tout comme pour les mesures directes, de distinguer deux groupes de stations suivant l'orientation des pentes, à savoir les stations orientées au sud et à l'ouest et celles orientées au nord et à l'est. Les stations n° 5 et n° 6 sont représentatives respectivement du premier et du second groupe.

a) *Influence de la température.* — Nous avons déjà observé que les soulèvements importants (de plus de 0,5 mm) se produisent uniquement en temps de gel. Une comparaison plus fine du soulèvement et de la température montre que pour qu'un tel soulèvement se produise, la température minimum doit descendre en dessous de  $-1$  à  $-2$  °C au niveau des herbes, et ceci principalement au début d'une période de gel. Ces températures nettement négatives sont nécessaires pour contrebalancer le flux de chaleur venant du sol, l'effet protecteur de la végétation herbacée et ainsi, permettre le gel de l'eau contenue dans le sol et l'apparition de lentilles de glace de ségrégation.

Les longues périodes pendant lesquelles le sol reste gelé ne sont pas toujours favorables aux soulèvements cumulés importants. Ainsi, les soulèvements cumulés pendant la période du 20 février 1975 au 28 février 1975 sont de 13,87 mm, alors que pendant la période du 4 février 1975 au 12 février 1975 ils ne sont que de 8,48 mm (station n° 5, fig. 7). Somme toute, entre le 7 et le 10 février 1975, la croûte de sol gelé est presque en équilibre avec son milieu, si bien que les faibles variations de température entre le jour et la nuit n'entraînent pas de modifications importantes dans l'épaisseur du sol gelé.

Pendant l'hiver 1974-1975, nous avons relevé régulièrement les températures au sol et dans le sol de 4 de nos stations (stations n°s 3, 4, 5 et 6). En mettant en parallèle les soulèvements de nos témoins mobiles et les températures à 50 mm de profondeur, nous avons remarqué les faits suivants :

— Pendant le gel du sol, la température se maintient aux alentours de zéro degré au cours d'une période pouvant atteindre plusieurs jours (les 5, 6 et 7 février 1975 dans le cas de la station 5; fig. 7). Après cette période, la température tombe plus rapidement (les 8, 9 et 10 février 1975; fig. 7). Simultanément, le soulèvement de la surface du sol est assez régulier dès le début de la période de gel (seuls de faibles mouvements de descente diurnes du sol entravent ce mouvement).

— Pendant le dégel du sol, il y a également stabilisation de la température aux environs de zéro degré (les 10 et 11 février 1975; fig. 7), puis une augmentation rapide de celle-ci. Cette période est connue par les climatologues sous le nom d'« isothermal melting stage » [3] et par les péri-

glacialistes sous le nom de « zero curtain » [9]. Lors d'un dégel, la surface du sol descend très rapidement (du 10 au 11 février 1975; fig. 7).

— Après le dégel complet du sol, le repère se situe toujours à un niveau plus élevé qu'avant le gel. Il ne retourne au niveau initial que très progressivement (du 11 février à 19 h au 13 février à 7 h; fig. 7).

b) *Influence de l'humidité.* — Nos mesures de la teneur en eau du sol sont établies par pesée d'environ 50 g de sédiment avant et après dessiccation à l'étuve (24 h à 105°). Elles sont établies en pourcentage du poids sec de l'échantillon. Le poids sec considéré est celui de la fraction granulométrique dont le diamètre est inférieur à 420 microns. On estime en effet que la fraction grossière d'un sédiment a peu d'effet sur le comportement mécanique de ce dernier [1].

Les mesures du taux d'humidité dans le sol et du soulèvement ont été effectuées simultanément (fig. 7). L'échantillon est prélevé à la pelle de la façon suivante : lorsque la température est positive, nous prélevons  $\pm$  50 g de sédiment à 50 mm de profondeur; lorsque le sol est gelé, nous prélevons ces 50 g uniquement dans la couche de sol gelé.

Si nous mettons en relation le taux d'humidité dans le sol, les précipitations et le soulèvement, nous observons qu'il faut distinguer ce qui se passe au cours des périodes de gel et en dehors de celles-ci (fig. 7) :

— En dehors des périodes de gel, le taux d'humidité du sol suit d'assez près à la fois l'importance des précipitations dont il est tributaire et le soulèvement qui semble en résulter. Ceci se fait avec un à deux jours de décalage entre les maxima. Les minima du soulèvement coïncident assez avec les minima de la teneur en eau du sol. Ceci résulte du fait que lorsque le sol n'est pas gelé, seuls l'apport d'eau par les précipitations et les pertes par évaporation modifient le taux d'humidité du sol. Dès qu'il y a précipitation, une partie de l'eau entrant en contact avec le sol s'infiltré dans celui-ci et contribue à augmenter la teneur en eau d'une tranche de sol plus ou moins épaisse (cette eau augmente l'épaisseur du film d'eau retenu par capillarité autour des grains et réhydrate les minéraux gonflants [1]). Le sol augmente donc de volume, mais pour que le soulèvement soit maximum, il faut que l'épaisseur de sol affectée par cette modification du taux d'humidité soit maximum. Or, avec notre appareil, la tranche de sol étudiée a au moins 500 mm d'épaisseur; donc, le délai d'un ou deux jours est le temps nécessaire pour augmenter le taux d'humidité dans tout le profil.

— En temps de gel, la liaison entre le taux d'humidité dans le sol et le soulèvement semble moins nette, tout au moins pour les stations exposées au nord (fig. 7; station 5). En effet, dans ce cas, l'eau faisant augmenter le taux d'humidité provient uniquement du sol. Elle est aspirée du bas du profil vers les lentilles de glace de ségrégation [5]. Il y a donc augmentation du volume du sol en train de geler et une diminution de volume du sol sous la croûte gelée à la suite du départ de l'eau du bas du profil vers les lentilles



de glace. Mais des expériences réalisées en laboratoire ont montré que la diminution de volume sous le sol gelé est loin d'atteindre en valeur absolue l'augmentation de volume due à la croissance des lentilles de glace [6]. Le mouvement résultant est un soulèvement de la surface du sol. Si le sol reste gelé plusieurs jours consécutifs, il peut y avoir des soulèvements importants sans que le taux d'humidité du sol varie (fig. 7). En effet, les variations d'épaisseur de la couche gelée peuvent engendrer des positions variables des repères sans modification de son taux d'humidité (fig. 8).

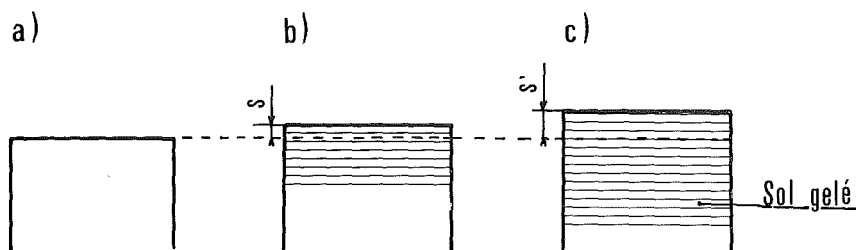


FIG. 8. — Soulèvements du sol sans modification de la teneur en eau de la croûte gelée. a) Sol non gelé; b) sol gelé sur 1 cm d'épaisseur, la croûte gelée ayant une teneur en eau de H %; c) sol gelé sur deux centimètres avec la même teneur en eau;  $2 S = S'$ ; S et S' : soulèvements respectifs en b) et en c).

Nous avons également pu observer que le taux d'humidité du sol après dégel diminuait régulièrement lorsque nous avons une succession journalière de cycles de gel et dégel du sol (fig. 7; du 4 au 9 février 1975). Ceci est vraisemblablement le résultat de l'évaporation et aussi du sous-écoulement d'une partie de l'eau de fonte des lentilles de glace de ségrégation.

Au point de vue de la quantité d'eau contenue dans le sol, nous observons une différence entre les pentes bordant l'autoroute en remblai et celles bordant l'autoroute en déblai : les pentes en remblai ont un substrat contenant légèrement plus d'eau que les pentes résultant de déblais et ceci pour une même orientation. Ceci peut paraître paradoxal; or il n'en est rien. En effet, les tranchées sont situées en topographie élevée et en Hesbaye sèche; comme le limon et les roches sous-jacentes sont très perméables, cette situation est très favorable à un sol sec. Dans les remblais, la situation est toute autre : les talus ne sont généralement constitués que d'une couche de près de 1 m de limon reposant sur des schistes provenant des terrils de la région liégeoise. Or ces schistes assez imperméables entravent la percolation de l'eau dans le limon. De plus, l'autoroute « E5 » ne comportant pas de dispositif d'évacuation de l'eau provenant des bandes de roulement, tout au moins sur les tronçons en remblai, cette eau s'écoule partiellement sur les talus. Enfin, de l'eau de pluie est soulevée par les véhicules qui passent

sur l'autoroute et est entraînée par le vent vers l'un ou l'autre talus. Nous reviendrons sur ce phénomène plus loin.

c) *Influence du type de sédiment.* — Tous les auteurs s'accordent pour dire que la granulométrie influence le soulèvement du sol [1]. Ici, nous n'avons pas étudié ce facteur à cause de la grande homogénéité granulométrique du limon constituant les pentes étudiées (fig. 4).

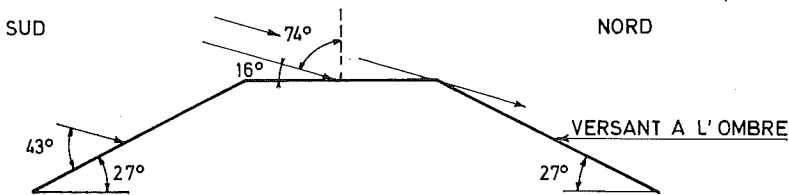
d) *Influence microclimatique.* — L'importance du facteur « orientation des pentes » est apparue très clairement pendant l'hiver 1973-1974 et spécialement pendant le mois de mars 1974, où le nombre de jours de gel fut important. En effet, les résultats des mesures du *creep* et du soulèvement du sol montrent que les stations s'ordonnent en deux grands groupes suivant l'orientation des pentes.

C'est pour rechercher les causes de cette différenciation que nous avons relevé les températures dans le sol et au niveau du sol de 4 stations situées sur des pentes diversement orientées et équipées des deux types d'appareils décrits plus haut. Les températures ont été relevées chaque jour à 19 h et aussi à 7 h en temps de gel. En plus des mesures journalières, nous avons effectué des mesures toutes les heures les 30 et 31/10/1974, les 30 et 31/12/1974 et les 1<sup>er</sup> et 2 mars 1975. En outre, nous avons mesuré l'importance relative des précipitations sur les pentes de part et d'autre de l'autoroute. Cette mesure a été réalisée en récoltant chaque semaine l'eau contenue dans des récipients situés de part et d'autre des bandes de roulement.

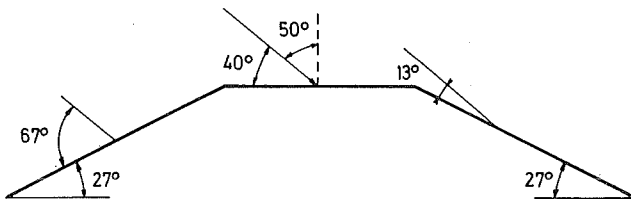
— *Les températures.* Les observations ont montré des différences thermiques systématiques. En effet, les températures au niveau du sol à 19 h sont presque toujours plus élevées sur les talus exposés au sud. Cette différence va de 0,1 à 0,2 °C par temps couvert à plusieurs degrés lorsque le temps est ensoleillé (fig. 7). Ces différences thermiques permettent un gel plus intense et plus fréquent du talus exposé au nord, ainsi que le montrent les soulèvements observés (fig. 7). En effet, les talus exposés au sud ne sont jamais restés gelés plus de 24 h pendant la période couverte par nos observations, tandis que les talus exposés au nord conservaient un sol gelé pendant plusieurs jours (fig. 7). Une des causes de cette différenciation thermique est bien entendu l'exposition des talus aux rayons solaires ainsi que le montre la figure 9.

— *Les précipitations reçues de part et d'autre de l'autoroute.* Les vents de pluie dominants que nous avons observés proviennent du sud-ouest ou de l'ouest-sud-ouest. La direction de ces vents fait donc un angle compris entre 22°30' et 45° avec l'axe de l'autoroute aux environs de Wareme (autoroute orientée ouest-est). Le vecteur vitesse des vents de pluie dominants a donc une composante transversale par rapport à l'autoroute. On devrait ainsi s'attendre à ce que le talus exposé au sud (talus au vent) reçoive plus d'eau que le talus nord (sous le vent). Mais la réalité est beaucoup plus

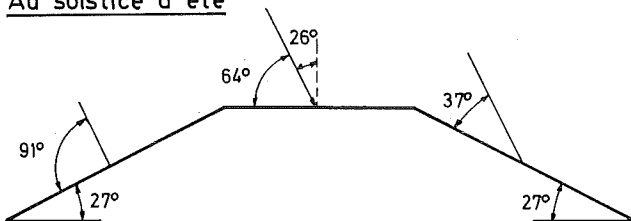
a) Au solstice d'hiver



b) A l'équinoxe de printemps



c) Au solstice d'été



d) A l'équinoxe d'automne

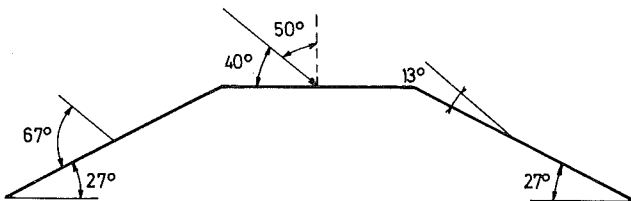


FIG. 9. — Angle d'incidence, à midi, des rayons solaires sur les talus exposés au nord et au sud.

complexe. En effet, la quantité d'eau récoltée par des récipients que nous avons placés de part et d'autre de l'autoroute (en vue d'estimer la quantité de matières solides soulevées par les véhicules) montre qu'il y avait en moyenne de 1,5 à 2 fois plus d'eau dans les récipients situés au nord de

l'autoroute et ceci quand l'autoroute est sur remblai; cette proportion n'est que de 1 à 1,5 dans les déblais.

A partir de ces données, nous avons calculé que dans le cas d'un vent de sud-ouest de 10 km/h et des gouttes de pluie de 4 mm (vitesse limite de chute : 8 m/s), les pentes situées au nord de l'autoroute reçoivent plus d'eau par unité de surface que les talus situés au sud de l'autoroute. Ce calcul montre également une nette différenciation entre les pentes en déblai et les pentes en remblai. Ces résultats sont résumés dans le tableau III.

TABLEAU III. — Quantité d'eau reçue par unité de surface par les différents talus d'une autoroute orientée est-ouest comparée à celle reçue par une surface plane.

Exposition	Nord	Sud
Type de talus		
Remblai	1,5 P	0,98 P
Déblai	0,78 P	1,5 P

Quantité d'eau reçue par la surface plane : P; Vent de secteur S.-O. : 10 km/h; Diamètre des gouttes : 4 mm; pentes : 25°.

Ceci explique la moins bonne différenciation thermique et hydrique des deux talus en déblai comparée à celle des deux talus en remblai.

## 2. — Estimation de l'importance du creep à partir des mesures de soulèvement du sol.

a) *Calcul de l'importance du creep potentiel.* — Rappelons que le *creep* potentiel « c » (*creep* maximum engendré par un soulèvement « S » donné) est égal à :  $c = S \operatorname{Tg} \varphi$  (l'angle de pente  $\varphi = 27^\circ$  dans le cas présent). Pour nos 6 stations, nous avons calculé le *creep* potentiel à partir des soulèvements cumulés en temps de gel et lorsque la température est positive (4) (tableau IV).

Ce tableau nous montre que le *creep* potentiel dû au gel représente la plus grande partie du *creep* total. D'autre part, il établit que la valeur du *creep* est plus élevée dans les remblais que dans les déblais, sur les talus

(4) Comme nos mesures du soulèvement du sol n'ont été effectuées qu'en période hivernale, nous n'avons pas la valeur annuelle du *creep* dû aux variations du taux d'humidité du sol lorsque la température est positive. Pour estimer néanmoins la valeur annuelle de ce type de *creep*, nous avons multiplié par 12 le *creep* potentiel pendant un mois où le sol n'a pas gelé. Ce mois, en 1973-1974 comme en 1974-1975, était le mois de janvier.

TABLEAU IV. — Importance du creep potentiel dans les différentes stations.

Période		Stations											
		1		2		3		4		5		6	
		G	H	G	H	G	H	G	H	G	H	G	H
Année 1974	mm/an									16,02	1,62	10,28	2,52
	%									89	11	80	20
Année 1975	mm/an	2,20	3,36	9,78	2,76	12,36	3,36	6,34	3,84	8,31	2,52	8,31	2,52
	%	40	36	78	22	79	21	62	38	77	23	77	23

G = *creep* dû au gel; H = *creep* engendré par les alternances gel-dégel.

exposés au nord ou à l'est que sur les talus exposés au sud ou à l'ouest. De plus, on constate que le *creep* dû aux variations d'humidité lorsque le sol n'est pas gelé est moins importante sur les versants exposés au nord ou à l'est que sur les versants exposés au sud ou à l'ouest.

b) *Calcul de l'importance du creep réel.* — Rappelons que le *creep* réel peut se calculer à partir des soulèvements du sol par la formule :  $c = S \operatorname{Tg} \frac{\varphi}{K}$

(voir § II). Dans cette formule, le facteur « K » varie suivant la cohésion du sol, c.-à-d., pour un sol déterminé, avec la teneur en eau de ce sol. A. Young [11] a observé un facteur  $K = 2$  pour un sol soumis aux alternances gel-dégel en laboratoire (§ II).

Nous avons estimé ce facteur en comparant le soulèvement du sol avec le *creep* observé par mesures directes et ceci pour diverses périodes. Il est de 1,5 en janvier 1974, 9 en février 1974, 3,2 en mars 1974 et 11 en février 1975. Il apparaît donc que ce facteur « K » est plus élevé en temps de gel qu'en temps ordinaire, alors qu'à première vue cela devrait être le contraire (la cohésion du sol est très faible au dégel, car la teneur en eau est très élevée). Il semble que cette situation est le résultat des faibles gelées pendant ces périodes. En effet, au cours de celles-ci, le sol a été gelé sur 10 cm tout au plus, c.-à-d. uniquement dans les zones où se développent les racines des herbes. Or celles-ci retiennent fortement le sol. Ainsi, les racines de luzerne peuvent résister à des contraintes de  $675 \text{ kg/m}^2$  [8], ce qui limite le *creep*. Par contre, lorsqu'il ne gèle pas, les modifications de volume affectent une épaisseur beaucoup plus considérable, si bien que l'effet protecteur de la végétation est moins marqué.

## V. — CONCLUSIONS

Les deux types de mesure que nous avons effectuées nous ont permis de montrer combien est importante l'influence du gel sur le *creep*. Bien que le gel n'ait été ni très profond ni très fréquent pendant la période couverte par nos observations, au moins 40 % du *creep* annuel peut être expliqué par l'apparition de glace de ségrégation. C'est la première fois que l'importance du gel est mise en évidence par des conditions aussi défavorables que celles des hivers 1973-1974 et 1974-1975. En effet, pendant ces hivers, le nombre de jours de gel (5) à Bierset a été respectivement de 38 et 31 [7], alors que la moyenne de jours de gel dans notre pays est de 46,5 [2]. De plus, les températures ne se sont pas abaissées considérablement sous

---

(5) Le nombre de jours de gel hivernaux a été calculé en additionnant le nombre de jours de gel pendant les mois de décembre, janvier, février et mars.

0 °C, le minimum étant de - 8,5° en février 1974 (6). Le « frost creep » semble donc avoir une importance considérable, même dans les régions ne subissant que de faibles et peu fréquentes gelées.

Notre étude a porté sur des pentes artificielles. Les résultats doivent être vérifiés sur des versants naturels. C'est l'objet de la recherche que nous poursuivons actuellement.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] BAVER L. D. — *Soil Physics*, 3th edition, John Wiley & Sons Inc., New York, London, Sydney, 1965, 489 p.
- [2] HUFTY A. — *Le climat dans la région liégeoise*. Thèse de doctorat, Liège, 1966, 343 p.
- [3] GEIGER R. — *The climate near the ground*, 3th edition, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1971, 611 p.
- [4] KIRKBY M. J. — *Measurement and theory of soil creep*, dans S. A. SCHUMM and M. P. MOSLEY, *Slope morphology*, Dowden, Hutchinson and Ross Inc., 1967, pp. 400-407.
- [5] PISSART A. — *Glace de ségrégation*, dans *Bulletin de la Société géographique de Liège*, n° 11, 1975, pp. 86-96.
- [6] PISSART A. et WIDACKI W. — *Expériences sur des sols gelés en laboratoire*. Travaux non publiés, Université de Liège, 1975.
- [7] SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE DE BIERSET. — *Données de températures et de précipitations*, Bierset, du 1/12/1973 au 31/5/1975 (inédit).
- [8] VANDIEST-WALLON A. — *Aménagement, paysages et réseau routier. Le cas de l'autoroute des Ardennes de Ave-et-Auffe à Transinne*. Mémoire de licence en Sciences géographiques, Louvain, 1974 (inédit).
- [9] WASHBURN A. L. — *Periglacial processes and environment*, Edward Arnold Ltd., London, 1970, 320 p.
- [10] WINKIN P. — *Les pentes en Ardenne depuis Houffalize jusqu'à Recht. Etude géomorphologique*. Mémoire de licence en Sciences géographiques, Liège, 1973 (inédit).
- [11] YOUNG A. — *Slopes*. *Geomorphology Text*, 3, K.M. Clayton, University of East-Anglia, 1972, 288 p.

---

(6) Des températures plus basses ont été observées en décembre 1973, mais à cette époque le sol était couvert d'une couche d'environ 5 cm de neige, ce qui limita l'action du gel.

