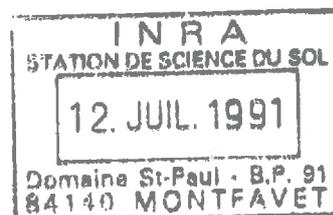


UNIVERSITE LOUIS PASTEUR - STRASBOURG I
U.E.R. DE GEOGRAPHIE
LABORATOIRE DE GEOGRAPHIE PHYSIQUE
R.C.P. 741 DU C.N.R.S.

TH-139
GC26



LA REPTATION:
Mesure in situ en relation avec les conditions
hydriques et thermiques du sol
(site forestier dans les Vosges granitiques).

Anne-Véronique AUZET

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR
STRASBOURG I
MENTION : GEOGRAPHIE PHYSIQUE

JURY : VOGT H.
GODARD A.
MERCIER J.L.
DE PLOEY J., rapporteur externe
GOUNOT M., rapporteur interne

STRASBOURG, OCTOBRE 1985

*Cet ouvrage reprend pour l'essentiel la Thèse soutenue le 2 octobre 1985
pour l'obtention du Doctorat de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg.*

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE : APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA REPTATION	5
INTRODUCTION	5
CHAPITRE I : LA REPTATION, UN PROCESSUS ACTUEL DU FONCTIONNEMENT DES VERSANTS	7
1.1 Fonctionnement et évolution des versants	7
1.2 Les déplacements des matières solides	8
1.3 Les définitions de la reptation	11
1.3.1 L'efficacité	12
1.3.2 Les causes	14
CHAPITRE II : INSTRUMENTS THEORIQUES ET TECHNIQUES POUR L'ETUDE DES DEPLACEMENTS PAR REPTATION	19
2.1 Mécanique des sols et comportement rhéologique	19
2.1.1 Les lois physiques	19
2.1.2 La détermination empirique du comportement des sols	22
2.2 Les modèles théoriques de reptation	25
2.2.1 Reptation visqueuse	25
2.2.2 Gonflements-rétractions	25
2.2.3 Diffusion des particules	27
2.3 Techniques de mesure de la reptation	28
2.3.1 Les instruments qui ne rendent pas compte de l'allure du profil	33
2.3.2 Les instruments qui essaient de rendre compte de l'allure du profil	35
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	39
DEUXIEME PARTIE : LE CAPTEUR DE MESURE DE LA REPTATION	41
INTRODUCTION	41
CHAPITRE III : METHODE ET REALISATION DES MESURES DE REPTATION A L'AIDE DU CAPTEUR A JAUGES D'EXTENSOMETRIE	43
3.1 Principe et conception du capteur	43
3.2 Réalisation du capteur et mise en place	47
3.3 Description de la chaîne de mesure	50
3.4 Les différentes étapes du traitement des mesures	53
3.5 Conclusion	55

CHAPITRE IV : ESTIMATION DE L'ERREUR SUR LES MESURES ET TEST DE LA PROCEDURE DE DEPOUILLEMENT	57
4.1 Précision des mesures de déformations	58
4.2 Précision de l'approximation numérique du modèle de dépouillement	62
4.3 Influence des erreurs de mesure et de la précision du modèle de dépouillement sur la reconstitution des déplacements	64
CHAPITRE V : VERIFICATIONS DU FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR	65
5.1 Sur les maquettes en bois	65
5.2 Dans le modèle réduit de versant	67
TROISIEME PARTIE : APPLICATIONS ET RESULTATS	73
INTRODUCTION	73
CHAPITRE VI : LE SITE DE SCHILDMATT ET SON EQUIPEMENT	75
6.1 Choix du site	77
6.2 Présentation du site	78
6.2.1 Le cadre géomorphologique	78
6.2.2 Formation superficielle et sol	79
6.2.3 Le contexte climatique	86
6.3 L'équipement du site de Schildmatt	92
CHAPITRE VII : LA REPTATION AU SITE DE SCHILDMATT (novembre 1984 - juillet 1985)	99
7.1 Règles adoptées pour le dépouillement des mesures	101
7.2 L'évolution des déformations des jauges : mise en évidence des périodes de déplacements	103
7.3 Les déplacements	108
7.3.1 Le déplacement global sur la période de janvier à juillet 1985	108
7.3.2 L'engel et le dégel du sol	110
7.3.3 La fonte de la neige	112
7.3.4 Les épisodes pluvieux et précipitations orageuses	115
7.3.5 Les évènements résiduels	115
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE	117
CONCLUSION GENERALE	119
BIBLIOGRAPHIE	127
ANNEXES	145

LISTE DES FIGURES

Les figures sont numérotées par chapitres.

fig. 1.1	Classement des processus de transfert de matières solides en fonction de leur vitesse respective. (in ANDERSON et BURT, 1981).	p. 9
fig. 1.2	Classification triangulaire des mouvements de masse. (in CARSON et KIRKBY, 1972).	p. 9
fig. 1.3	Indicateurs de reptation. (in SELBY, 1982).	p. 11
fig. 2.1	Relations entre caractéristiques physiques du sol et résistance au cisaillement. (d'après STATHAM, 1977).	p. 20
fig. 2.2	Loi de COULOMB. (in COSTET et SANGLERAT, 1981).	p. 20
fig. 2.3	Trois types de comportement idéalisés des milieux continus soumis à une contrainte. (in STATHAM, 1977).	p. 22
fig. 2.4	Limites d'ATTERBERG. (in SELBY, 1982).	p. 23
fig. 2.5	Relation entre indice de plasticité et % de particules pour trois types d'argile. (in SELBY, 1982).	p. 23
fig. 2.6	Modèle de reptation de KIRKBY et profil théorique de vitesse. (in KIRKBY, 1967).	p. 26
fig. 2.7	Tubes d'ANDERSON. (in STATHAM, 1974).	p. 30
fig. 2.8	Appareillage de mesure inclinométrique de MORAND. (in KAISER, 1980).	p. 30
fig. 2.9	T-peg de KIRKBY. (in KIRKBY, 1967).	p. 30
fig. 2.10	Inclinomètre d'ANDERSON. (in ANDERSON et FINLAYSON, 1975).	p. 31
fig. 2.11	Tests pillars. (in JAHN et CIELINSKA, 1974).	p. 31
fig. 2.12	Young's pit. (in STATHAM, 1981).	p. 31
fig. 2.13	Système de RASHIDIAN. (in RASHIDIAN, 1985).	p. 31
fig. 2.14	Cônes de SELBY. (in STATHAM, 1981).	p. 32
fig. 2.15	Détecteur de mouvement de TROEH (in TROEH, 1975).	p. 32
fig. 2.16	Appareil de FINLAYSON. (in FINLAYSON et OSMASTON, 1977).	p. 32
fig. 2.17	Cylindre à acide fluorique. (in ANDERSON et FINLAYSON, 1975).	p. 32

fig. 3.1	Chaîne de mesure de la reptation.	p. 44
fig. 3.2	Le capteur à jauges d'extensométrie.	p. 45
fig. 3.3	Montage des jauges sur les deux faces de la lame à un niveau de mesure.	p. 45
fig. 3.4	Montage des jauges dans un demi-pont de Wheatstone.	p. 45
fig. 3.5	Protection d'une jauge.	p. 45
fig. 3.6	Partie de la lame assimilée à un arc de cercle.	p. 54
fig. 4.1	Histogrammes des écarts par rapport à la moyenne des mesures pour 50 séries de mesures effectuées avec chacun des trois capteurs, et pour l'ensemble de ces 150 séries.	p. 59
fig. 4.2	Droites de Henry des écarts par rapport à la moyenne des 50 séries de mesures effectuées avec chacun des trois capteurs, et de l'ensemble des 150 séries.	p. 60
fig. 4.3	Reconstitution trigonométrique des courbes simulées.	p. 63
fig. 4.4	Influence des erreurs aléatoires des mesures de déformations sur la reconstitution de courbes simples. (erreurs prélevées dans une série pseudoaléatoire, $\sigma = 9\mu\text{m/m}$).	p. 63
fig. 5.1	Profils de déformations et de déplacements établis sur la maquette 2 et forme réelle.	p. 66
fig. 5.2	Profils de déformations et de déplacements établis sur la maquette 3 et forme réelle.	p. 66
fig. 5.3	Le modèle réduit de versant du Centre de Géomorphologie de Caen. (in VAN VLIET-LANOE et COUTARD, 1984).	p. 68
fig. 5.4	Profils de déformations mesurées et de déplacements calculés à trois moments du dégel -1er cycle, capteur CAEN1.	p. 70
fig. 5.5	Profils de déformations mesurées et de déplacements calculés à trois moments du dégel -2ème cycle, capteur SCHILD3.	p. 70
fig. 5.6	Evolution des déformations mesurées à trois niveaux pendant le dégel, et de l'épaisseur Z de sol dégelé.	p. 71
fig. 6.1	Bassin versant de la Petite Fecht à Sultzèren : Carte de localisation du site de Schildmatt et des équipements climatologiques cités dans le texte.	p. 76
fig. 6.2	Courbes granulométriques cumulées de la fraction fine (<2mm) d'échantillons prélevés dans les différents horizons au site de Schildmatt.	p. 80
fig. 6.3	Caractéristiques physiques du sol au site de Schildmatt	p. 80
fig. 6.4	Courbes de rétention hydrique $\theta(pF)$ établies en désorption pour le site de Schildmatt.	p. 82
fig. 6.5	Courbes de conductivité hydraulique $K(\psi)$, établies en désorption pour le site de Schildmatt.	p. 82

fig. 6.6	Précipitations annuelles au Lac Vert (1044 m) et au Geisberg (743 m) : 1976 - 1984.	p. 87
fig. 6.7	Moyenne géométrique et intervalle de confiance des précipitations mensuelles corrigées (30j) au Geisberg (743 m) : 1976 - 1984. Précipitations mensuelles corrigées (30j) au Geisberg de novembre 1984 à juillet 1985.	p. 87 p. 87
fig. 6.8	Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales au Geisberg (840 m) : moyennes 1976 - 1984 et valeurs de novembre 1984 à juillet 1985.	p. 89
fig. 6.9	Enneigement : a) moyenne des hauteurs de neige (1921/22 - 1969/70) relevées le 1er jour de chaque pentade au Lac Noir (963 m) et hauteur moyenne relevée au site de Schildmatt au cours de l'hiver 1984/85. b) fréquence cumulée des hauteurs de neige au Lac Noir (963m) : 49 hivers (1921/22 - 1969/70).	p. 89
fig. 6.10	Localisation des équipements sur le site de Schildmatt	p. 95
fig. 7.1	Synoptique des évènements climatiques et des jours de mesures : novembre 1984 - juillet 1985.	p. 100
fig. 7.2	Evolution des déformations relatives à chaque niveau d'un jour de mesure à l'autre pour le capteur SCHILD3.	p. 104
fig. 7.3	Evolution du climat et des conditions hydriques et thermiques du sol : décembre 1984 - mars 1985.	p. 107
fig. 7.4	Conditions hydriques du sol les 9/02 et 4/03/85.	p. 111
fig. 7.5	Evolution des déformations et des déplacements au cours de l'engel et du dégel : 9/02/85 - 4/03/85.	p. 111
fig. 7.6	Evolution des déformations et des déplacements au cours du dégel : 25/02/85 - 4/03/85.	p. 111
fig. 7.7	Evolution des déformations au cours de la fonte de fin janvier : 21/01/85 - 3/02/85.	p. 113
fig. 7.8	Evolution des déformations et des déplacements au cours de la fonte de neige de fin mars : 18/03/85 - 27/03/85.	p. 113
fig. 7.9	Evolution des conditions hydriques du sol : 21/01/85-3/02/85	p. 114
fig. 7.10	Evolution des conditions hydriques du sol : 18/03/85-1/04/85	p. 114
fig. 7.11	Evolution des conditions hydriques du sol : 6/04/85-22/04/85	p. 116
fig. 7.12	Evolution des déformations liées à un orage : 26/07/85-29/07/85.	p. 113
fig. 7.13	Evolution des conditions hydriques du sol : 22/07/85-29/07/85	p. 116

LISTE DES TABLEAUX

Les tableaux sont numérotés par chapitres.

tab. 1.1	Ordre de grandeur des mouvements de masse lents en fonction des zones climatiques (JAHN, 1984).	p. 13
tab. 1.2	Vitesse de la reptation dans les Monts Sudètes polonais. (JAHN, 1981).	p. 13
tab. 1.3	Vitesse moyenne de la reptation établie sur la période 1963 - 1975 dans les Pennines du Sud (Derbyshire, Northern England) à 350 m d'altitude et sur une pente de 25°. (d'après Young, 1978).	p. 13
tab. 1.4	Différents processus de reptation : définitions complémentaires.	p. 16
tab. 2.1	Inventaire des instruments utilisés pour la mesure de la reptation.	p. 29
tab. 2.2	Vitesse (mm/an) des déplacements par reptation mesurée en 20 sites avec six techniques différentes. (in ANDERSON et COX, 1978).	p. 38
tab. 3.1	Réalisation d'un capteur : conception et choix techniques.	p. 49
tab. 4.1	Ecart type (en $\mu\text{m}/\text{m}$) des écarts à la moyenne de 50 séries de mesures, par capteur, par niveau et tous niveaux confondus, ainsi que pour les trois capteurs tous niveaux confondus.	p. 61
tab. 6.1	Postes d'observation climatologiques utilisés.	p. 86
tab. 6.2	Equipement du site de Schildmatt.	p. 94
tab. 7.1	Déplacements par reptation mesurés au site de Schildmatt.	p. 109

LISTE DES ANNEXES

Les annexes sont numérotées en fonction des chapitres auxquels elles se rapportent.

annexe 3.1	Les jauges d'extensométrie.	p. 143
annexe 3.2	Mode opératoire pour la fabrication du capteur à jauges d'extensométrie.	p. 145
annexe 3.3	Programme de gestion de fichiers et de dépouillement des mesures de reptation effectuées avec un capteur à jauges d'extensométrie.	p. 149
annexe 4.1	Effectif des écarts par rapport à la moyenne observés sur 50 séries de mesure effectuées par capteur, tous niveaux confondus a) sans déconnexion entre les séries, b) avec déconnexion - reconnexion entre les séries.	p. 153
annexe 4.2	Simulation de courbes simples : déplacements calculés par formules trigonométriques et reconstitués par le modèle de dépouillement a) Essai 1 : arc de cercle (rayon = 30, 15, 10, 7.5 et 6 m) b) Essai 2 : composition de deux arcs de cercle identiques mais alternativement convexe et concave (rayon = 30, 15, 10, 7.5 et 6 m).	p. 155
annexe 5.1	Vérification des capteurs : forme réelle des maquettes en bois et reconstitution à l'aide des capteurs.	p. 157
annexe 5.2	Influence des erreurs de mesure aléatoires sur la reconstitution des formes des maquettes en bois avec chaque capteur.	p. 159
annexe 5.3	Déformations relatives mesurées et déplacements calculés le long d'un profil dans le modèle réduit de versant (Centre de Géomorphologie du C.N.R.S., CAEN) au cours du dégel : les deux cycles CAEN1 et CAEN2.	p. 161

annexe 6.1	Description du profil pédologique du site de Schildmatt.	p. 163
annexe 6.2	Description des lames minces prélevées au site de Schildmatt : litière et horizon superficiel.	p. 165
annexe 6.3	Courbes de rétention hydrique : valeurs expérimentales.	p. 167
annexe 6.4	Caractéristiques mécaniques du sol mesurées au site de Schildmatt : limites d'Atterberg et résistance à la pénétration.	p. 169
annexe 6.5	Données climatiques utilisées pour les figures dans le texte.	p. 171
annexe 7.1	Evolution des déformations relatives à chaque niveau d'une mesure à l'autre : capteur SCHILD1.	p. 173
annexe 7.2	Evolution des déformations relatives à chaque niveau d'une mesure à l'autre : capteur SCHILD2.	p. 175
annexe 7.3	Valeurs des déplacements calculés aux différentes profondeurs à partir des déformations mesurées avec les trois capteurs au site de Schildmatt.	p. 177
annexe 7.4	Mesures effectuées avec les tubes d'Anderson.	p. 179
annexe 7.5	Valeurs brutes des mesures effectuées au site de Schildmatt avec chacun des trois capteurs.	p. 181
annexe 7.6	Conditions hydriques du sol au site de Schildmatt.	p. 185

AVANT-PROPOS

La rédaction de cette thèse est aussi pour moi l'occasion de faire le bilan des conditions dans lesquelles j'ai effectué ce travail : conditions matérielles, ambiance, contacts, échanges.

Pour effectuer cette thèse, j'ai bénéficié d'un contrat de deux ans avec le Ministère de l'Industrie et de la Recherche : je ne dirai jamais assez combien pour moi ce statut de salarié a été important.

Le Laboratoire de Géographie Physique (R.C.P. 741 du C.N.R.S.), au sein duquel j'ai réalisé ce travail, a financé tous les équipements et les déplacements. La place que j'y ai eue m'a permis d'abuser largement de la disponibilité des uns et des autres.

J'ai pu prendre contact avec d'autres laboratoires de Géographie ou spécialisés dans des domaines scientifiques et techniques : leurs compétences respectives ont été indispensables à la réalisation de ce travail. Il s'agit plus particulièrement des :

- Centre de Géomorphologie du C.N.R.S. à Caen,*
- Department of Geography de l'Université de Durham (G.B.),*
- Laboratoire de Mécanique des Sols du Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts à Antony,*
- Section d'Essais sur Modèles du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et du Centre d'Etude Technique de l'Equipement de l'Est à Strasbourg.*

Le sujet de cette thèse m'a été donné par Jean-Luc MERCIER, qui a eu l'idée de développer un tel capteur. J'espère en avoir correctement assumé l'héritage.

Je tiens ici à remercier plus particulièrement Bruno AMBROISE, qui a encadré et suivi mon travail. Le capteur, dans sa forme actuelle, et tous les tests qui en ont jalonné le développement n'auraient pu être effectués sans son aide.

Je tiens à remercier également Henri VOGT d'avoir accepté la direction de ma thèse et de m'avoir largement favorisé les contacts scientifiques.

Je tiens encore à dire combien j'ai apprécié que MM. les Professeurs Michel GOUNOT et Jan DE PLOEY aient accepté d'être les rapporteurs de ce travail, et que MM. les Professeurs Alain GODARD, Jean-Luc MERCIER et Henri VOGT aient bien voulu faire partie du Jury.

Je remercie M. DIRUY, Directeur de la Section d'Essais sur Modèles du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de m'avoir accueillie dans sa section et d'avoir accepté de critiquer mon travail.

Je remercie enfin Brigitte VAN VLIET-LANOË de m'avoir introduite au Centre de Géomorphologie du C.N.R.S. à Caen et de m'avoir, avec Jean-Pierre COUTARD, aidée à mettre en oeuvre la "manip" dans le modèle réduit.

La liste de ceux qui m'ont aidée d'une manière ou d'une autre est encore longue :

- à l'ambiance : Daniel(s) VIVILLE et REUTENAUER, Jean-Luc MONNON, Kyong-Seob OH, Richard, Georges NAJJAR, Bruno, Oussama,
- aux infos climatiques : Patrice PAUL, Françoise et Alain UNTEREINER,
- à l'assistance technique (oh combien indispensable !) : Richard BRAUN et Philippe BRIANÇON (RCP 741 du C.N.R.S.), les ateliers du C.N.R.S. à Cronenbourg, Gérard GUILLEMET (Centre de Géomorphologie du C.N.R.S., Caen), MM. SIMON et TIVERON (L.C.P.C.), M. DUVAL (C.E.T.E., Strasbourg),
- à la cartographie : Christophe SIRA, Liliane HEINTZ-NAJJAR, Annie BOUZEGHAIA,
- à la reprographie : Aimé KAUPP,
- à la dactylographie et au reste : Claire, BB, Jacqueline, Jean-Pierre, Babeth, Jack et les autres,
- à la correction des fôtes : Claire, Manuel et Albert.

INTRODUCTION GENERALE

La reptation est généralement définie comme un mouvement lent, dirigé vers l'aval, des formations superficielles et du sol, provoquant une déformation sans rupture de leur profil. Des mesures récentes, à des pas de temps courts, ont en outre montré que ce déplacement pouvait se produire dans toutes les directions de l'espace, mais que la composante gravitaire constituant la force motrice essentielle, la résultante est bien dirigée vers l'aval.

Le caractère imperceptible, sauf sur de longues périodes, de ces déplacements et la difficulté qu'il y a à les mesurer de façon précise -donc d'en évaluer l'importance- en ont fait un processus de façonnement des versants somme toute peu étudié jusqu'à ces dernières années, bien que très souvent cité. C'est pourtant l'un des éléments du bilan d'érosion d'un versant, particulièrement important en l'absence de processus plus remarquables tels que les glissements, les éboulements, l'érosion pluviale, les chablis.

Le terme de "reptation" recouvre en fait une série de processus : gonflements et rétractions sous l'effet d'alternances d'humidification et de dessiccation, ou de gel et de dégel, perturbations liées à l'activité biologique.

La reptation sur les versants des régions tempérées est essentiellement un processus actif à proximité de la surface, dans la zone soumise aux fluctuations climatiques. C'est pourquoi, il a été choisi d'étudier la relation entre la reptation et les conditions hydriques et thermiques.

La position adoptée est que les mécanismes peuvent être précisés en confrontant, à l'échelle stationnelle .

- les caractéristiques climatiques ainsi que leurs effets hydrique et thermique dans le sol,
- les caractéristiques du sol
- la déformation du profil, c'est à dire à la fois la répartition du mouvement selon la profondeur et son évolution dans le temps.

L'objectif fixé est la confrontation de ces différents éléments. Il suppose de pouvoir les mesurer de manière suffisamment précise pour espérer un résultat.

Dans ce but, un capteur à jauges d'extensométrie a été conçu, mis au point et testé avant d'en équiper un site sur un versant forestier des Vosges centrales cristallines.

L'équipement du site a été complété par une batterie de tensiomètres répartis à différentes profondeurs dans le sol, surtout dans les vingt-cinq premiers centimètres, pour mesurer les conditions hydriques et par des sondes de platine pour suivre l'évolution des températures dans l'air, dans la litière et dans le sol.

Les différentes mesures réalisées plus particulièrement de novembre 1984 à juillet 1985, à raison de deux fois par semaine en moyenne, nous permettent de préciser certains mécanismes.

La présentation de ce travail s'articule en trois parties :

La première fait une mise au point sur l'état des connaissances concernant la reptation :

- le chapitre 1 replace ce processus dans le contexte du fonctionnement des versants,
- le chapitre 2 recense les instruments théoriques et techniques disponibles pour son étude, leurs avantages et limites respectifs.

La seconde partie présente le capteur à jauges d'extensométrie qui a été mis au point :

- le chapitre 3 expose la conception du capteur, ainsi que la réalisation et la procédure de traitement des mesures,
- le chapitre 4 précise, à travers des tests et des simulations du fonctionnement du capteur, son domaine d'application propre,
- le chapitre 5 expose les vérifications réalisées sur des maquettes en bois et dans un modèle réduit de versant.

Enfin, la troisième partie présente les résultats obtenus in situ au cours de neuf mois de mesures (novembre 1984-juillet 1985) :

- le chapitre 6 décrit le site expérimental et cette période de mesures dans leur contexte spatial et climatique ainsi que l'équipement réalisé,
- le chapitre 7 analyse de manière détaillée les déplacements mesurés ; ceux-ci sont reliés à des types d'évènements climatiques ; une étude de l'histoire des conditions hydriques et thermiques du sol permet de proposer une explication pour la plupart des évolutions significatives des mesures observées.

PREMIERE PARTIE : APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA REPTATION.

INTRODUCTION

Cette première partie a pour objectif de préciser, à partir de l'analyse bibliographique, ce qu'est la reptation et quels sont les moyens dont on dispose pour l'étudier.

Le premier chapitre placera la reptation dans le contexte des processus de transferts de matière, qui contribuent au façonnement des versants et à leur fonctionnement. Le concept, souvent flou, de reptation sera ensuite abordé à partir des nombreuses définitions - faisant référence aux observations de terrain et à l'analyse des causes - que l'on trouve dans la bibliographie.

Le second chapitre fera le point sur les différentes approches qui ont été utilisées pour étudier la reptation, à travers les théories, modèles et méthodes de mesure disponibles.

Ceci permettra en conclusion de définir la démarche suivie pour ce travail.

CHAPITRE I : LA REPTATION, UN PROCESSUS ACTUEL DU FONCTIONNEMENT DES VERSANTS.

1.1 Fonctionnement et évolution des versants :

Un versant naturel peut être considéré comme un système ouvert, soumis à des flux de chaleur et de matière qui le traversent. Un certain nombre de transferts de matière en conditionne la forme et l'évolution.

L'altération de la roche et des formations superficielles, ainsi que les déplacements de matière ne sont pas uniformes dans le temps et dans l'espace ; ils sont contrôlés par la résistance des roches et du sol et les interactions avec les processus climatiques et biologiques.

Aussi, le souci de comprendre l'évolution des versants a-t-il amené à introduire la notion de bilan morphogénétique (TRICART, 1957) et à étudier les relations entre formes et processus.

JAHN (1954, 1963), le premier, définit un bilan de dénudation, valable pour des portions de versant. D'après lui, tous les processus de versant peuvent se ramener à deux composantes : l'une, parallèle à la pente, regroupe les processus de transfert, l'autre, normale au versant, les processus d'altération physiques ou chimiques responsables de l'augmentation de l'épaisseur des formations. Ces deux composantes sont dépendantes l'une de l'autre ; leur somme algébrique définit le bilan de dénudation. Il est ainsi possible de distinguer des bilans "positifs", "négatifs" et "d'équilibre", selon que l'épaisseur des formations superficielles tend respectivement à augmenter, à diminuer ou à rester constante.

TRICART, en utilisant les conceptions d'échelles temporo-spatiales (CAILLEUX et TRICART, 1956), introduit dans le bilan de dénudation les notions de seuils de déclenchement et de stabilisation ainsi que de fréquence de fonctionnement déjà présentées par STRAHLER (1956), ce qui lui permet de théoriser le fonctionnement global et le façonnement des versants dans le bilan morphogénétique.

Cependant, l'explication elle-même des formes des versants et de leur évolution nécessite de connaître les processus responsables du façonnement. L'étude des relations entre formes et processus s'est d'abord heurtée à la faiblesse du nombre d'observations et la quasi-absence de mesures. Ainsi, l'attribution de certaines formes typiques à certains processus a parfois été remise en cause : par exemple, l'attribution de la convexité des sommets à la reptation (GILBERT, 1909) est maintenant remise en cause (MOSLEY, 1973 ; YAIR, 1973).

En outre, la standardisation et la multiplication des observations et des mesures concernant chaque processus particulier, ainsi que l'étude de ses mécanismes, sont nécessaires pour réaliser des bilans d'érosion précis (DIETRICH et al., 1978, 1982 ; DUIJSINGS, 1985) et permettent de concevoir, vérifier et améliorer les modèles d'évolution des versants (SCHEIDEGGER, 1961 ; SOUCHEZ, 1963, 1964 ; YOUNG, 1963 ; AHNERT, 1967, 1970, 1976 ; ARMSTRONG, 1976 ; HIRANO, 1976 ; KIRKBY, 1976, 1977 ; MERCIER, 1976).

1.2 Les déplacements de matières solides :

Les processus de transferts de matières solides sur les versants sont multiples ; il en existe de nombreuses classifications (SHARPE, 1938 ; HUTCHINSON, 1968 ; VARNES, 1975 ; CARSON et KIRKBY, 1972), basées sur un ou plusieurs critères différents : vitesse, caractères physiques, humidité, type de matériel. L'objectif n'est pas de les présenter ici.

Un des critères commun est celui de la vitesse (fig. 1.1). Les auteurs s'entendent pour dire que la reptation est le plus lent des transferts de matières solides, du moins si on raisonne en vitesse moyenne.

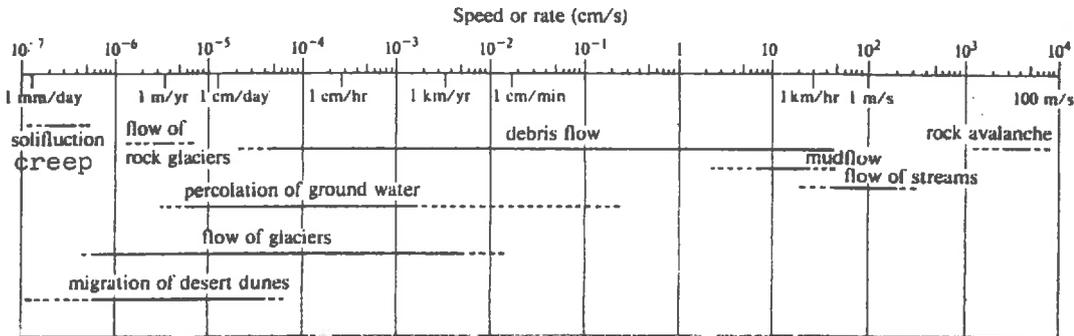


fig. 1.1 Classement de processus de transferts de matières solides par l'ordre de grandeur de leurs vitesses respectives. (in ANDERSON et BURT, 1981)

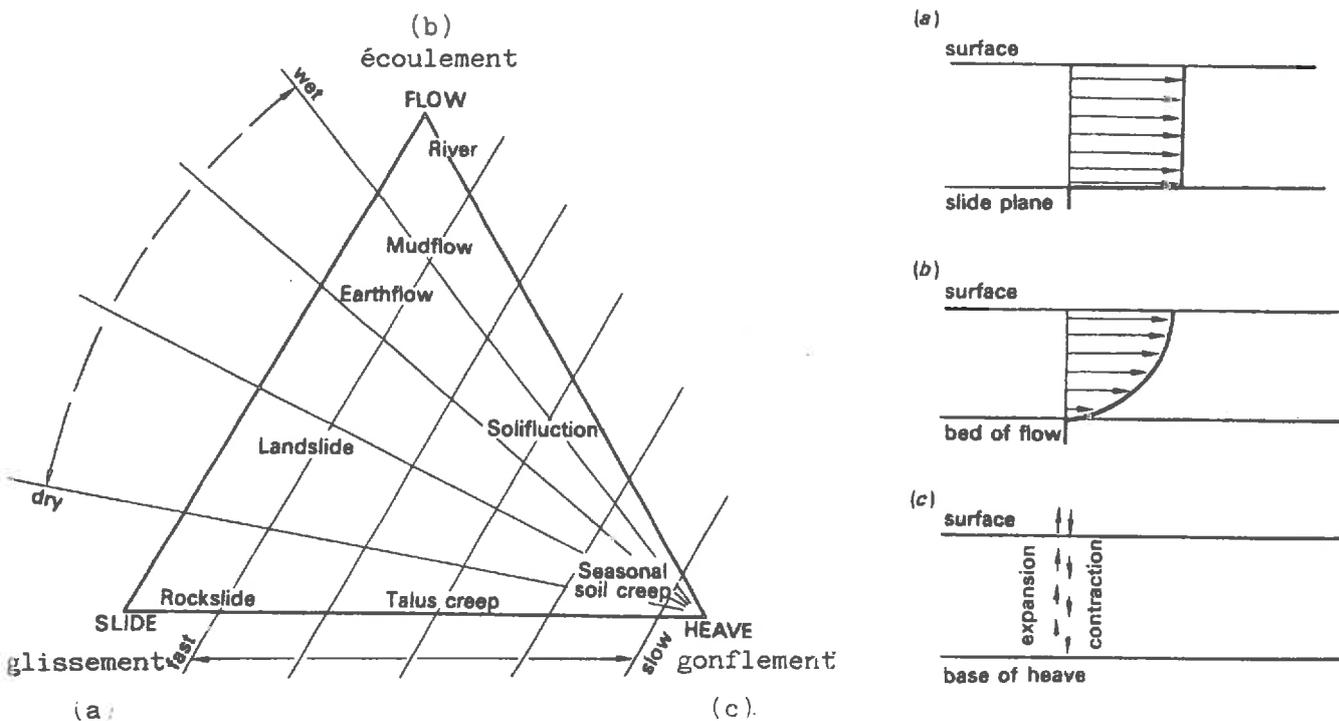


fig. 1.2 Classification triangulaire des mouvements de masse. (in CARSON et KIRKBY, 1972)

Pour situer la reptation dans le contexte des autres processus de transferts de matières, nous retiendrons la classification sous forme de diagramme triangulaire proposée par CARSON et KIRKBY (1972), qui tient compte du type et de la vitesse du déplacement ainsi que de l'humidité du sol. Cette classification n'introduit pas de limite tranchée entre les différents types de déplacements, notamment entre la solifluxion et la reptation, et prend en compte les phénomènes de gonflement/rétraction (fig. 1.2). La reptation dite saisonnière y apparaît comme le transfert le plus lent, le plus lié aux gonflements/rétractions et pouvant se produire dans toute la gamme d'humidité.

La distinction entre reptation et solifluxion n'est pas toujours évidente. Ainsi, AVENARD (1962) donne une définition très vaste de la solifluxion, élargissant et précisant celle d'ANDERSSON (1906), et inclut la reptation en masse à la solifluxion de surface. A l'opposé, WASHBURN (1967, 1979) et à sa suite de nombreux auteurs anglosaxons, restreignent la solifluxion aux régions froides et aux déplacements de rythme annuel, liés au dégel : dans leur acception, la solifluxion correspond à la gélifluxion (cryoreptation et géliturbation).

La distinction entre les mouvements en masse et les mouvements particuliers, et la place particulière de la reptation dans cette classification, sont le sujet de débats traditionnels. CARSON et KIRKBY (1972) précisent que cette séparation ne peut être réellement effectuée puisque ces deux types de mouvements se produisent en général conjointement. Les mouvements particuliers concernent souvent un grand nombre de particules et sont de ce fait assimilables à des mouvements en masse. Si, dans le cas de processus tels que la désagrégation des agrégats par les gouttes de pluie, le lessivage de surface et dans le sol et la reptation pour une certaine part, les particules sont relativement indépendantes les unes des autres, la différenciation mouvements en masse/mouvements particuliers est en général loin d'être évidente. Ce débat contient déjà les éléments des questions que pose une définition exhaustive de la reptation. Ceux-ci vont être abordés maintenant.

1.3 Les définitions de la reptation :

La reptation est généralement définie comme un mouvement lent, dirigé vers l'aval, des formations superficielles et du sol. Les observations de ce type de mouvement sont antérieures à 1890. YOUNG (1978) cite notamment celles de THOMSON (1877), KEEPING (1878), COPPINGER (1881), KEER (1881) et DAVISON (1889).

Les indicateurs évoqués le plus souvent sont l'incurvation des dépôts, la courbure des troncs d'arbres, le déplacement de structures telles que poteaux, murets, routes, blocs et les petites accumulations en amont de structures (fig. 1.3).

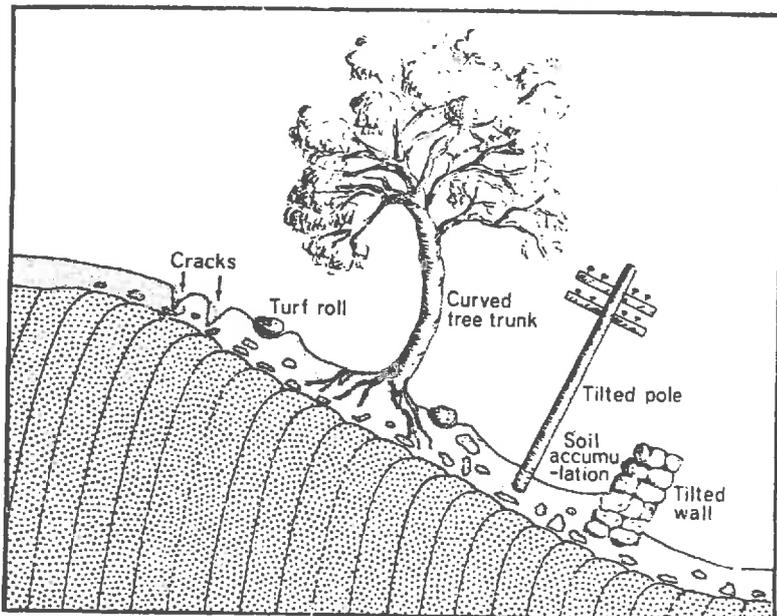


fig. 1.3 Indicateurs de reptation (in SELBY, 1982).

Mais il existe une controverse au sujet de ces indicateurs . PHIPPS (1974) objecte que la courbure des troncs devrait être répartie non seulement à proximité de la base mais sur la totalité du tronc et que le système racinaire devrait porter des traces du déplacement. En outre, certains arbres présentent le même genre de courbure en terrain plat. Le déplacement de structures comme les poteaux et les murets peut aussi être imputé à une augmentation de la charge due à leur installation. La conjonction de plusieurs de ces indicateurs semble néanmoins un argument suffisant et l'insertion d'objets dans le sol a permis de confirmer l'existence de ce type de mouvement.

La mise en évidence du déplacement ne suffit évidemment pas à le définir. Les auteurs utilisent en général deux types de critères pour caractériser la reptation :

- l'efficacité, c'est à dire la vitesse et l'épaisseur de sol concernée,
- les causes.

1.3.1 L'efficacité :

Les particules de sol se déplacent très lentement, à un rythme de l'ordre de quelques millimètres par an. La masse des résultats publiés augmente surtout depuis les années 70, mais les différences entre les méthodes de mesures suggèrent la plus grande prudence si on veut les confronter. D'une manière générale, on retrouve les mêmes ordres de grandeur à l'intérieur d'une même zone climatique : moins de 5 mm/an en région tempérée humide, moins de 10 mm/an pour les régions chaudes, beaucoup plus variable pour les régions froides, surtout si on ne différencie pas reptation et solifluxion. JAHN (1984) a établi, à partir d'une enquête, un tableau des ordres de grandeur des mouvements de masse lents suivant les zones climatiques (tab. 1.1).

Les vitesses données dans la bibliographie sont des vitesses moyennes, rarement établies sur des périodes suffisamment longues. A l'exception des résultats présentés par JAHN (1981) et YOUNG (1978) - tab.1.2 et 1.3 -, ces moyennes sont établies pour une durée rarement supérieure à deux ans et leur extrapolation sur une plus longue durée est assez contestable. Les résultats de JAHN montrent d'ailleurs clairement que la vitesse annuelle maximum observée est d'un ordre de grandeur très supérieur à la vitesse moyenne établie sur une dizaine d'années. Par comparaison aux autres transferts de matières solides, de type catastrophique, les déplacements par reptation ont été longtemps considérés comme relativement continus dans le temps, ce qui est en fait loin d'être le cas.

Les mouvements ne sont pas toujours exprimés sous forme d'une vitesse linéaire (L/T), en surface ou à un niveau ; on les trouve fréquemment exprimés dans les dimensions L^2/T et $L^3/L/T$, ce qui correspond à l'intégrale du profil des vitesses à différents niveaux, en prenant en compte ou non la dimension latérale.

zone	mm/an
périglaciale	42.5
alpine	17.4
tempérée	2.6
tropicale	7.0

tab. 1.1 Ordre de grandeur des mouvements de masse lents en fonction des zones climatiques (JAHN 1984).

lieu	nombre de profils	altitude (m)	pente	durée des observations	vitesse (mm/an)	
					max	moyenne
KARKO-NOSZE	6	1200	8-39°	10 ans	21	4
KARKO-NOSZE	4	1200	8-38°	17 ans	20	15
SNIEZNIK	4	1400	13-24°	6 ans	12	5
KLETNO	5	630	15-24°	5 ans	14	10

tab. 1.2 Vitesse de la reptation dans les Monts Sudètes polonais (JAHN 1981)

	litière	profondeur 0 à 20cm	profondeur 20 à 60cm
vitesse moyenne (mm/an)	0.8	0.4	0.1

tab. 1.3 Vitesse moyenne de la reptation établie sur la période 1963-1975 dans les Pennines du Sud (Derbyshire) Northern England) à 350m d'altitude et sur une pente de 25° (d'après YOUNG 1978)

Si certains auteurs observent des déplacements lents jusqu'à plusieurs mètres de profondeur (KOJAN, 1968 ; YEN, 1969), en évoquant le rôle essentiel joué par la gravité et la présence d'argile, le déplacement concerne en général plutôt les vingt à cinquante premiers centimètres et décroît rapidement de la surface vers la profondeur. TRICART (1963) écrit que "la reptation est un mouvement différentiel, celui de la couche superficielle, sur quelques décimètres, étant plus rapide que celui des couches profondes".

Il existe donc un profil de vitesse dont différents types de forme ont été mis en évidence : exponentielle décroissante vers la profondeur, concavo-convexe... Il ne s'agit jamais de formes rectilignes sur la totalité du profil.

1.3.2 Les causes :

Toujours ajoutées aux définitions de la reptation, celles qui sont classiquement évoquées sont :

- la gravité qui agit en un point du versant par l'intermédiaire du poids des formations susjacentes et de la pente. Le poids peut en effet être décomposé en une composante normale à la surface du versant qui tend à plaquer le matériel sur le versant et une composante tangentielle qui tend à le déplacer vers l'aval.
- les variations de température qui agissent par l'expansion et la contraction thermique des matériaux (SCHEIDEGGER, 1961). Leur rôle serait relativement mineur (YOUNG, 1978), sauf dans les régions désertiques.
- les variations d'humidité qui agissent en changeant les propriétés mécaniques et en provoquant des variations de volume. Les changements de teneur en eau transforment le milieu triphasique qu'est le sol et influent ainsi sur son comportement. En outre, la comparaison entre coefficients de retrait et changements saisonniers d'humidité a permis d'établir que pour des climats tempérés, le gonflement des sols autres que les sables peut excéder 5% (YOUNG, 1978). Ces variations hydriques sont tenues pour les principales responsables de la reptation de surface des régions tempérées et chaudes.

- les changements d'état de l'eau dans le sol (gel-dégel) agissent eux aussi en provoquant des changements de volume. L'eau, en gelant, augmente son volume de 9% : un sol ayant une teneur en eau volumique de 50% augmenterait ainsi son volume, en gelant, de 4.5% (YOUNG, 1978). Mais ces changements de volume peuvent être supérieurs du fait des très fortes suctions qu'induit la formation des lentilles de glace (MILLER, 1980 ; BURT, 1981).

Ces trois derniers types de causes provoquent des "expansions" en général perpendiculaires à la pente et des "contractions" de direction intermédiaire entre la perpendiculaire et la verticale (YOUNG, 1960 ; KIRKBY, 1967). Ces causes sont extrêmement liées entre elles du fait des interactions entre température et humidité, température et pression d'eau des pores (HAMBURGER, 1973), température et état de l'eau dans le sol, humidité et volume d'eau susceptible de geler, puis de fondre.

- les animaux fouisseurs (taupes, lombrics ...), les insectes (termites) agissent directement en transportant le matériel et en créant des cavités.

- la croissance puis le pourrissement des racines transforment les contraintes sur les particules qui les entourent et le volume des vides.

Toutes ces causes ont déjà été citées par DAVIS et SNYDER (1898) et par GILBERT (1909). Elles agissent le plus souvent simultanément avec plus ou moins d'efficacité. Leur analyse a mené les auteurs à la définition de toute une série de processus de reptation, d'où les nombreux termes que l'on trouve dans la bibliographie et qui sont recensés dans le tableau 1.4. Cette multiplicité des définitions, dont les seuls critères communs sont la gravité - mais celle-ci intervient dans tous les déplacements - et la lenteur, montre bien que la reptation est en réalité le "fourre-tout" des processus lents de transferts de matières solides sur les versants.

BIROT (1970) en arrivait à distinguer "creep" et "reptation" en opposant mouvements particuliers et mouvements en masse, tout en notant que cette opposition restait étymologiquement critiquable.. Le terme "creep" est d'ailleurs employé en Mécanique des Sols pour désigner des déplacements viscoélastiques.

terme employé	références	gravité (poids+pente)	variations de température	variations d'humidité	gel-dégel	animaux fouisseurs	racines	description
reptation profonde <i>deep creep</i> reptation continue <i>continuous creep</i>	TERZAGHI 1950 KOJAN 1968 YEN 1969 STATHAM 1977, 1981 et la plupart des synthèses	X						peut affecter des épaisseurs de plusieurs mètres dans les sols argileux ; déplacements de type visqueux ; peut précéder ou suivre des ruptures par cisaillement.
reptation saisonnière <i>seasonal creep</i>	la plupart des auteurs	X	X	X	X	+	+	non spécifique d'un sol particulier mais affecte plutôt ceux à texture fine ; efficace sur l'épaisseur de sol affectée par les changements climatiques liés aux expansions-rétractions
reptation visqueuse	AVENARD 1962	X	+	X	+			phénomène de surface, déplacement à l'état liquide
reptation plastique reptation pâteuse	SOUCHEZ 1963 AVENARD 1962	X		X				phénomène de surface, déplacement à l'état plastique ou viscoplastique
reptation hydrique reptation thermique	SOUCHEZ 1963	X	X	X				
cryoreptation <i>frost creep</i>	WASHBURN 1969 VAN VLIET 1985 a,b + nombreux auteurs	X	+	+	X			soulèvement des particules ou agrégats par la formation des lentilles de glace, chute avec déplacement vers l'aval à la fonte
reptation de blocs rocheux <i>rock creep</i> ou <i>surficial rock creep</i>	SMITH 1960 SCHUMM 1967 YOUNG 1978 DE PLOEY et YAIR 1979	X	X					déplacements de fragments ou de blocs rocheux attribués à leurs dilatation et rétraction différentes de celles du sol sur ou dans lequel ils se trouvent
reptation d'éboulis <i>talus creep</i> ou <i>talus shift</i>	GARDNER 1969 CAINE 1963 YOUNG 1978	X	X	+	X			déplacements d'une masse de débris rocheux sans matrice fine attribués au développement de coins de glace, aux glissements sur des surfaces mouillées, à l'impact de blocs rocheux et aux expansions contractions
reptation de rigole <i>runoff creep</i>	DE PLOEY et al. 1976	+		X				déplacements des galets dans les rigoles
reptation boueuse <i>mud creep</i>	BRUNNER et al. 1975	X		X				formation et évolution de bourrelets dans des rigoles ravines, etc...
reptation aléatoire <i>random creep</i>	la plupart des auteurs	X	+	+	+	X	X	mouvements de direction aléatoire dont la résultante, sur un versant, est dirigée vers l'aval

X : causes explicites + : causes implicites

tab. 1.4 Différents processus de reptation : définitions complémentaires.

Ce que l'on peut retenir, en premier lieu, de l'analyse de ces définitions est la distinction, au niveau des mécanismes en jeu, entre reptation profonde et reptation proche de la surface.

La reptation profonde a un caractère permanent ("continuous creep" de TERZAGHI, 1950). La contrainte est liée au poids des matériaux et à la pente. La déformation du sol est fonction de la contrainte et surtout du temps. Elle affecte les sols argileux.

La reptation proche de la surface est liée aux changements de volume et/ou aux mouvements des particules d'origine biogénique. La résultante des mouvements en masse ou particulières est dirigée vers l'aval à cause de la pente. Cette reptation recouvre tous les transferts liés aux variations climatiques - température, humidité, état de l'eau - (et elles sont loin d'être uniquement saisonnières), à l'activité de la faune du sol ainsi qu'à la croissance et au pourrissement des racines qui ont une distribution et des directions plus aléatoires.

Le terme "reptation" étant employé sans distinction pour un ensemble de processus dont le principal point commun est la lenteur du déplacement, l'usage de qualificatifs faisant référence aux mécanismes permet de mieux caractériser ces processus différents.

Les mouvements des particules à l'intérieur du profil de sol sont nettement conditionnés par les particules adjacentes, leur taille, leur arrangement. De ce point de vue, dire si la reptation est plutôt un mouvement en masse ou un mouvement particulière pose un réel problème : à moins de se situer à l'échelle de la particule elle-même, il semble néanmoins raisonnable de parler de mouvement solidaire des particules entre elles.

La multiplicité des définitions reflète aussi la difficulté qu'il y a à mesurer ces déplacements.

CHAPITRE II : INSTRUMENTS THEORIQUES ET TECHNIQUES POUR L'ETUDE DES DEPLACEMENTS PAR REPTATION.

Ces instruments sont :

- la mécanique des sols qui étudie leur comportement rhéologique, c'est à dire les liens entre l'histoire des contraintes qu'ils subissent et celle des déformations qu'elles y induisent,
- les modèles théoriques de reptation,
- les différentes techniques de mesure.

2.1 Mécanique des sols et comportement rhéologique :

2.1.1 Les lois physiques :

Tout petit volume de sol est soumis à son propre poids et à celui des formations sus-jacentes. Sur un versant, la contrainte, liée à cette force, peut être décomposée en contrainte normale à la pente, tendant à plaquer le matériel sur le versant, et contrainte tangentielle, tendant à le déplacer vers l'aval (cf. §1.3, la gravité). La contrainte tangentielle peut ainsi être assimilée à ce que l'on appelle, en résistance des matériaux, une contrainte de cisaillement.

Le sol et les formations superficielles, soumis à de telles contraintes, vont développer des résistances qui vont dépendre non seulement de leurs caractéristiques physiques (minéralogie, texture, structure, porosité, perméabilité, ...), mais aussi des interrelations existant entre celles-ci (fig. 2.1) et de la composition triphasique du sol (humidité, pression de l'eau dans les pores, température).

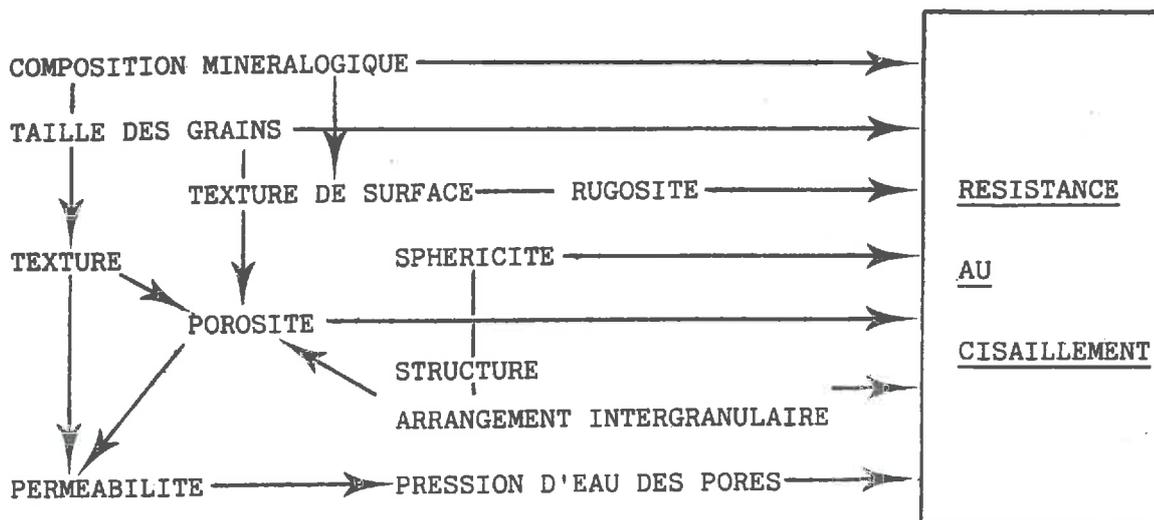


fig. 2.1 Relations entre caractéristiques physiques du sol et résistance au cisaillement (adapté de STATHAM, 1977).

La relation de Coulomb décrit de manière simple, pour les massifs en terre, la relation entre contrainte normale et contrainte tangentielle au moment de la rupture, en fonction de deux paramètres : la cohésion c et l'angle de frottement interne ϕ (fig. 2.2).

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (2.1)$$

La cohésion est un seuil en dessous duquel il n'y a pas de rupture. Elle dépend des liaisons ioniques et moléculaires (cohésion vraie) ainsi que des forces d'attraction liées aux tensions capillaires (cohésion apparente). L'angle de frottement interne est un angle limite qui définit une pente d'équilibre si la cohésion est nulle (analogie avec la pente d'un tas de sable qu'on aurait laissé tomber d'une faible hauteur). Il dépend de l'arrangement intergranulaire, les contraintes se transmettant dans le sol au travers des grains et de l'eau interstitielle.

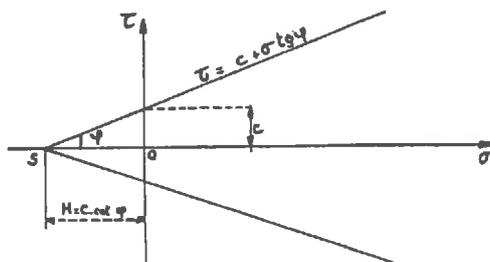


fig. 2.2 La loi de COULOMB (in COSTET et SANGLERAT, 1981).

Mais les différentes phases (solide, liquide, gazeuse) du sol ne sont pas régies par les mêmes lois physiques, et le comportement du sol dépend en réalité de contraintes effectives. Ces constatations ont amené à modifier la relation de COULOMB pour tenir compte du comportement des fluides :

$$\tau = c + \sigma' \operatorname{tg} \phi \quad (2.2)$$

avec d'après TERZAGHI (1950)

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.3)$$

où u est la pression du fluide, air ou eau.

D'après BISHOP (1963), cette relation peut être utilisée pour les milieux partiellement saturés en écrivant :

$$u = u_a - X (u_a - u_w) \quad (2.4)$$

où u_a et u_w sont les pressions respectives de l'air et de l'eau et X un coefficient empirique qui dépend surtout du degré de saturation (0 pour les sols secs, 1 pour les sols saturés).

Cependant, la teneur en eau influe aussi sur les paramètres c et ϕ , puisque :

- la cohésion est influencée par l'augmentation et la diminution des tensions capillaires,
- l'angle de frottement interne a tendance à diminuer quand la teneur en eau augmente.

La relation de COULOMB devient par conséquent :

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (2.5)$$

dans laquelle les ' font référence à l'eau :

$$c' = c(\theta) \quad (2.6)$$

$$\phi' = \phi(\theta) \quad (2.7)$$

avec θ la teneur en eau.

Cohésion et frottement interne permettent donc de décrire synthétiquement la résistance au cisaillement d'un sol. Ainsi, par exemple, un sable a une cohésion quasiment nulle ou très faible, et l'angle de frottement interne γ dépend essentiellement de la compacité et accessoirement de la forme des grains, de leur taille et de la granulométrie. Par contre, une argile a un comportement plus complexe - lié à la faible perméabilité, aux tensions capillaires, aux forces d'adsorption - et fortement influencé par la structure du matériau, la présence de microfissures, l'anisotropie de constitution, l'état de consolidation, l'hétérogénéité des formations (COSTET et SANGLERAT, 1981).

La mécanique des sols cherche en outre à analyser le comportement rhéologique des sols par analogie avec des milieux continus. Pour ces milieux, trois types de comportement idéalisés peuvent être définis (fig. 2.3) :

- élastique (celui d'un ressort) : la déformation est linéaire et réversible jusqu'à un certain seuil ;
- plastique rigide (celui d'un solide soumis à un cisaillement) : la déformation est nulle en dessous d'un certain seuil, irréversible au delà ;
- visqueux (celui d'un liquide incompressible) : le milieu se déforme, sans se rompre, dès qu'une contrainte est appliquée.

Ces trois types de comportement peuvent se combiner.

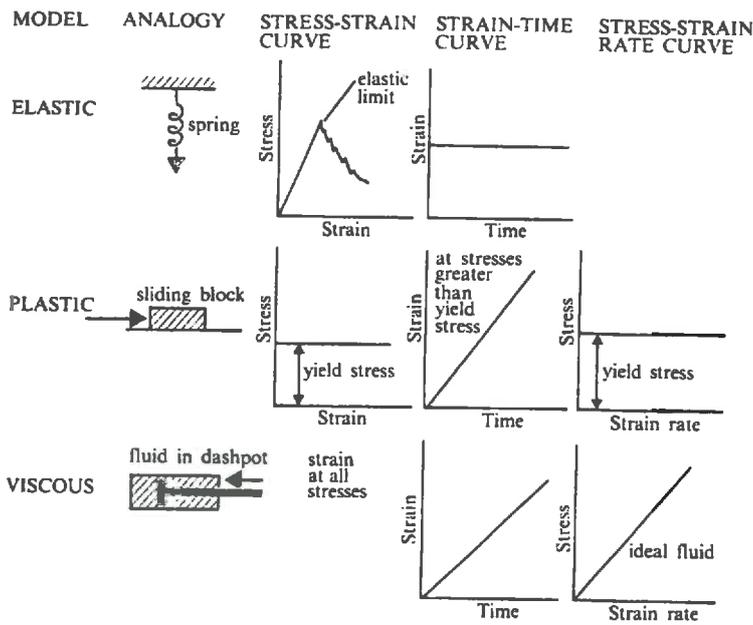
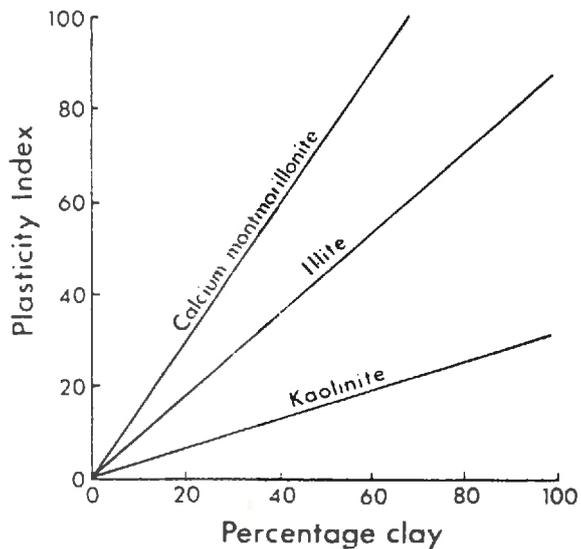
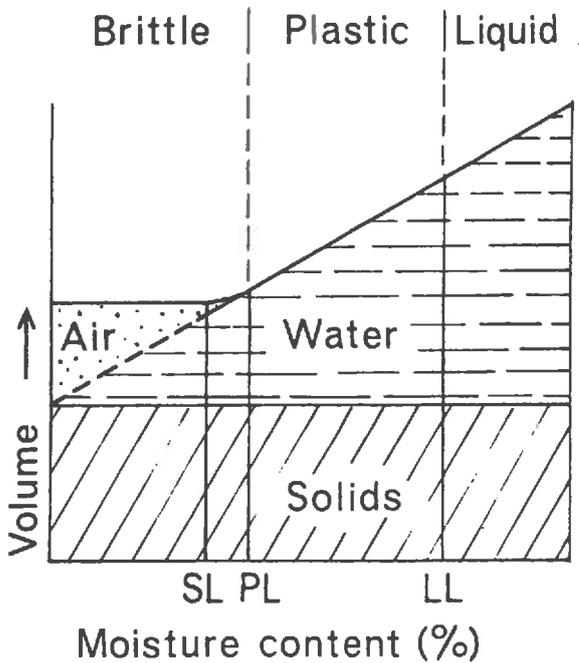


fig. 2.3 Trois types de comportements idéalisés des milieux continus soumis à une contrainte (in STATHAM, 1977).

2.1.2 La détermination empirique du comportement des sols :

Les limites d'ATTERBERG constituent une approche ancienne, valable uniquement pour les sols à texture fine. Ces limites distinguent des états de comportement en fonction de l'humidité (fig. 2.4). Elles sont très influencées par la minéralogie, notamment celle des argiles qui sont responsables de la plasticité (fig. 2.5). Ces limites sont utilisées de manière très courante parce qu'elles permettent des comparaisons empiriques, mais elles ne sont pas basées sur des lois physiques. En outre, elles ne sont établies qu'à partir d'échantillons remaniés.

Leur interprétation pose des problèmes dès que la teneur en matière organique ne peut être négligée ; la matière organique augmente en effet, de la même manière que les argiles, la capacité d'échange cationique, et sa relation avec l'eau est des plus complexes.



limites :

SL : retrait, PL : plasticité,
LL : liquidité.

fig. 2.4 Limites d'ATTERBERG

$$\text{indice de plasticité} = LL - LP$$

fig. 2.5 Relation entre indice de plasticité et % de particules argileuses pour trois types d'argile (in SELBY, 1982).

Les relations entre contraintes et déformations peuvent être établies expérimentalement pour un sol :

- sur des échantillons, remaniés ou non, dans une boîte de cisaillement (boîte de Casagrande) ou un appareil triaxial ;
- sur le terrain, à l'aide d'un pénétromètre ou d'un scissomètre.

STATHAM (1977), en comparant les résultats obtenus pour un sable dans la boîte de cisaillement et pour une argile dans un appareil triaxial, montre que le sable a un comportement élastique et en partie plastique, alors que l'argile a un comportement viscoélastique. DONOGHUE (1985), comparant les résultats obtenus pour des échantillons remaniés et non remaniés, indique l'importance de la structure, mais aussi des petites racines.

La mécanique des sols constitue ainsi un outil privilégié pour l'étude des formations superficielles, des sols et de leur susceptibilité aux déplacements, en particulier sur les versants. Ce type d'approche globale est en outre probablement le seul qui permette d'envisager la prévision du comportement des sols et des formations, aussi bien dans l'espace que dans le temps.

Cet outil présente encore un intérêt limité pour l'étude de la reptation en raison de la nature du matériau "sol" à proximité de la surface : celui-ci est en effet particulièrement discontinu, hétérogène et anisotrope. D'autre part, le rôle de la matière organique, qui peut y être abondante et de forme variée a été méconnu ; il est pourtant essentiel dans certains milieux.

2.2 Les modèles théoriques de reptation :

Plusieurs modèles, basés sur des lois physiques, ont été proposés. Il en sera présenté trois types qui font référence à des mécanismes différents et assimilent la reptation :

- à un mouvement en masse de nature visqueux (YEN, 1969),
- à un mouvement lié aux gonflements-rétractions des particules et agrégats de sol et dont la résultante sur un versant est un déplacement en masse des horizons superficiels (KIRKBY, 1967),
- aux mouvements aléatoires des particules, du même type que la diffusion moléculaire des gaz (CULLING, 1963, 1965, 1983 a, b, c).

2.2.1 Reptation visqueuse (YEN, 1969) :

La reptation est assimilée à un déplacement de type visqueux et le sol à un milieu continu, isotrope et incompressible. Le profil de déplacement est de forme parabolique. A une profondeur donnée, le déplacement est proportionnel au coefficient de viscosité ; la vitesse décroît avec la tangente de l'angle de frottement interne résiduel (celui qui est déterminé lorsque la compacité de l'échantillon de sol ne varie plus) et croît avec le sinus de l'angle de pente.

Ce type de modèle ne concerne que la partie profonde des sols pour lesquels les hypothèses de continuité, d'isotropie et d'incompressibilité peuvent être acceptables. Il ne peut convenir que pour la reptation profonde - ou "creep", au sens des mécaniciens du sol.

2.2.2 Gonflements-rétractions (KIRKBY, 1967) :

Le profil de vitesse des déplacements, concavo-convexe (fig. 2.6), de type exponentiel, décroissante avec la profondeur, dont les paramètres sont le coefficient d'expansion linéaire du sol, la variation de l'humidité, la pente, le poids des formations sus-jacentes et deux paramètres caractéristiques du sol. Les forces d'expansion et de contraction, ainsi que la contrainte de cisaillement due au poids des formations sus-jacentes sont prises en compte. Le sol est considéré comme un milieu continu.

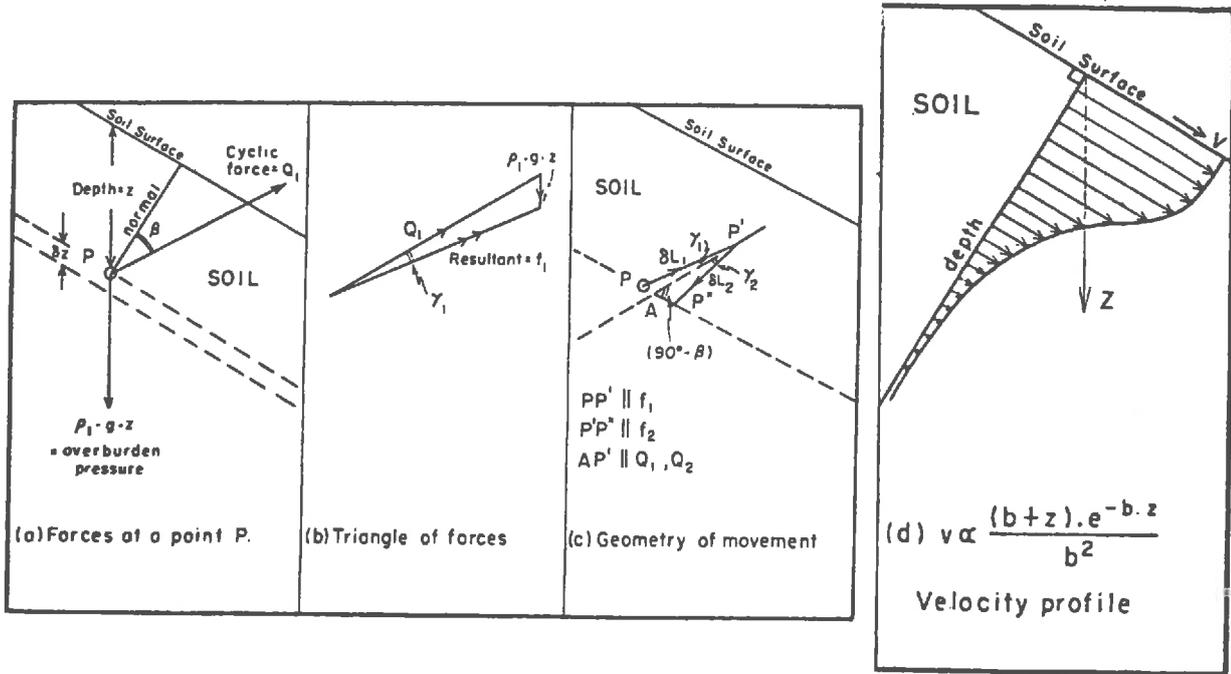


fig. 2.6 Modèle de reptation de KIRKBY et profil théorique de vitesse (in KIRKBY, 1967).

Ce modèle permet une approximation moyenne du déplacement, et de nombreuses variables apparaissent comme des paramètres pseudo-constants. Sa vérification sur un monolithe de sol est jugée satisfaisante par KIRKBY qui signale néanmoins qu'elle a été limitée par des effets de parois.

La variation cumulée de l'humidité prise en compte par le modèle est une reconstitution très grossière de l'histoire de l'humidité et ne semble pas pouvoir suffire à représenter correctement le rôle de l'eau. Néanmoins, l'allure du profil de vitesse obtenu correspond bien à celle mesurée par plusieurs auteurs.

D'autres modèles partiels ont été présentés pour des déplacements dus aux expansions-contractions :

- SCHEIDEGGER (1961), pour les déplacements d'origine thermique, en expose deux ; l'un fait intervenir la pente, l'épaisseur de sol affectée, la période du cycle, les températures minimale et maximale en surface au cours du cycle et des constantes dépendant des propriétés thermiques du sol. L'auteur note lui-même que les déplacements obtenus sont supérieurs à ceux observés. L'autre fait intervenir en outre l'angle de frottement interne, mais le déplacement ne s'annule pas avec la pente.

- WILLIAMS (1957 a), pour des déplacements liés au gel-dégel, fait intervenir la hauteur de soulèvement, liée à la quantité d'eau gelée, et la pente.

Ces modèles partiels ne sont a priori utilisables que lorsque les conditions expérimentales peuvent être contrôlées.

2.2.3 Diffusion des particules (CULLING, 1963, 1965, 1983 a, b, c) :

Le modèle de CULLING repose sur l'idée que les particules subissent des contraintes de directions aléatoires et qu'on peut faire une analogie entre leurs mouvements et la diffusion moléculaire des gaz. Le mouvement des particules est freiné ou arrêté par les particules voisines et dépend donc de la taille des particules, de la porosité du milieu et de l'énergie nécessaire à une particule pour franchir les autres. A proximité d'un obstacle, la densité augmente car celui-ci joue le rôle de barrière.

Ce modèle est le seul qui, d'une façon ou d'une autre, n'assimile pas le sol à un milieu continu. Mais il se heurte à des problèmes d'application : les méthodes de mesure actuelles ne permettent pas de le tester parce qu'elles ne tiennent pas compte de l'assemblage des particules. Le prélèvement d'échantillons à proximité de poteaux téléphoniques et le traitement de lames minces à l'analyseur d'images semblent confirmer l'existence d'une configuration particulière correspondant à celle prévue par le modèle de CULLING (FLAVELL, 1985).

A priori, ces trois types de modèles sont susceptibles de refléter la réalité du déplacement par reptation, au moins de manière partielle. Mais leur test au laboratoire et sur le terrain n'est pas encore satisfaisant, en partie du fait des problèmes de mesure.

2.3 Techniques de mesure de la reptation :

Les mesures, en géomorphologie, peuvent s'inscrire dans deux types de démarche : l'une visant simplement à connaître l'intensité d'un processus, l'autre cherchant aussi à en comprendre les mécanismes afin de vérifier ou de préciser les hypothèses faites à partir d'observations de terrain ou une représentation théorique de ce processus. En ce qui concerne la reptation, ces deux démarches se sont succédées : le but des mesures a d'abord été de reconnaître le processus, de le situer par rapport aux autres types de transferts de matières solides sur les versants ; l'objectif actuel est davantage de le formaliser, en essayant d'identifier quelles sont les caractéristiques et les relations qui permettent de le décrire et de prévoir ses effets.

La mesure de la reptation se heurte à deux problèmes liés à la nature même du processus :

- sa répartition spatiale, qui n'est homogène ni sur un versant, ni sur l'épaisseur du profil ; il faudrait, pour bien l'appréhender, un grand nombre de mesures dans les trois dimensions de l'espace.
- Sa lenteur, c'est à dire à la fois sa faible amplitude et sa répartition dans le temps, qui requiert des méthodes et des instruments précis, permettant des mesures fréquentes, pour éviter de se limiter à des vitesses moyennes.

Les instruments et techniques de mesure utilisés sont loin de répondre à toutes ces exigences. Ils essaient de tenir compte partiellement des unes ou des autres. Un recensement aussi complet que possible va en être fait, en essayant de présenter leurs intérêts et leurs limites respectifs, c'est à dire ce qu'ils permettent de mesurer, comment et -si possible- avec quelle précision. Ils seront regroupés en deux grandes catégories :

- ceux qui ont pour but de mesurer le mouvement à une seule profondeur ou globalement sur une certaine épaisseur de sol,
- ceux qui cherchent à rendre compte de l'allure du profil de déplacement.

	SUIVI A INTERVALLES DE TEMPS DE PLUSIEURS MOIS	SUIVI POSSIBLE A N'IMPORTE QUEL PAS DE TEMPS
NE RENDENT PAS COMPTE DU PROFIL	évolution de marques en surface	inclinaison d'objets rigides
	<p>PIERRES OU BLOCS</p> <ul style="list-style-type: none"> -numérotés (SMITH, 1960) -peints (MICHAUD, 1950 ; RUDBERG, 1962 ; RAPP, 1962 ; CAINE, 1963) -contenant une carotte d'aluminium (BLACK, 1969) <p>PIQUETS INSERES PERPENDICULAIREMENT OU VERTICALEMENT (SCHUMM, 1956, 1964 ; SMITH, 1960 , RAPP, 1962)</p>	<p>TUBES D'ANDERSON (ANDERSON et FINLAYSON, 1975)</p> <p>APPAREILLAGE DE MORAND (MORAND, 1978 ; KAISER, 1980)</p> <p>T-PEGS DE KIRKBY (KIRKBY, 1967)</p> <p>INCLINOMETRE D'ANDERSON (ANDERSON et FINLAYSON, 1975)</p>
RENDENT COMPTE DE L'ALLURE DU PROFIL	enfouissement et excavation d'objets déformables	suivi de la déformation ou du déplacement d'objets dans le sol
	<p>COLONNES DE SABLE (HADLEY, 1967)</p> <p>SOL COLORE</p> <p>CYLINDRES DE PARAFFINE (BARR et SWANSTON, 1970)</p> <p>TUBES FLEXIBLE EN PLASTIQUE (dits tubes de Cassidy , RUDBERG, 1962)</p> <p>TESTS PILLARS (JAHN et CIELINSKA, 1974 ; JAHN, 1981)</p> <p>YOUNG'S PIT (YOUNG, 1960)</p>	<p>SYSTEME DE RASHIDIAN (RASHIDIAN, 1985)</p> <p>CONES DE SELBY (SELBY, 1968)</p> <p>DETECTEUR DEMOUEMENT DE TROEH (TROEH, 1975)</p> <p>APPAREIL DE FINLAYSON (FINLAYSON et OSMASTON, 1977)</p> <p>INCLINOMETRES (PEIGNAUD, 1970)</p> <p>CYLINDRES A ACIDE FLUORIQUE OU PARAFFINE LIQUEFIEE (ANDERSON et FINLAYSON, 1975)</p> <p>CAPTEURS A JAUGES D'EXTENSOMETRIE (WILLIAMS, 1957 ; ELLIS, 1973 ; SUDGEN, 1973; MERCIER et GEISSERT 1982 ; AUZET et al., 1985)</p>

tab. 2.1 Inventaire des instruments utilisés pour la mesure de la reptation.

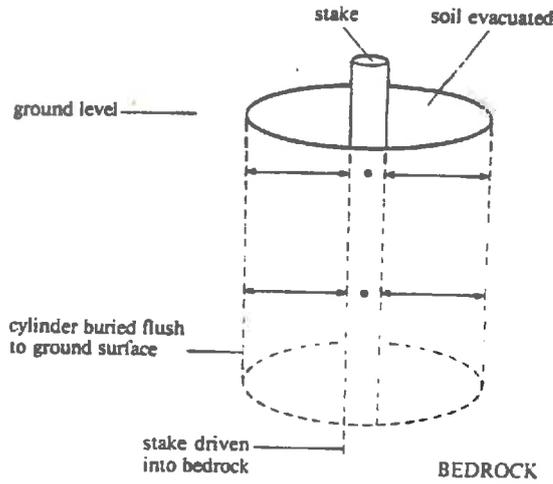
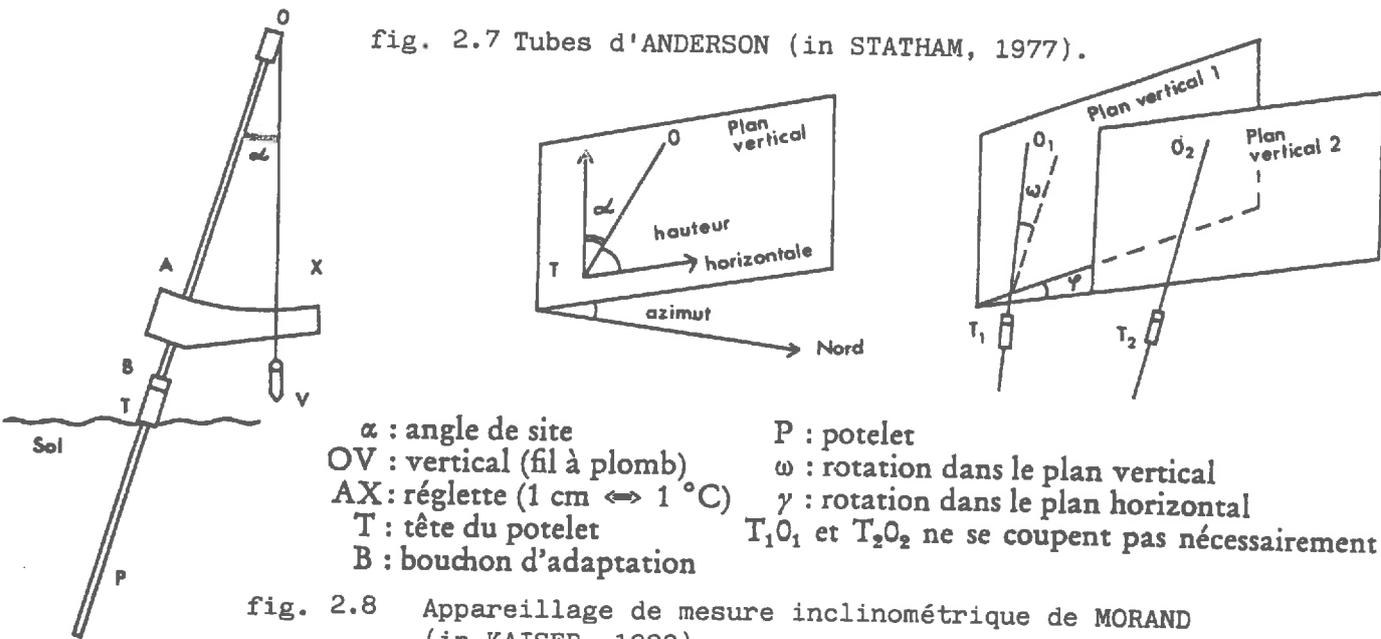


fig. 2.7 Tubes d'ANDERSON (in STATHAM, 1977).



- α : angle de site
- OV : vertical (fil à plomb)
- AX : réglète (1 cm \leftrightarrow 1 °C)
- T : tête du potelet
- B : bouchon d'adaptation
- P : potelet
- ω : rotation dans le plan vertical
- γ : rotation dans le plan horizontal
- T_1O_1 et T_2O_2 ne se coupent pas nécessairement

fig. 2.8 Appareillage de mesure inclinométrique de MORAND (in KAISER, 1980).

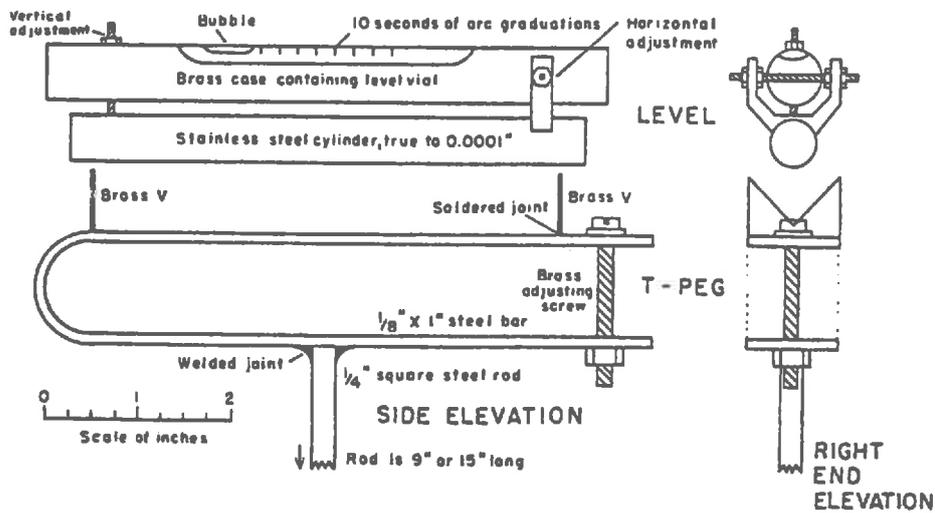


fig. 2.9 T-pegs de KIRKBY (in KIRKBY, 1967).

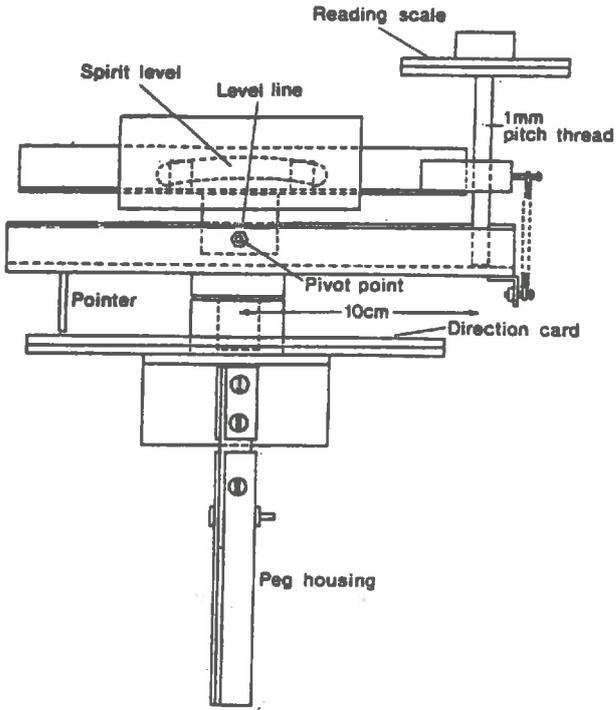


fig. 2.10 Inclinomètre d'ANDERSON.
(in ANDERSON et FINLAYSON, 1975)

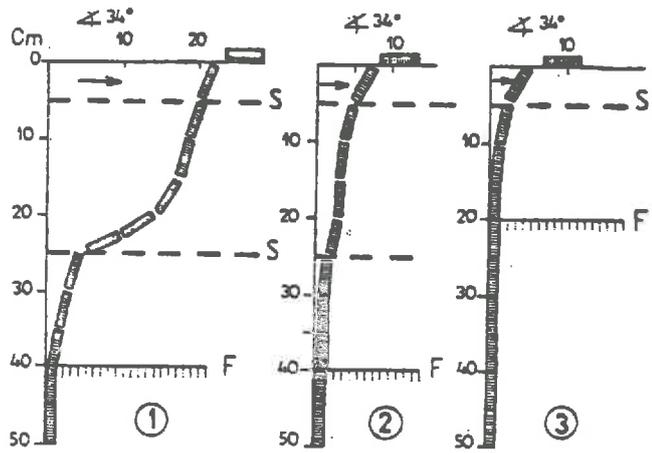


fig. 2.11 Test pillars.
(in JAHN et CIELINSKA, 1974)

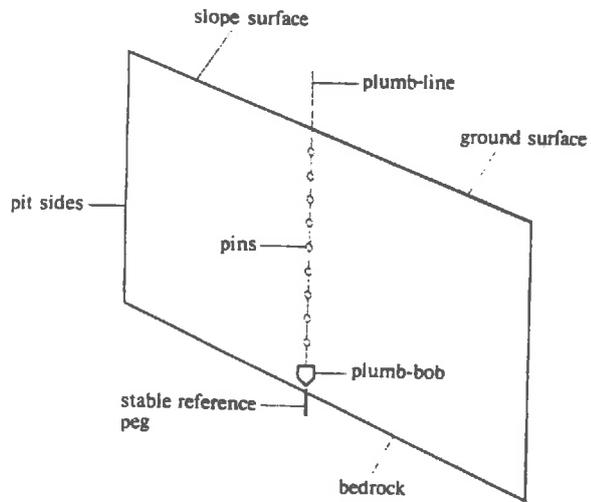


fig. 2.12 Young's pit.
(in STATHAM, 1981)

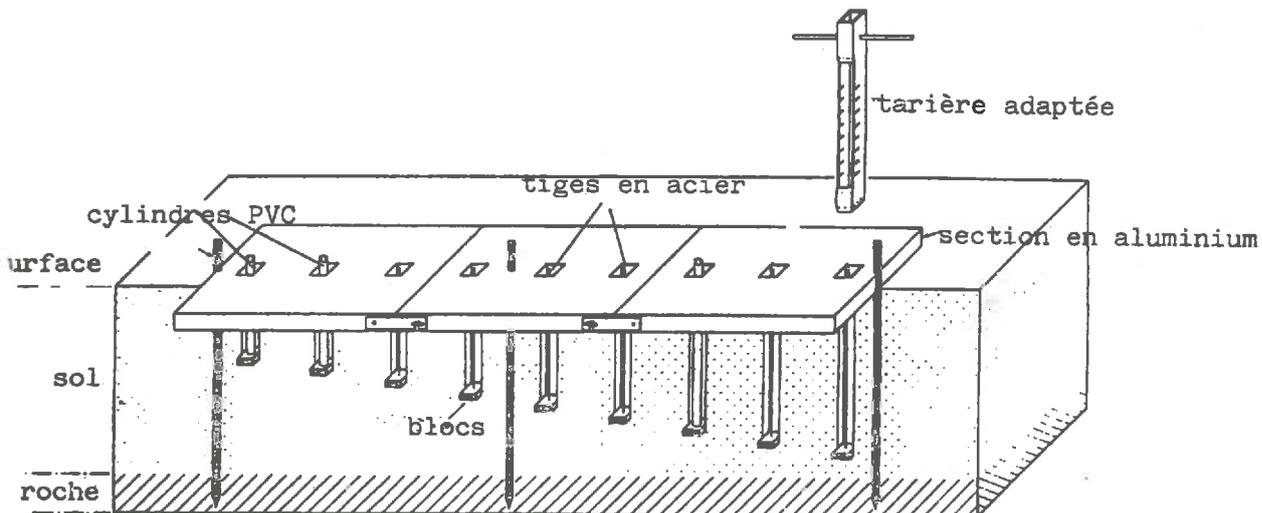


fig. 2.13 Système de RASHIDIAN (in RASHIDIAN, 1985).

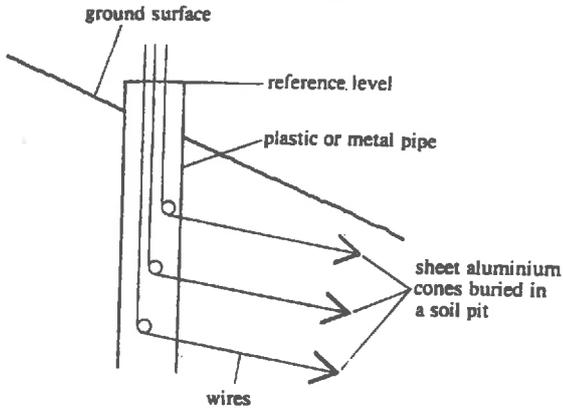


fig. 2.14 Cônes de SELBY
(in STATHAM, 1981)

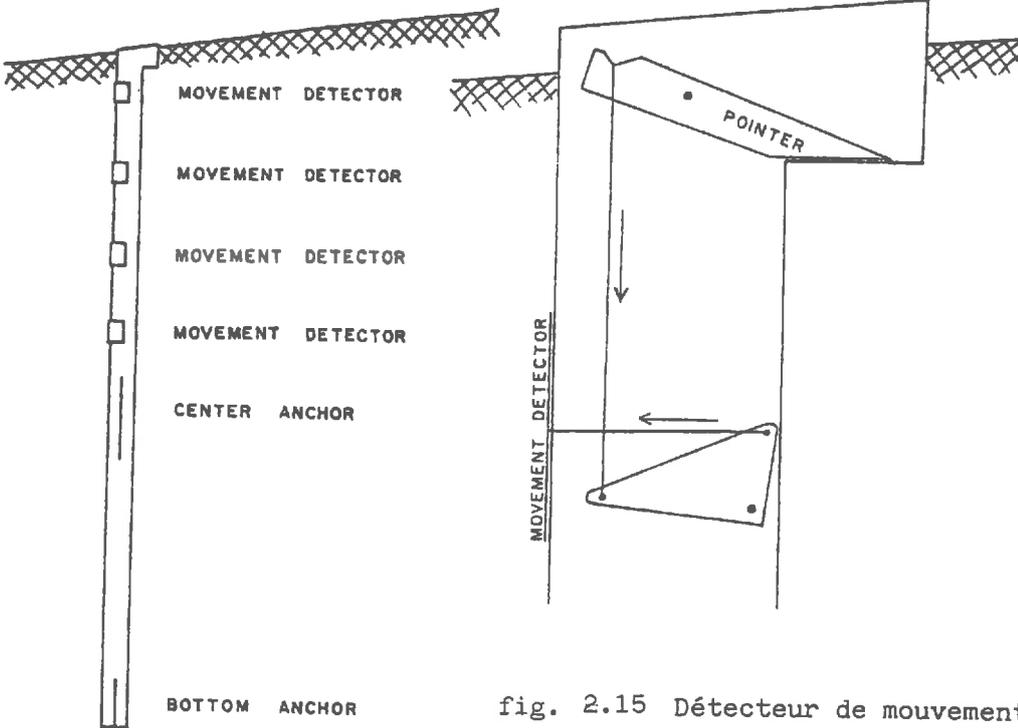


fig. 2.15 Détecteur de mouvement de TROEH
(in TROEH, 1975).

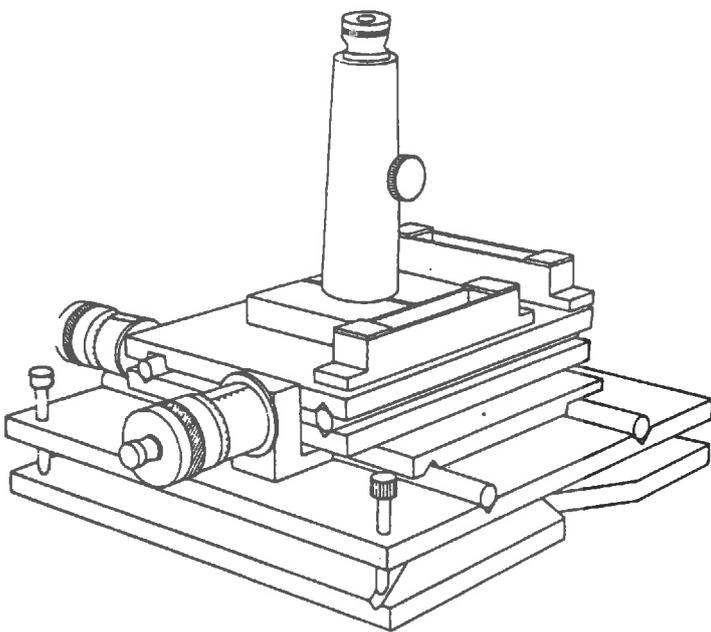


fig. 2.16 Appareil de FINLAYSON
(in FINLAYSON et OSMASTON, 1977).

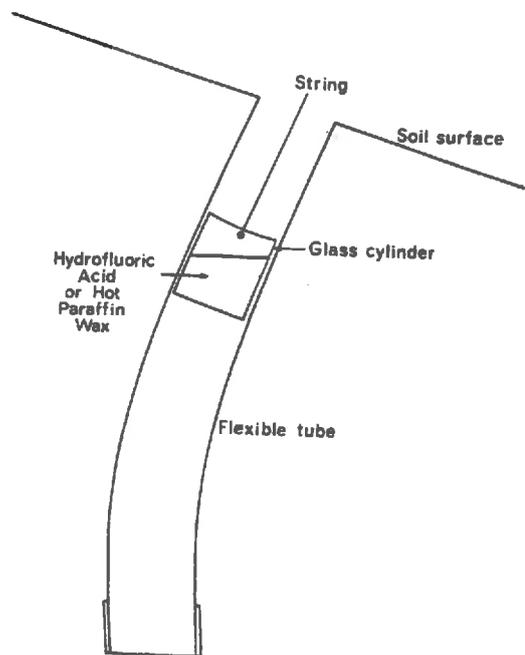


fig. 2.17 Cylindre à acide fluorique
(in ANDERSON et FINLAYSON 1975)

La reptation fait l'objet de mesures depuis longtemps, mais les techniques se sont particulièrement développées les vingt dernières années. Plusieurs synthèses ont été réalisées : la plus ancienne à notre connaissance est celle que l'on trouve dans la Revue de Géomorphologie Dynamique en 1967 (17/4). Des synthèses plus récentes ont été publiées dans le Technical Bulletin du British Geomorphological Research Group en 1975 (ANDERSON et FINLAYSON, 1975) et dans la revue CATENA en 1978 (ANDERSON et COX, 1978).

La synthèse que nous proposons ici les complète en intégrant les techniques récemment développées et en classant les techniques en fonction de leur objectif et de leur intérêt (ce qu'elles cherchent à mesurer, ce qu'elles mesurent).

Le tableau 2.1 donne une vue d'ensemble des techniques utilisées qui sont présentées ensuite de manière plus détaillée.

2.3.1 Les instruments qui ne rendent pas compte de l'allure du profil : marques en surface et objets rigides placés dans le sol.

- marques en surface : pierres, blocs ou piquets.

Les pierres et blocs sont numérotés (SMITH, 1960), peints (MICHAUD, 1950 ; RUDBERG, 1962 ; RAPP, 1962 ; CAINE, 1963) ou contiennent une carotte d'aluminium (BLACK, 1969). Cette technique ne fait pas la part entre le mouvement du sol et celui des marques. JAHN et CIELINSKA (1974) soulèvent le problème en montrant que certains blocs ont subi un déplacement net jusqu'à neuf fois supérieur à celui mesuré par une autre méthode.

Les piquets sont insérés perpendiculairement à la pente ou verticalement et à des profondeurs différentes (SCHUMM, 1956, 1964 ; SMITH, 1960 ; RAPP, 1962). Le mouvement observé en surface est un mouvement plus ou moins moyen pour l'épaisseur correspondant à la zone d'enfoncement, bien que l'inclinaison des piquets ne soit pas mesurée. SMITH considère qu'il correspond à celui de la profondeur égale à la moitié de la longueur dans le sol.

Ces techniques, qui sont les plus anciennes, sont simples et peu coûteuses. Elles sont le plus souvent utilisées pour des déplacements de type gelifluxion. Le repérage se fait à partir de points fixes (affleurements rocheux, piquets enfoncés dans une zone stable) à l'aide d'une chaîne d'arpenteur, d'un théodolite ou d'un télémètre. Classiquement employées en milieu périglaciaire, elles posent le problème de la sensibilité des marques au soulèvement par des coins de glace, des gonflements, etc... Les mesures sont en général effectuées une fois par an. Elles doivent donc être considérées comme des ordres de grandeur et avec la plus grande circonspection, surtout pour des déplacements d'intensité aussi faible que la reptation.

- objets rigides placés dans le sol :

Les tubes d'ANDERSON (fig. 2.7) sont constitués d'une tige rigide enfoncée profondément, qui est la partie fixe du système, et d'un cylindre en PVC, de longueur en général inférieure à 30 cm, avec des repères. Le mouvement (déplacement et inclinaison) est mesuré avec un pied à coulisse, ce qui peut être répété fréquemment. Le grand avantage de cette technique est son faible coût. La précision des mesures dépend de l'insertion, mais aussi du matériel du versant. ANDERSON l'estime à 0.1 mm, mais dans un matériel à forte porosité elle serait plutôt de l'ordre de 0.25 mm. Il est évident qu'on ne mesure que la reptation de la partie superficielle et que le piquet central est supposé fixe.

L'appareillage de mesure inclinométrique de MORAND (MORAND, 1978 ; KAISER, 1980 ; fig. 2.8) permet d'effectuer un repérage angulaire et en azimut de la tête de potelets enfoncés dans le sol. La mesure est effectuée en emboîtant exactement sur les potelets munis d'une tête de lecture, une tige équipée d'une réglette courbe graduée et d'un fil à plomb. Cet appareil a été conçu pour mesurer le déplacement différencié des matériaux en fonction de la profondeur.

Le T-peg de KIRKBY (fig. 2.9) et l'inclinomètre d'ANDERSON (fig. 2.10) mesurent le déplacement de manière angulaire en utilisant un système de niveaux à bulle. La précision des appareils permet de répéter les mesures à des intervalles de temps courts. Néanmoins, la partie aérienne des T-pegs est importante et risque davantage les perturbations (passage d'animaux etc...).

Une critique principale est à faire aux techniques de mesure qui utilisent des objets rigides insérés dans le sol : ceux-ci ne peuvent rendre compte du profil de déplacement. D'autre part, l'influence de l'augmentation de la charge lorsqu'on fixe soit un système de fil à plomb et réglette, soit un système à niveaux, n'est sans doute pas négligeable. En outre, la rigidité est un frein évident au mouvement et les parts respectives du mouvement naturel du sol et de sa réaction à l'obstacle rencontré sont impossibles à faire dans le déplacement mesuré.

2.3.2 Les instruments qui essaient de rendre compte de l'allure du profil :

Les premiers utilisés ne permettent pas de suivre l'évolution, et le profil est une résultante des déplacements pendant une longue période. Des techniques plus récentes ont été mises au point dans le but de suivre l'évolution de ce profil.

L'enfouissement d'objets déformables ou de faibles dimensions, mais alignés, et leur excavation après plusieurs mois ou années permettent de visualiser la résultante des déplacements le long du profil.

Ce sont des colonnes de sables (HADLEY, 1967), de sol coloré, des cylindres en paraffine (BARR et SWANSTON, 1970), des tubes déformables en plastique (dits tubes de Cassidy ; RUDBERG, 1962) ou en PVC (CAINE, 1963), des Tests pillars (morceaux de bois alignés ; JAHN et CIELINSKA, 1974 ; fig. 2.11), des tiges métalliques placées horizontalement dans une fosse "Young's pit" (YOUNG, 1960 ; fig. 2.12).

Insertion et excavation créent des perturbations qui peuvent être importantes. En outre, l'intégration du déplacement sur une longue période ne permet pas d'étudier les relations avec l'évolution d'autres propriétés et donc de préciser les mécanismes.

Cependant, la technique des Young's pit, très employée (KIRKBY, 1967 ; EMMETT ET LEOPOLD, 1967 ; EYLES et HO, 1970 ; DEDKOV et al., 1978 ; RASHIDIAN, 1985 ; DONOGHUE, 1985), a également été utilisée sur des monolithes de sol (YOUNG, 1960 ; KIRKBY, 1967) pour suivre les mouvements : elle a permis de restituer l'allure aléatoire en zigzag des mouvements individuels des tiges, qui correspond en fait aux mouvements réels des particules de sol.

- les instruments développés dans le but de suivre l'évolution du profil sur le terrain :

Le système de RASHIDIAN (1985 . fig. 2.13) se compose de petits blocs en plastique de section carrée, munis d'une tige de longueur variable fixée dans leur centre et d'une section en aluminium, dans laquelle sont ménagées des ouvertures carrées, montées sur trois piquets enfoncés jusque dans la roche. Les petits blocs sont placés dans les trous de même section et de profondeur égale à la longueur des tiges. Les parois des trous sont protégées par des petits cylindres en PVC que l'on retire pour effectuer la mesure. Le mouvement des petits blocs est mesuré en repérant la position des aiguilles dans les ouvertures de la section en aluminium qui est amovible. Ce système permet d'établir facilement des profils. Cependant, il rompt leur continuité et supprime la charge du sol sus-jacent. Un système assez analogue est employé par SCHEPERS (1983).

Les cônes de SELBY (1968 ; fig. 2.14) en aluminium sont placés dans le sol sur la face aval d'une fosse et rattachés à des cordes à piano tendues dans un tube ancré dans le sol. La tension des cordes est maintenue constante, c'est leur déplacement qui est mesuré. La position et l'inclinaison du tube doivent être vérifiées. Cette technique permet le déplacement autonome des cônes, mais l'influence de la tension des cordes sur celui-ci et le rôle exercé en amont par le tube ne sont pas connus.

Le détecteur de mouvement de TROEH (1975 ; fig. 2.15) est constitué par des pièces métalliques pivotantes, placées à différents niveaux de la moitié supérieure d'un tube inséré dans le sol et ancré dans une couche consolidée. Lorsque le sol se déplace, les pièces pivotent et transmettent le mouvement par l'intermédiaire d'une tige métallique à un pointeur en surface. Les limitations d'emploi sont liées aux caractéristiques du sol qui ne doit pas contenir trop de cailloux susceptibles de bloquer les pivots.

L'appareil de FINLAYSON (FINLAYSON et OSMASTON, 1977 ; fig. 2.16) se compose d'un théodolite à télescope modifié, monté sur un chariot qui se déplace à l'aide de vis micrométriques, et d'un tube flexible, inséré dans le sol et ancré à sa base, dans lequel sont placés quatre réticules, un à la base et trois à différentes profondeurs. La position relative des trois réticules par rapport à celui de la base est mesurée avec le théodolite, en l'adaptant sur le sommet du tube. Un miroir, placé au fond du tube, réfléchit la lumière.

Les autres techniques s'apparentent aux inclinomètres utilisés de manière classique en géotechnique (cf. PEIGNAUD, 1970) ; l'instrument de mesure est en général inséré dans un tube flexible ancré à sa base pour en mesurer l'inclinaison à différentes profondeurs.

Les inclinomètres employés en génie civil ne sont utilisables que pour mesurer la reptation profonde. De tels appareils ont été employés par KOJAN (1967) et HUTCHINSON (1968) pour la reptation continue (continuous creep). En surface, la résolution que l'on recherche limite leur utilisation, car il faut pouvoir faire des mesures à des niveaux très rapprochés.

Les cylindres à acide fluorique ou paraffine liquéfiée (fig. 2.17), en verre transparent partiellement remplis, sont descendus dans un tube flexible, et l'inclinaison du ménisque par rapport à la paroi permet de connaître l'inclinaison du tube en toute profondeur. Le ménisque n'est pas facile à reconnaître avec la cire, mais l'utilisation d'acide n'est pas sans danger. La section du tube ne doit surtout pas se déformer.

Les capteurs à jauges d'extensométrie, utilisés par WILLIAMS (1957), ELLIS (1973), SUDGEN (1973), GEISSERT (1981), MERCIER et GEISSERT (1982), AUZET et al. (1984), sont constitués d'une lame souple, placée à demeure dans le sol dans une gaine plastique ou directement, sur laquelle sont collées les jauges à différents niveaux. La flexion est déduite de la déformation des jauges qui induit une variation de leur résistance électrique. Ces capteurs permettent d'obtenir, à chaque niveau de jauges, un signal qui est fonction de la courbure de la lame à ce niveau;

moyennant un modèle de dépouillement, le profil de déplacement est reconstitué à partir d'un point fixe ou d'un point dont le déplacement est connu. La mise en oeuvre de tels capteurs est assez complexe, mais leur intérêt est de fournir des mesures à différentes profondeurs dont l'évolution peut être comparée avec d'autres caractéristiques (température, pression d'eau des pores) aux mêmes profondeurs.

Toutes ces techniques, développées relativement récemment, sont plus sophistiquées et plus coûteuses, donc plus difficiles à mettre en oeuvre, soit pour des raisons techniques, soit pour des raisons financières. Leur intérêt est un gain en précision qui permet un suivi le long du profil, mais aussi dans le temps.

	Vegetation	IP	AT	AP	YP	DP	CT	Moyenne	Ecart-Type
1	N	1.46	1.4	1.3	1.8	1.7	1.1	1.46	0.26
2	J	2.00	2.2	2.6	2.0	2.1	1.9	2.13	0.25
3	P	0.33	0.3	0.3	0.5	0.3	0.4	0.36	0.08
4	N	1.12	1.2	1.2	1.0	1.5	1.1	1.19	0.17
5	J	1.79	1.6	1.9	1.9	1.3	2.2	1.78	0.31
6	J	1.39	1.4	1.3	1.5	1.4	2.1	1.52	0.29
7	N	1.06	1.1	1.1	(1.2)	1.3	1.0	1.13	0.11
8	P	0.41	0.7	0.4	0.7	0.6	0.5	0.55	0.14
9	N	1.29	1.2	0.7	1.3	1.1	1.6	1.20	0.30
10	J	1.97	1.9	(2.0)	1.8	(1.9)	2.0	1.93	0.08
11	N	0.85	0.9	0.8	1.2	0.9	1.5	1.03	0.27
12	P	1.11	1.1	0.9	1.2	1.0	1.2	1.09	0.12
13	P	0.55	0.6	0.6	0.8	0.5	0.6	0.61	0.10
14	J	2.44	2.3	2.0	2.2	2.0	2.2	2.19	0.17
15	P	1.04	1.1	1.1	1.3	1.0	1.2	1.12	0.11
16	N	1.47	1.6	1.4	1.6	1.2	1.7	1.50	0.18
17	J	2.32	(2.3)	2.4	2.6	2.1	2.3	2.34	0.16
18	N	0.95	1.1	0.9	1.2	1.0	1.8	1.16	0.33
19	P	0.86	0.9	0.8	1.0	0.8	1.0	0.89	0.09
20	J	1.67	1.5	1.6	1.7	1.7	1.9	1.68	0.13
<u>Moyenne</u>		1.30	1.32	1.27	1.43	1.27	1.47	1.34	-

Végétation : Nardus, Juncus, Pteridium.

Instruments : Inclinometer Pegs, Anderson's Tube, Aluminium Pillars,
Young's Pits, Dowelling Pillars, Cassidy's Tube.

tab. 2.2 Vitesse (mm/an) des déplacements par reptation mesurés en 20 sites avec 6 techniques différentes.
(in ANDERSON et COX, 1978).

La confrontation entre les mesures obtenues avec toutes les différentes méthodes, dans les mêmes conditions, n'a pas été faite jusqu'à présent. Cependant, quelques chercheurs ont utilisé conjointement plusieurs de ces méthodes en un même site. ANDERSON et COX (1978) comparent et analysent en détail les résultats obtenus avec six méthodes différentes à 2.5 cm de profondeur, sous la zone du chevelu racinaire dense, et pendant douze mois (tab. 2.2). Leurs conclusions sont optimistes car ils notent que les différences sont faibles compte tenu de la précision des résultats.

CONCLUSION

L'analyse de la bibliographie montre qu'il existe plusieurs processus de reptation. La reptation dite "saisonnière", qui inclut les reptations hydriques et thermiques, est active sur les versants des régions tempérées. Liée aux conditions climatiques, elle affecte surtout la partie superficielle des formations superficielles et des sols.

L'objectif que nous nous fixons est d'en préciser les mécanismes. Pour cela, un site a été équipé de différents appareils de mesures climatiques, pour l'atmosphère et le sol. La mesure de la reptation doit être faite de manière précise pour pouvoir confronter l'évolution des déplacements aux conditions hydriques et thermiques du sol.

C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser des capteurs à jauges d'extensométrie. Nous disposons déjà d'un capteur à jauges d'extensométrie mis au point par MERCIER (1978) et GEISSERT (1981) ; les limites techniques (problèmes de dérives, rigidité, ancrage) et la "lourdeur" théorique (hypothèses pour le dépouillement) en restreignaient l'utilisation.

Loin de rejeter ce type de capteur, nous avons cherché à en transformer la conception et à en améliorer la réalisation technique ainsi que la vérification.

DEUXIEME PARTIE : LE CAPTEUR DE MESURE DE LA REPTATION.

INTRODUCTION

Parmi les instruments employés pour mesurer la reptation, ceux qui sont capables simultanément de rendre compte de la forme du profil de déplacement et de suivre son évolution fourniront des éléments nouveaux pour la compréhension des mécanismes. Ce point de vue, ainsi que le développement et l'amélioration des techniques, ont amené à concevoir différents instruments (cf. § 2.3.2).

Le choix d'un capteur à jauges d'extensométrie a été fait parce qu'un tel instrument, à demeure dans le sol, permet d'éviter :

- des insertions répétées d'instruments dans des tubes flexibles qui peuvent se déformer (inclinomètres, cylindres à acide fluorique),
- des ajustements répétés d'outils permettant la mesure (la section en aluminium dans le système de Rashidian, le théodolite modifié dans l'appareil de Finlayson).

En outre, les mesures peuvent s'effectuer à une distance de plusieurs mètres, ce qui évite de piétiner le sol en surface, à proximité directe des profils suivis.

Les capteurs à jauges d'extensométrie sont inspirés des inclinomètres. Le premier, à notre connaissance, à avoir adapté la technique pour la mesure des déplacements proches de la surface est WILLIAMS (1957), dont le capteur était dans une gaine souple pour des raisons de protection. ELLIS (1973) et SUDGEN (1973), qui ont travaillé ensemble, ont placé leurs capteurs directement en contact avec le sol, mais n'ont semble-t-il plus publié de résultats depuis 1973. Parallèlement, MERCIER (1978), puis GEISSERT (1981), ont conçu et mis en oeuvre des capteurs de géométrie variée, avec soit un, soit plusieurs points de mesure par capteur et un ancrage respectivement au sommet ou à la base.

Leur expérience a amené à développer un nouveau capteur qui s'en distingue

- par sa plus grande souplesse,
- par la répartition régulière des jauges le long de la lame,
- par le modèle de dépouillement plus simple, qui effectue une reconstitution géométrique des déplacements,
- par les améliorations techniques (types de jauges, de colle et de protections) qui ont permis de lever certaines difficultés rencontrées auparavant (dérives) et qui doivent en augmenter la durée de vie.

Enfin, une attention particulière a été apportée aux vérifications, en tenant compte de la totalité de la chaîne de mesure dans laquelle le capteur s'insère.

Après avoir présenté la conception et la réalisation du capteur, de la chaîne de mesure et des traitements des mesures, on exposera les tests de reproductibilité des mesures, de précision de la procédure de dépouillement et l'influence de ces deux paramètres sur les résultats obtenus. Enfin, nous présenterons les vérifications globales du fonctionnement qui ont été réalisées au laboratoire, sur des maquettes en bois, et dans un modèle réduit de versant.

CHAPITRE III : METHODE ET REALISATION DES MESURES DE REPTATION A L'AIDE
DU CAPTEUR A JAUGES D'EXTENSOMETRIE.

La mesure de la reptation est effectuée par l'intermédiaire d'un capteur (fig. 3.2) intégré à une chaîne de mesure constituée de deux autres éléments : un pont de mesure et un boîtier de commutation (fig. 3.1).

3.1 Principe et conception du capteur :

Le principe réside dans la transformation d'un phénomène physique - la flexion d'une lame d'acier souple insérée dans le sol - en un signal électrique provenant des jauges d'extensométrie collées régulièrement de part et d'autre de la lame. Ces jauges sont constituées par un fil conducteur très fin, replié plusieurs fois sur lui-même et collé sur un feuillet plastique (cf. annexe 3.1).

Toute variation relative de longueur du fil $\Delta L/L$ - appelée déformation - produira une variation relative proportionnelle de sa résistance électrique :

$$\Delta R/R = K \Delta L/L \quad (3.1)$$

avec R : résistance électrique du fil, L : longueur du fil, K : facteur de jauge.

Une déformation ($\Delta L/L$) est le rapport d'un allongement à une longueur de base et s'exprime par un nombre sans dimension. Les mesures de déformation sont donc indépendantes du système d'unité. Très petit, ce rapport est en fait souvent exprimé en microdéformations et il est d'usage de dire que :

$$1 \times 10^{-6} = 1 \text{ microdéformation} = 1 \mu\text{m/m} \quad (3.2)$$

Il faut bien noter que la "déformation" des jauges qui est mesurée n'a pas le même sens que la "déformation" du capteur et du sol qui résulte des déplacements à tous les niveaux. Aussi, lorsqu'on parlera dans ce qui suit de mesures de déformation sans préciser, il s'agira de celles des jauges et non de celle du capteur ou du sol.

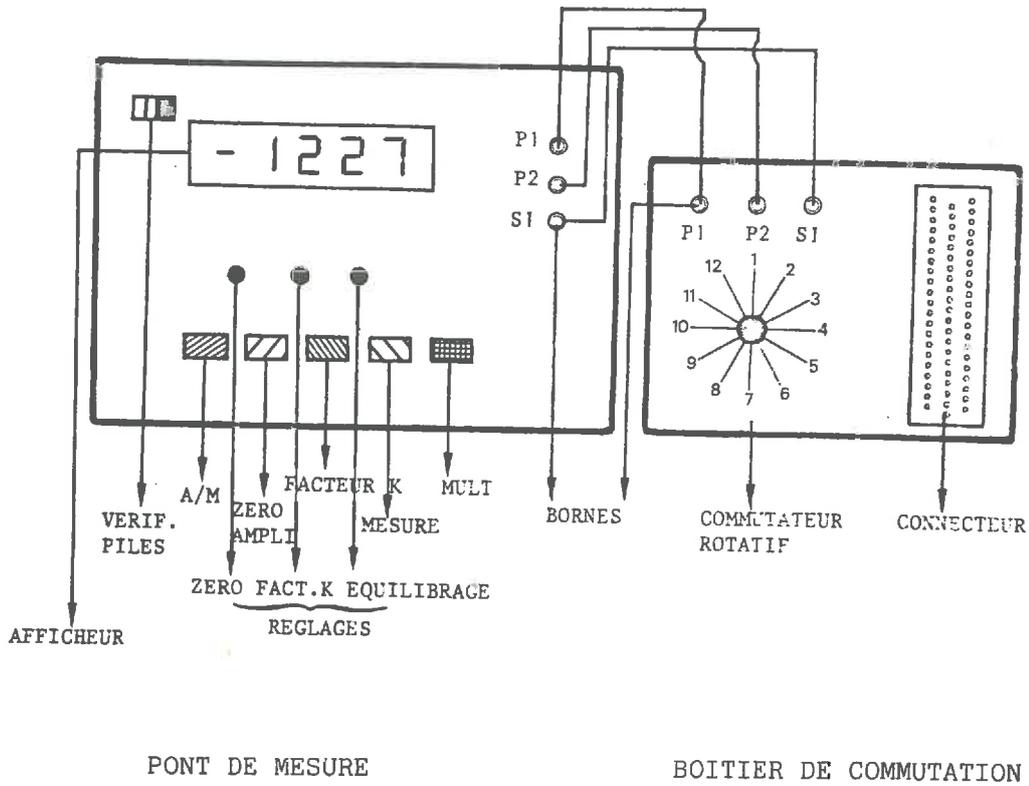
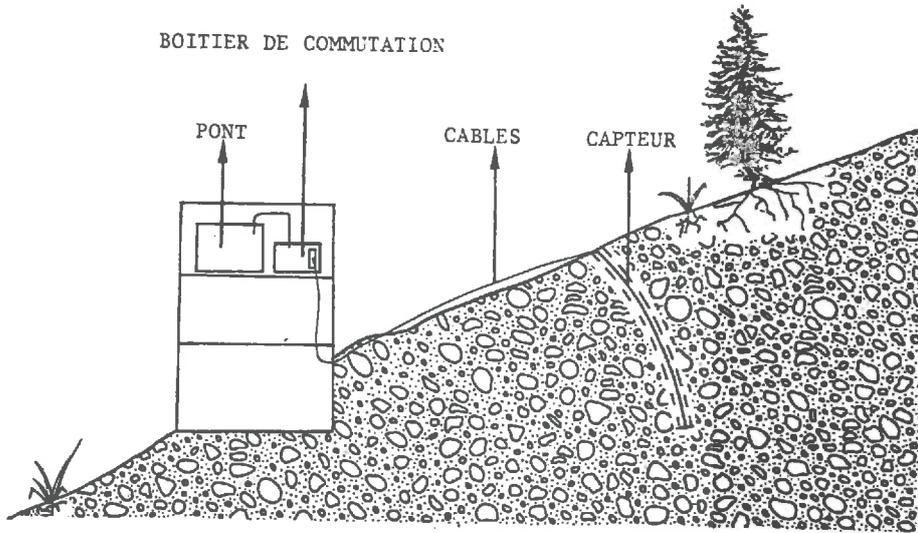


fig. 3.1 Chaîne de mesure de la reptation.

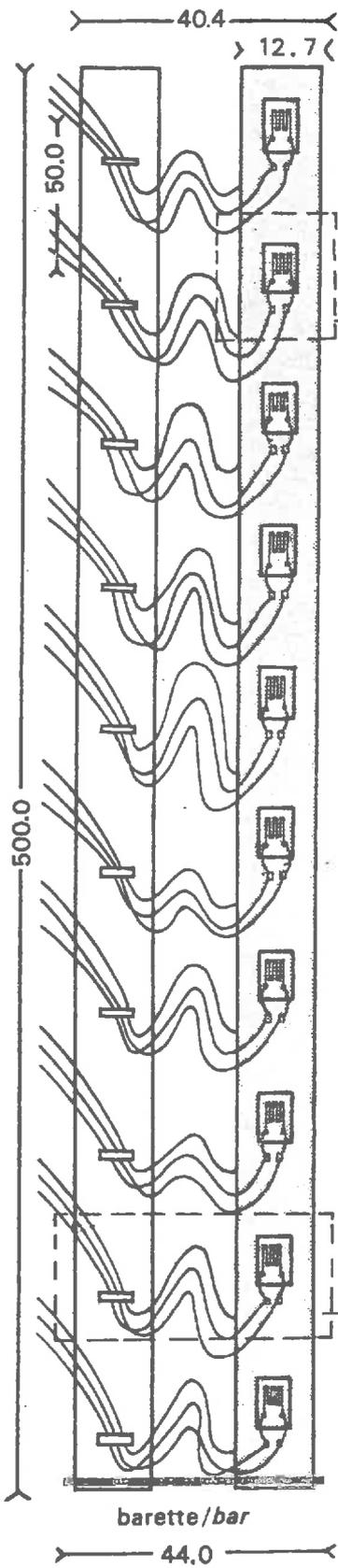


fig. 3.2 Le capteur à jauges d'extensométrie.

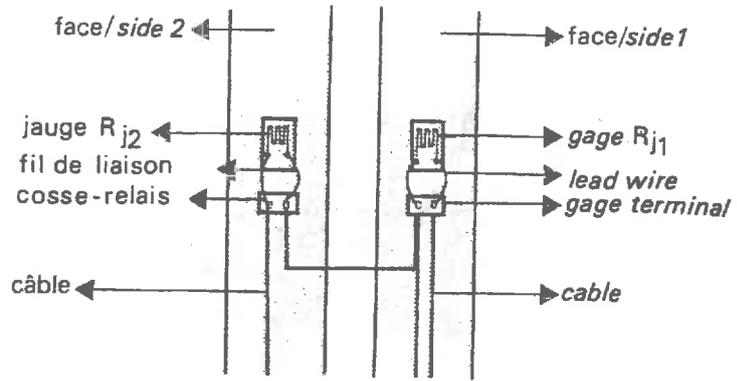


fig. 3.3 Montage des jauges sur les deux faces de la lame à un niveau de mesure.

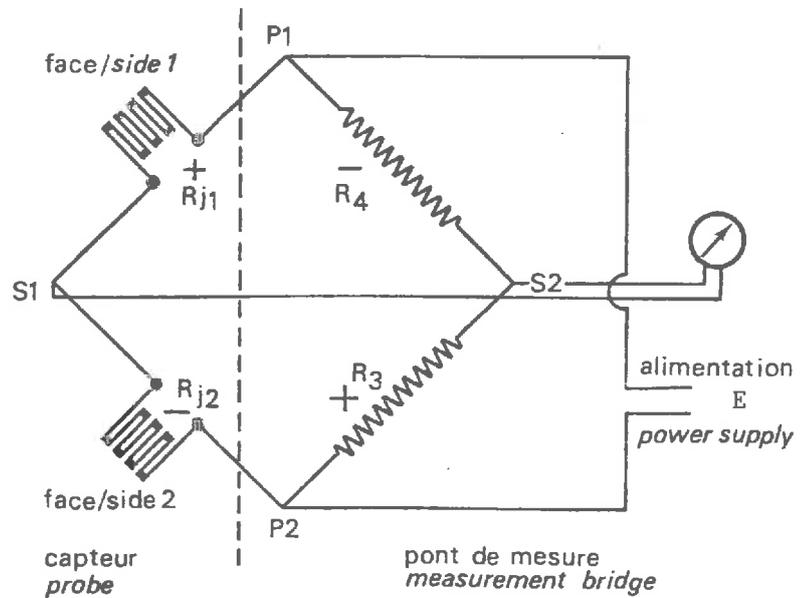


fig. 3.4 Montage des jauges dans un demi-pont de Wheatstone.

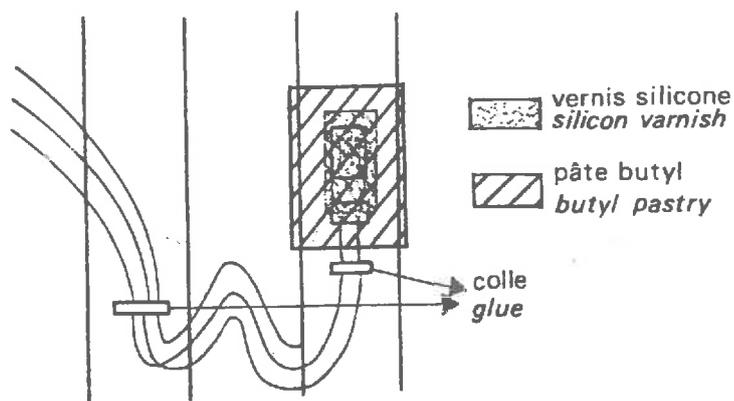


fig. 3.5 Protection d'une jauge.

La mesure de l'allongement relatif des jauges à chaque niveau de la lame permet de connaître la courbure de celle-ci en ces points et de reconstituer géométriquement les déplacements depuis la base du capteur jusqu'à la surface du sol. Les deux jauges R_{J1} et R_{J2} d'un même niveau (fig. 3.3) sont montées dans les deux bras adjacents d'un pont de WHEATSTONE. Ce montage est dit "en demi-pont". Les deux autres bras sont constitués par des résistances fixes R_3 et R_4 (fig. 3.4), contenues dans le pont de mesure.

Par construction, un pont de WHEATSTONE est formé de quatre résistances égales. S'il est alimenté sous une tension constante E sur la diagonale P1-P2, la tension de sortie e , mesurée entre S1 et S2 ne changera pas. La variation de l'une des résistances crée un déséquilibre et une variation de tension Δe entre S1 et S2 qui pour de très faibles variations de résistance - ce qui est le cas des jauges - est proportionnelle aux variations relatives $\Delta R/R$ de chacune des résistances. La formule générale est : est :

$$\frac{\Delta e}{E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_{J1}}{R_{J1}} - \frac{\Delta R_{J2}}{R_{J2}} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3.3)$$

La symétrie des signes "+" et "-" caractérise la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens inverse alors que deux résistances opposées agissent dans le même sens. Dans le cas du montage en demi-pont, R_3 et R_4 sont des résistances fixes et l'expression (3.3) devient :

$$\frac{\Delta e}{E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_{J1}}{R_{J1}} - \frac{\Delta R_{J2}}{R_{J2}} \right) \quad (3.4)$$

la variation de résistance des jauges se traduit ainsi par un signal électrique qui peut être mesuré.

La conception d'un tel capteur suppose que :

- sa partie inférieure soit ancrée dans des formations qui ne bougent pas,
- sa souplesse soit suffisante pour bien suivre les déformations du sol,
- la transmission de sa flexion aux jauges soit fidèle, c'est à dire que celles-ci soient parfaitement solidaires de la lame,
- les mesures ne soient pas influencées par d'autres facteurs (température, humidité), c'est à dire que le signal électrique corresponde uniquement aux variations relatives de la longueur du fil des jauges.

Ces conditions nécessaires impliquent certains choix au niveau des matériaux et de la fabrication du capteur (tab. 3.1).

3.2 Réalisation du capteur et mise en place (mode opératoire en annexe 3.1) :

Le choix des dimensions des éléments du capteur résulte d'un compromis entre les caractéristiques idéales (souplesse maximale, largeur minimale pour éviter de confondre torsion et flexion, continuité des mesures le long de la lame) et les contraintes de réalisation :

- éviter les risques de pliage lors de l'insertion,
- assurer entre les jauges un espace suffisant pour les câblages et les protections.

Ces dimensions sont :

lame : longueur 500 ou 630 mm	jauges : grille de mesure $1.57 \times 1.57 \text{ mm}^2$
largeur 12.7 mm	support plastique : longueur 7.4 mm
épaisseur 0.3 mm	largeur 3.8 mm
intervalle entre deux jauges : 50.0 mm	

La seconde lame sert uniquement à éloigner latéralement les câbles (trois par niveau) des jauges pour éviter qu'ils ne perturbent les déformations du profil de sol à l'endroit de la mesure (fig. 3.2).

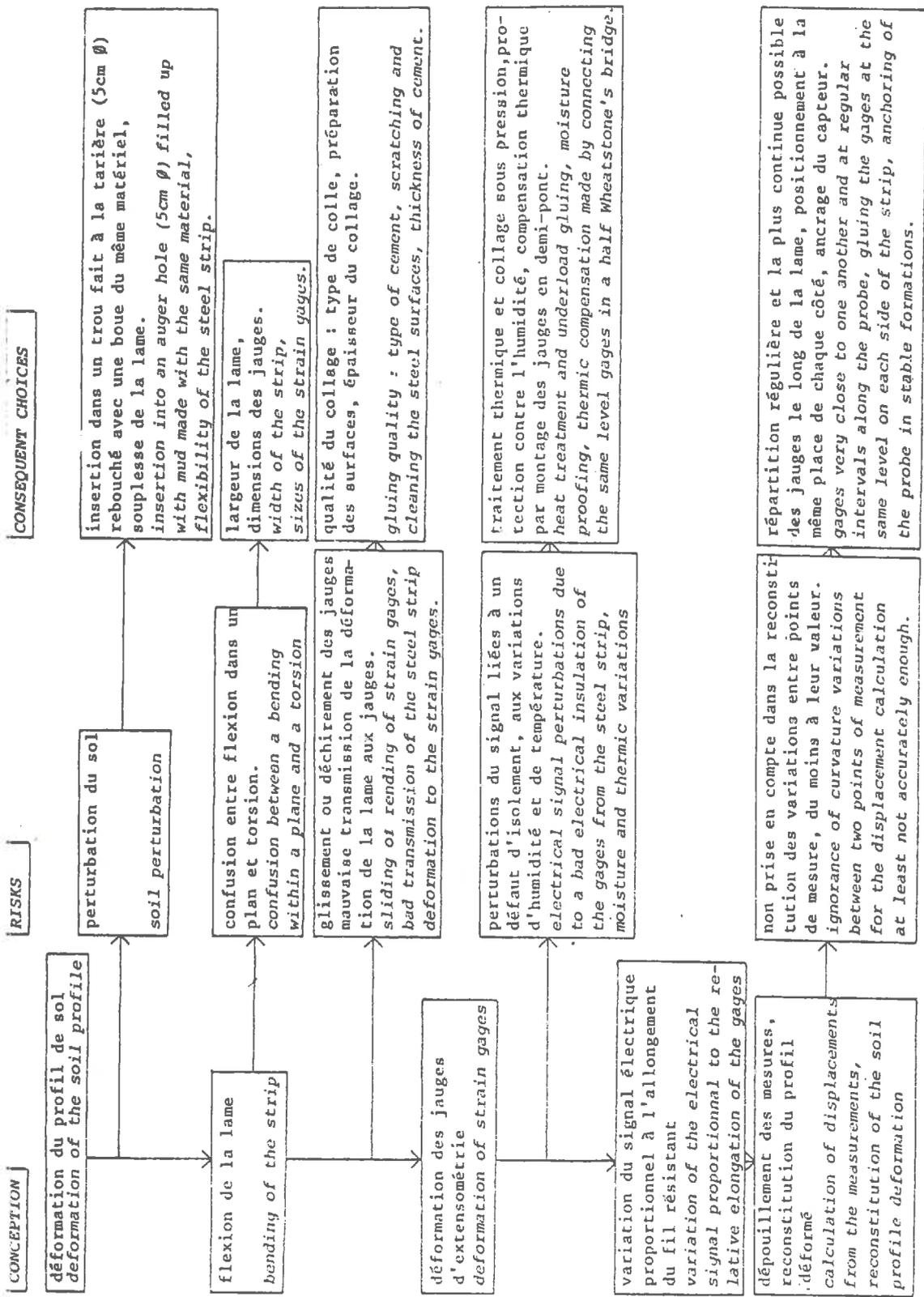
Le collage des jauges doit assurer une bonne transmission de la flexion de la lame aux jauges ; il doit pour cela être fin et souple, isoler électriquement la jauge de la lame et conserver ses caractéristiques au cours du temps. Sa qualité est largement tributaire de la préparation des surfaces et de la colle choisie.

L'humidité peut oxyder les câbles et les connexions et créer ainsi des ponts électriques entre les jauges et la lame (effet de pile). En l'absence d'un isolement correct contre l'humidité (résistance d'isolement $> 100 \text{ M}\Omega$ et protection des jauges et des câblages très efficace), le signal serait sans relation avec la résistance des jauges. Une première protection contre l'humidité est réalisée en passant un vernis silicone hydrofuge sur les jauges et les cosses-relais (fig. 3.3). Une seconde protection, constituée par une pâte butyl souple, protège les extrémités des câbles, les soudures, les cosses-relais et les jauges; un point de colle souple fixe les câbles contre la lame pour éviter qu'ils ne soulèvent la pâte butyl (fig. 3.5).

Les jauges sont des résistances électriques et varient avec la température. D'autre part, les différences de dilatation entre la lame et le fil des jauges peuvent entraîner des déformations de celui-ci. Il convient donc d'abord de choisir des jauges dont le matériau du fil a un coefficient de dilatation proche de celui de l'acier de la lame (les constructeurs donnent les matériaux pour lesquels les jauges sont dites "autocompensées"). Les effets des variations thermiques sont compensés par le montage en demi-pont. Ainsi, un effet thermique identique sur les deux jauges d'un même niveau est compensé (cf. expression 3.4) et n'influence effectivement pas le signal : le test effectué, capteur à plat, entre -10°C et $+18^{\circ}\text{C}$ a montré que les variations du signal n'excédaient pas $10\ \mu\text{m}/\text{m}$ et restaient inférieures à la précision de $\pm 6\ \mu\text{m}/\text{m}$ donnée par le constructeur pour le pont de mesure. Ce montage a en outre l'intérêt de doubler le signal, deux jauges d'un même niveau subissant un allongement de même module mais de signe opposé.

Le capteur est conçu pour que son insertion dans le sol perturbe le moins possible le profil et son environnement. Le contact avec le sol est amélioré en éloignant les nombreux câbles et en les fixant doucement par un point de colle sur une seconde lame. Les deux lames sont maintenues lors de l'insertion en coinçant leurs deux extrémités dans une barette en PVC spécialement conçue.

Le capteur est ensuite mis en place le plus droit possible dans un trou effectué à la tarière de 5 cm de diamètre et d'une profondeur égale à la longueur du capteur. Le matériel excavé doit être soigneusement mis de côté en séparant les différents horizons. Le trou est ensuite rebouché progressivement avec une boue réalisée dans ce matériel et en reconstituant les différents horizons. La barette qui maintient l'extrémité supérieure des lames est ensuite retirée : les lames ne doivent pas trop sortir du sol ($\approx 1\ \text{cm}$), juste assez pour pouvoir repérer leur position et la mesurer par rapport à un repère. Il faut ensuite attendre que le matériel soit stabilisé pour prendre en compte les mesures, ce qui peut prendre de quelques jours à un mois suivant le type de matériel.



tab. 3.2: Réalisation du capteur : conception et choix techniques.
Building up of the probe : conception and technical choices.

3.3 Description de la chaîne de mesure (fig. 3.1) :

Après insertion, tous les câbles issus du capteur (3 par niveau) sont introduits, à une distance de quelques mètres, dans un boîtier étanche (type Legrand ou Sarel). Un contact mâle est soudé à l'extrémité de chaque câble ; tous les contacts sont ensuite montés sur une embase qui comprend trois rangées, une rangée par type de câble (P1, P2 ou S1, cf. fig. 3.3). Le premier de chaque rangée est issu du niveau de jauges en surface et le dernier du plus profond. Ce connecteur (embase + contacts mâles) servira à intégrer le capteur dans la chaîne qui comprend en outre le pont de mesure et le boîtier de commutation.

Le pont de mesure utilisé est un pont portatif (P 3500 de VISHAY MM). Il contient essentiellement :

- des borniers d'entrée,
- une alimentation stabilisée,
- des résistances calibrées très stables pour constituer le demi-pont complémentaire de celui formé par les jauges d'un même niveau,
- un amplificateur du signal (gain 1×10^6),
- un galvanomètre pour effectuer la lecture du déséquilibre du pont de Wheatstone constitué par les jauges et les résistances calibrées.

Son fonctionnement et sa linéarité doivent absolument être testés à l'aide d'un simulateur de contraintes, sur une gamme plus étendue que celle prévue des mesures. Ce test a montré que la linéarité du pont était excellente, puisque le décalage entre les déformations mesurées et celles générées par le simulateur était au maximum de $2 \mu\text{m}/\text{m}$, ce qui est inférieur à la précision de $\pm 6 \mu\text{m}/\text{m}$ donnée par le constructeur. Un réglage du zéro peut être effectué, mais les mesures étant relatives, il suffit de connaître le décalage au cas où il faudrait, pour une raison quelconque, changer de pont.

Le boîtier de commutation spécialement construit est un multiplexeur. Son intérêt est de permettre une liaison rapide entre les jauges et le pont et d'éviter les erreurs de branchement. Au laboratoire, ce multiplexeur n'est pas nécessaire, car les mesures s'effectuent dans des conditions idéales pour l'opérateur, ce qui est loin d'être le cas sur le terrain où il faut pouvoir opérer vite, à l'abri de l'humidité.

Le boîtier est constitué essentiellement d'une embase dans laquelle sont montés des contacts femelles, d'un commutateur rotatif et de borniers de sortie.

Le commutateur est composé de trois galettes à douze positions, montées sur un sabre. Un bouton permet de faire pivoter le sabre et de relier ainsi successivement chacune des douze positions aux borniers de sortie. Chaque rangée de contacts femelles est reliée à une même galette, elle-même reliée à un bornier de sortie unique ; chaque galette et chaque bornier correspondent ainsi à un type de liaison (P1, P2 ou S1), et les différentes positions permettent de relier successivement les différents niveaux de jauges au pont de mesure : des câbles, terminés à chaque extrémité par une fiche banane, relient les trois borniers de sortie à trois borniers d'entrée du pont.

Des contacts en or ont été choisis pour éviter les oxydations. Après vérification des soudures et de la bonne isolation de chaque voie, la qualité du boîtier doit être testée en comparant les mesures obtenues, le capteur étant maintenu immobile :

- en branchant les trois câbles, niveau par niveau, directement sur le pont de mesure,
- en branchant le capteur sur le multiplexeur et en reliant celui-ci au pont de mesure.

Pour chaque point de mesure des capteurs construits, les différences n'excédaient pas $\pm 6 \mu\text{m}/\text{s}$, ce qui est encore de l'ordre de grandeur de la précision du pont donnée par le constructeur.

Les mesures sur le terrain sont réalisées de la manière suivante :

- brancher les différents éléments de la chaîne de mesure (le pont, le boîtier et le capteur),
- vérifier le facteur de jauge (= 2.0), le zéro de l'affichage et l'équilibrage du pont de mesure,
- effectuer trois séries* de mesures, du niveau de jauges supérieur jusqu'au plus profond. Si, à un même niveau, l'écart maximum entre les trois mesures est supérieur à 12 $\mu\text{m}/\text{m}$ (correspondant à la précision du pont), vérifier les branchements et faire deux séries supplémentaires, sinon recommencer la séquence.

Le temps nécessaire au branchement et à la réalisation des trois séries est de cinq à dix minutes par capteur.

Le signal mesuré étant très faible, et la précision recherchée nécessairement grande, il faut vérifier régulièrement et aussi à la moindre incertitude :

- les valeurs de résistance des jauges du capteur (120 Ω). Cette vérification est faite sur le terrain en reliant aux borniers de sortie du boîtier de commutation un ohmmètre précis.
- La qualité de la connexion du capteur au boîtier (effectuer quelques mesures successives en branchant et débranchant le capteur).
- La linéarité du pont.

Un fonctionnement défectueux de l'un ou de l'autre des éléments de la chaîne de mesure entraîne la perte des mesures de toute une période et il est donc très important d'en déceler le début.

** on désignera dorénavant par "série de mesure" le fait d'effectuer pour un capteur une mesure successivement à chaque niveau, de la surface vers la profondeur.*

3.4 Les différentes étapes du traitement des mesures :

Le traitement des mesures consiste à :

- calculer à partir des signaux mesurés par le pont la déformation relative des jauges à chaque niveau et les courbures de la lame en ces points,
- reconstituer les déplacements aux différents niveaux depuis la base jusqu'en surface en approximant les tangentes aux points de mesure à partir des courbures et en intégrant les déplacements.

les déformations

Ce sont les rapports $\Delta L/L$ des allongements par rapport à une longueur de base et elles sont mesurées à chaque niveau par le déséquilibre du pont (cf. § 3.1). Les jauges étant montées à chaque niveau dans les bras adjacents d'un demi-pont, la mesure M exprimée en $\mu\text{m/m}$ est en fait :

$$M = 10^6 (2 \Delta L/L) \quad (3.5)$$

En posant que pour un profil initial du capteur, théoriquement droit, les jauges ne subissent aucun allongement, les mesures obtenues à chaque niveau pour ce profil correspondent au déséquilibre initial de chaque pont de Wheatstone. La première opération consiste donc à obtenir des mesures relatives en effectuant la différence entre la moyenne des mesures brutes à l'instant t_j et la moyenne des mesures à l'instant initial t_0 .

les courbures

Pour toute petite partie de longueur L de la lame fléchie, assimilable à un arc de cercle de rayon r, on peut écrire pour l'axe central de la lame et pour chacune de ses faces (fig. 3.6) :

$$\frac{L}{r} = \frac{L + L}{r + h/2} = \frac{L - L}{r - h/2} \quad (3.6)$$

h étant l'épaisseur de la lame en millimètres.

d'où on peut déduire l'expression de la courbure $\rho = 1/r$:

$$\rho = \frac{1}{r} = \frac{2}{h} \frac{\Delta L}{L} \quad (3.7)$$

Ainsi, d'après les expressions (3.5) et (3.7), les mesures M effectuées aux différents niveaux z permettent de déduire directement les courbures $\rho(z)$ à ces points de mesure :

$$\rho(z) = \Delta M/h \quad (3.8)$$

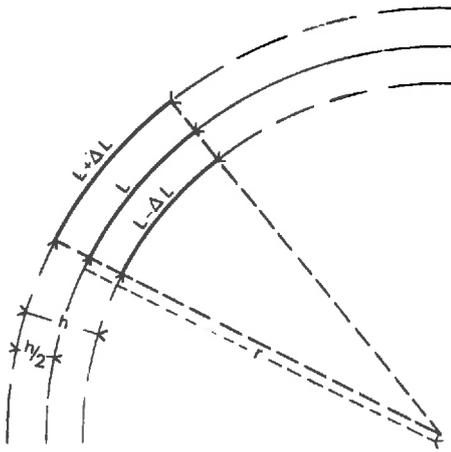


fig. 3.6 Partie de la lame assimilée à un arc de cercle.

les déplacements

Ils sont calculés à partir des courbures ρ_i aux profondeurs z_i . Il est en effet possible reconstituer, de la base vers la surface, le profil de déplacement $y(z)$ en intégrant l'équation différentielle de deuxième ordre donnant l'expression de la courbure :

$$\rho(z) = \frac{d^2y/dz^2}{[1 + (dy/dz)^2]^{3/2}} \quad (3.9)$$

Le modèle de dépouillement utilisé consiste à effectuer en deux étapes une intégration numérique approchée de l'expression (3.9) (DAHLQUIST et BJORCK, 1974) :

- calcul des pentes $y' = dy/dz$, en intégrant l'expression :

$$dy'/dz = \Delta z (1 + y'^2)^{3/2} = F(z, y') \quad (3.10)$$

par la méthode de Runge-Kutta (schéma de Heun) :

$$\begin{aligned} &\text{pour } i = 1 \text{ à } i = n \\ &y'_i = y'_{i-1} + (K1 + K2)/2 \\ &\left\{ \begin{aligned} K1 &= \Delta z F(z_{i-1}, y'_{i-1}) \\ K2 &= \Delta z F(z_i, y'_{i-1} + K1) \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (3.11)$$

z étant l'intervalle constant entre deux points de mesure.

- calcul des déplacements y par la formule d'intégration de Simpson :

pour $i = 2$ à $i = n$

$$y_i = y_{i-2} + (y'_{i-2} + 4 y'_{i-1} + y'_i) \Delta z/3 \quad (3.12)$$

Les relations (3.11) et (3.12) permettent ainsi de reconstituer de proche en proche le profil de la lame à partir de la base qui est supposée fixe, ce qu'expriment les conditions :

$$y_0 = y_1 = 0, \quad y'_0 = (dy/dz)_0 = 0 \quad (3.13)$$

Les points z_0 et z_1 correspondant respectivement au point d'ancrage et au niveau le plus profond.

Compte tenu de la souplesse de la lame, le capteur ne peut se déplacer à la base sans que cela soit sensible sur les déformations des jauges. La mesure à ce niveau constitue donc une vérification de la stabilité à la base du capteur.

3.5 Conclusion :

Trois capteurs ont été construits après avoir vérifié avec un prototype que la conception, telle qu'elle a été présentée, était correcte et le type de capteur adapté à la mesure de la reptation. La souplesse a encore été améliorée en choisissant des lames de 0.3 mm d'épaisseur au lieu de 0.5 mm.

Une interprétation correcte des mesures que ce type de capteur permet suppose de déterminer quelles sont les erreurs inhérentes aux mesures, à la procédure de dépouillement et enfin, quelle influence le cumul de ces deux types d'erreurs exerce sur la reconstitution des profils de déplacement.

CHAPITRE IV : ESTIMATION DE L'ERREUR SUR LES MESURES ET TEST DE LA PROCEDURE DE DEPOUILLEMENT.

Le capteur à jauges d'extensométrie permet d'effectuer des mesures de déformation des jauges à tout moment, et la procédure de dépouillement rend possible la reconstitution du profil de déplacement.

Il existe cependant un double niveau d'erreur, sur les mesures elles-mêmes et sur l'approximation du profil. Il importe de préciser cette erreur, inhérente à la méthode de mesure, pour ne pas interpréter des résultats qui ne seraient pas significatifs.

Trois types de tests complémentaires ont été effectués dans ce but :

- l'estimation de la précision des mesures réalisées avec la chaîne de mesure (capteur - boîtier - pont) a été effectuée en analysant la distribution statistique de plusieurs séries de mesures faites sans déconnecter, puis en déconnectant les éléments de la chaîne après chaque série,
- la qualité de l'approximation de la reconstitution des déplacements a été testée en générant à l'ordinateur des mesures simulant des courbes simples et en comparant les résultats obtenus par la procédure de dépouillement et les déplacements reconstitués en utilisant les relations trigonométriques,
- l'influence du cumul de ces deux types d'erreur a été également testée ; une erreur prélevée dans une série pseudoaléatoire de distribution connue a été ajoutée à des mesures générées à l'ordinateur et les résultats des dépouillements ont été comparés aux déplacements imposés.

La présentation de ces trois tests - réalisation et résultats - fait l'objet des trois paragraphes de ce chapitre.

4.1 Précision des mesures de déformations :

L'erreur sur les mesures de déformations est liée aux différents éléments de la chaîne de mesure. La précision du pont de mesure donnée par le constructeur est de $\pm 6 \mu\text{m/m}$; ce résultat est considéré comme acquis puisque le test du pont effectué à l'aide d'un simulateur de contraintes a donné des résultats nettement inférieurs (les écarts ne dépassaient pas $2 \mu\text{m/m}$). L'influence du capteur et du boîtier, ainsi que des connexions entre les différents éléments de la chaîne n'est pas connue a priori.

L'erreur inhérente à la mesure se compose en fait d'une erreur systématique et d'une erreur aléatoire. Toute éventuelle erreur systématique s'annule puisqu'on travaille toujours en différentiel. Aussi, seule l'erreur aléatoire a-t-elle été étudiée pour chacun des trois capteurs SCHILD1, SCHILD2 et SCHILD3, une fois insérés dans le sol.

En général, trois séries de mesures sont effectuées à chaque passage sur le site, sans déconnecter les éléments de la chaîne de mesure entre les trois séries. Cependant, après chaque passage, capteur, boîtier et pont doivent être déconnectés les uns des autres : les connexions sont protégées dans des boîtes étanches qui doivent être fermées et le pont ne peut être laissé sur le terrain.

C'est pourquoi on a effectué deux fois cinquante séries de mesures le même jour pour chacun des capteurs :

- en déconnectant les éléments de la chaîne après chaque série (AD),
- sans déconnecter les éléments de la chaîne entre les séries (SD).

La distribution des écarts par rapport à la moyenne a été analysée par type de série (AD ou SD) pour chaque capteur :

- les histogrammes de fréquence des écarts par rapport à la moyenne des mesures (fig. 4.1) construits pour chaque capteur (tous niveaux confondus) et pour les trois capteurs réunis montrent que les distributions sont de type gaussien, qu'il s'agissent des séries AD ou SD,
- les droites de Henry (fig. 4.2 , annexe 4.1) montrent bien la normalité des distributions compte tenu du nombre somme toute relativement faible des mesures ; celle-ci est particulièrement évidente pour les séries AD.

Les écarts type ont été calculés par type de série, pour chaque niveau et chaque capteur, pour chaque capteur, tous niveaux confondus et pour les trois capteurs réunis (tab. 4.1).

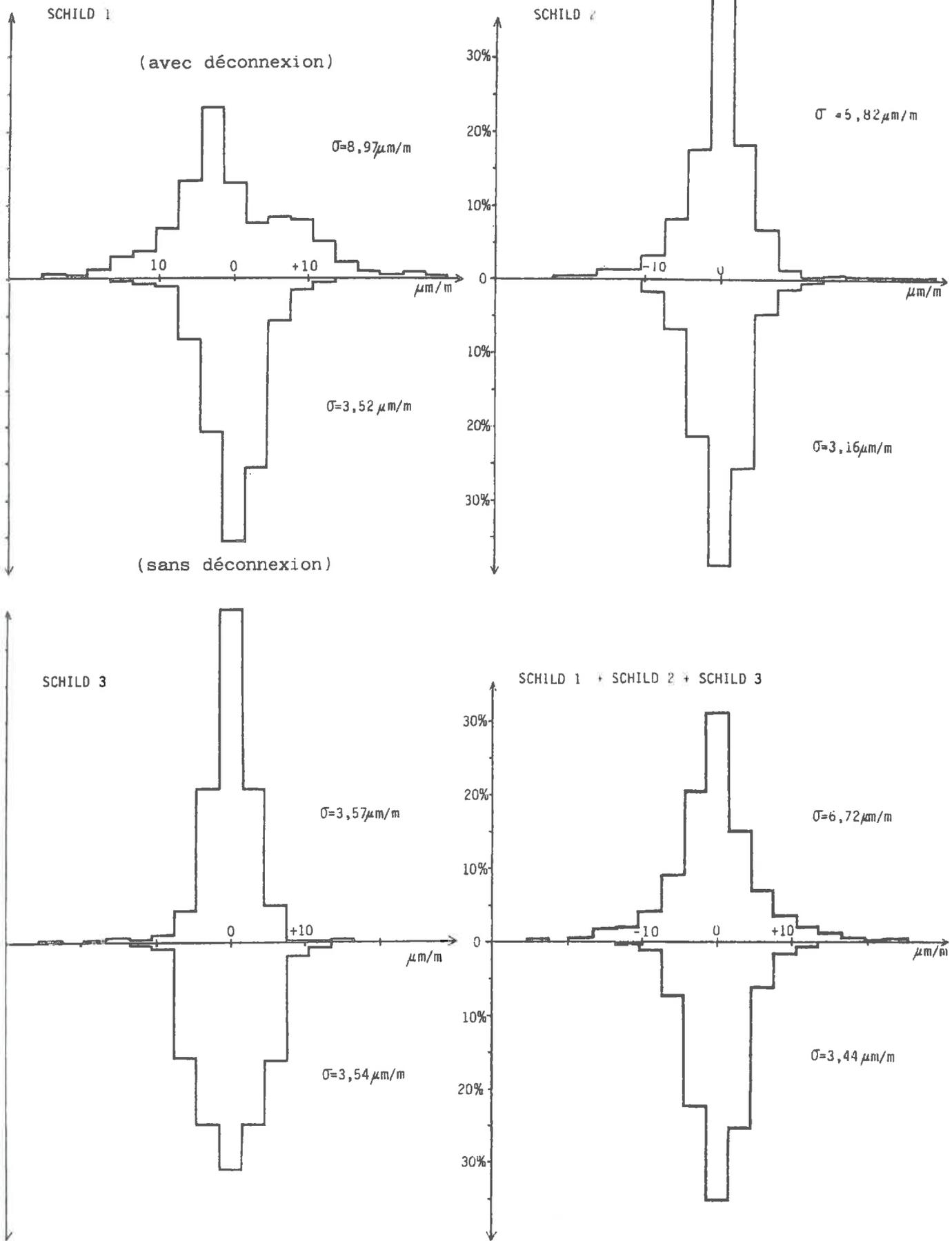


fig. 4.1 Histogrammes des écarts par rapport à la moyenne des mesures pour 50 séries de mesures effectuées avec chacun des 3 capteurs, et pour l'ensemble de ces 150 séries.

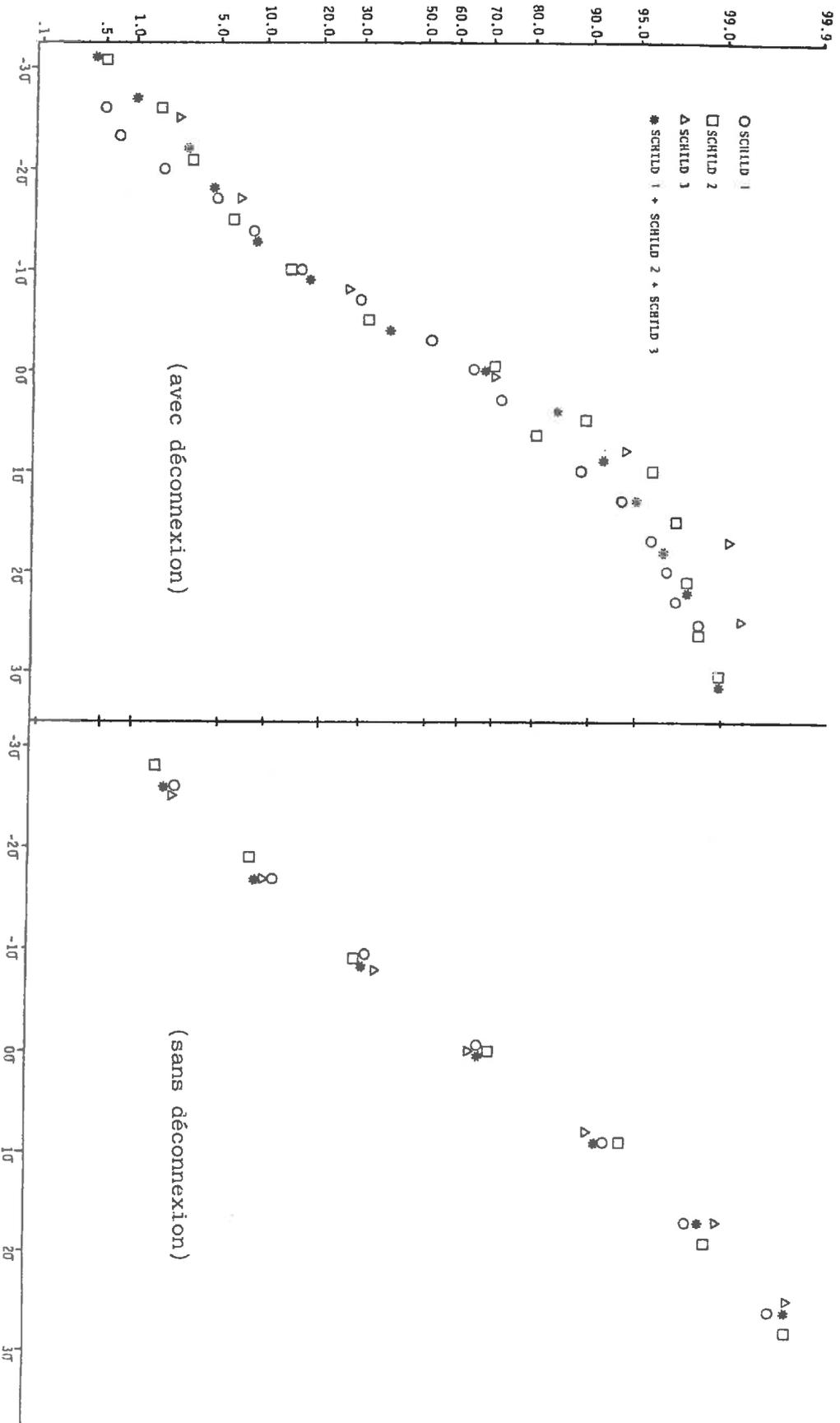


fig. 4.2 Droites de Henry des écarts par rapport à la moyenne des 50 séries de mesures effectuées avec chaque capteur et des 150 séries réunies.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	total
SCHILD1	SD	1.9	4.7	4.9	2.6	3.9	2.9	2.1	2.3	2.9	4.7	4.5	2.2	3.5
	AD	6.4	5.8	9.1	10.8	7.5	6.1	6.0	7.4	5.5	16.2	6.5	13.6	9.0
SCHILB2	SD	2.8	3.7	4.9	3.8	2.2	2.5	1.8	2.5	1.9	4.9	3.0	1.9	3.2
	AD	5.8	3.0	3.6	6.5	3.6	3.5	1.4	7.6	2.6	14.2	4.4	1.5	5.8
SCHILD3	SD	3.6	5.0	4.6	3.1	3.7	2.4	2.6	3.9	3.5	2.4	-	-	3.5
	AD	-	3.6	5.1	2.4	5.6	1.6	1.6	3.1	4.6	2.1	-	-	3.6
TOTAL	SD													3.4
	AD													6.7

tab. 4.1 Ecart type ($\mu\text{m}/\text{m}$) des écarts à la moyenne des mesures à chaque niveau, par capteur et pour les trois capteurs tous niveaux confondus établis à partir de 50 séries de mesures effectuées avec déconnexion (AD) et sans déconnexion (SD).

Ces écarts sont peu variables et faibles pour les séries SD. Ils sont par contre très variables selon les niveaux et les capteurs pour les séries AD ($1.4 < s < 16.2 \mu\text{m}/\text{m}$). Enfin, que l'on considère la totalité des mesures, les mesures par capteur tous niveaux confondus ou les mesures par capteur et par niveau, les écarts type sont inférieurs pour les séries SD ; les seuls niveaux qui font exception sont ceux dont les mesures présentent une distribution très resserrée autour de la moyenne quel que soit le type de séries.

Les parts d'erreur dues respectivement au pont de mesure et aux capteurs sont assez faibles, puisque, sans déconnexion, la dispersion des écarts est du même ordre de grandeur ($2s \approx 7 \mu\text{m}/\text{m}$) que la précision du pont indiquée par le constructeur.

La part d'erreur due aux connexions entre les éléments de la chaîne est par contre relativement importante, variable d'un capteur à l'autre et d'un niveau à l'autre.

L'erreur aléatoire est donc essentiellement due aux contacts de l'extrémité des câbles des jauges et de la connexion du boîtier de commutation : les soudures des contacts à l'extrémité des câbles ont dû être faites sur le site même pour les deux capteurs SCHILD1 et SCHILD2, les premiers mis en place. Par contre elles ont été faites au laboratoire, donc dans de bien meilleures conditions, pour le capteur SCHILD3. Ceci explique sans doute les écarts type nettement plus faibles obtenus pour celui-ci.

Ce test révèle le rôle essentiel de la qualité des connexions dans l'erreur aléatoire sur les mesures. Mais les conditions de terrain rendent ces connexions indispensables si on veut pouvoir utiliser le boîtier de commutation. En outre, il semble bien qu'elles pourront encore être améliorées.

4.2 Précision de l'approximation numérique du modèle de dépouillement :

La procédure de dépouillement consiste à effectuer en deux étapes une intégration numérique approchée de l'équation de la courbure , depuis la base jusqu'en surface. Une erreur est de ce fait introduite sur les déplacements.

Pour préciser l'importance de cette erreur, des courbes simples, composées d'un seul ou de deux arcs de cercle alternativement convexe et concave, ont été simulées en générant à l'ordinateur des mesures fictives de déformations. Les mêmes rayons de courbure sont simulés pour les deux types de courbes : 30, 15, 10, 7.5 et 6 m, correspondant respectivement à des déformations fictives, égales en module à chaque niveau, de 10, 20, 30, 40 et 50 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Les déplacements correspondants ont été reconstitués d'une part à partir des relations trigonométriques (fig. 4.3), d'autre part avec le modèle de dépouillement. Ils correspondent à des valeurs vraisemblables in situ, à ceci près qu'en général, la courbure n'est pas égale en module à chaque niveau.

La différence entre les déplacements obtenus de ces deux manières reste faible :

- dans le cas d'un arc de cercle unique, l'erreur augmente de la base vers le sommet (essai 1, annexe 4.2) quand les déformations augmentent également ; pour les essais effectués, elle est au maximum de -0.05 mm, soit dans ce cas une erreur relative de 0.2%, pour un capteur de 60 cm et un déplacement en surface de 25.3 mm ;

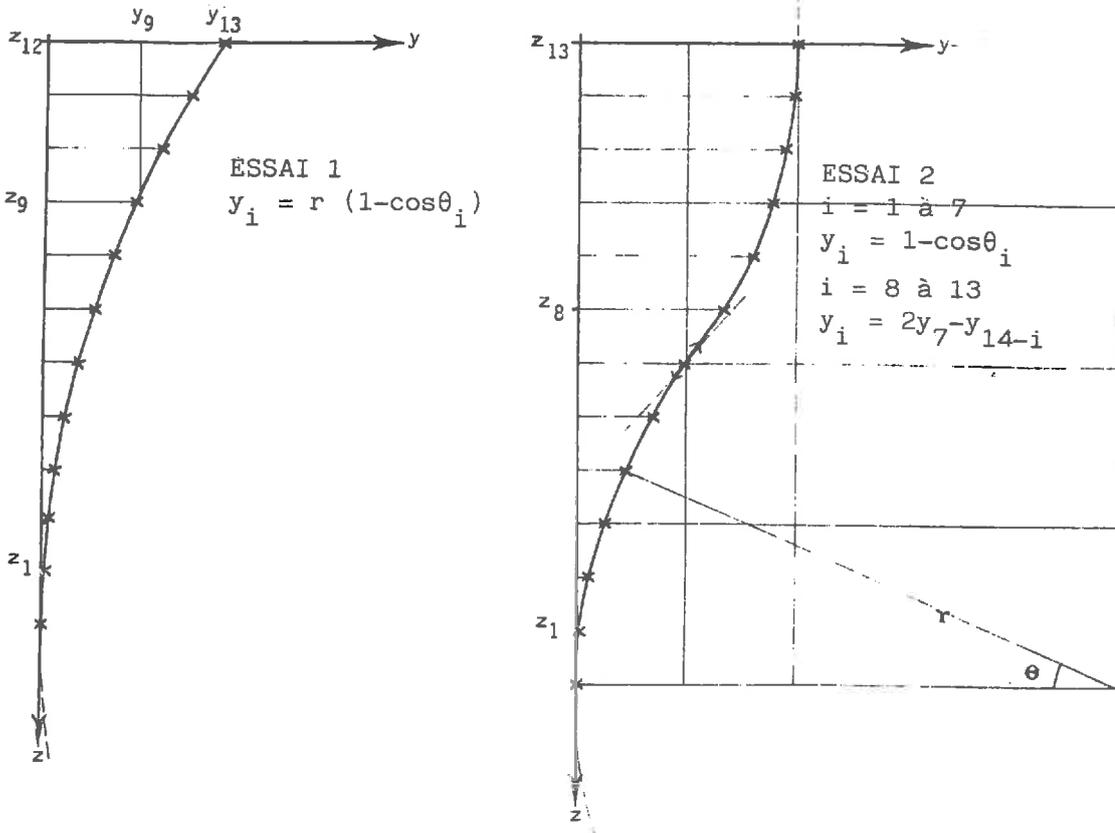


fig. 4.3 Reconstitution trigonométrique des courbes simulées.

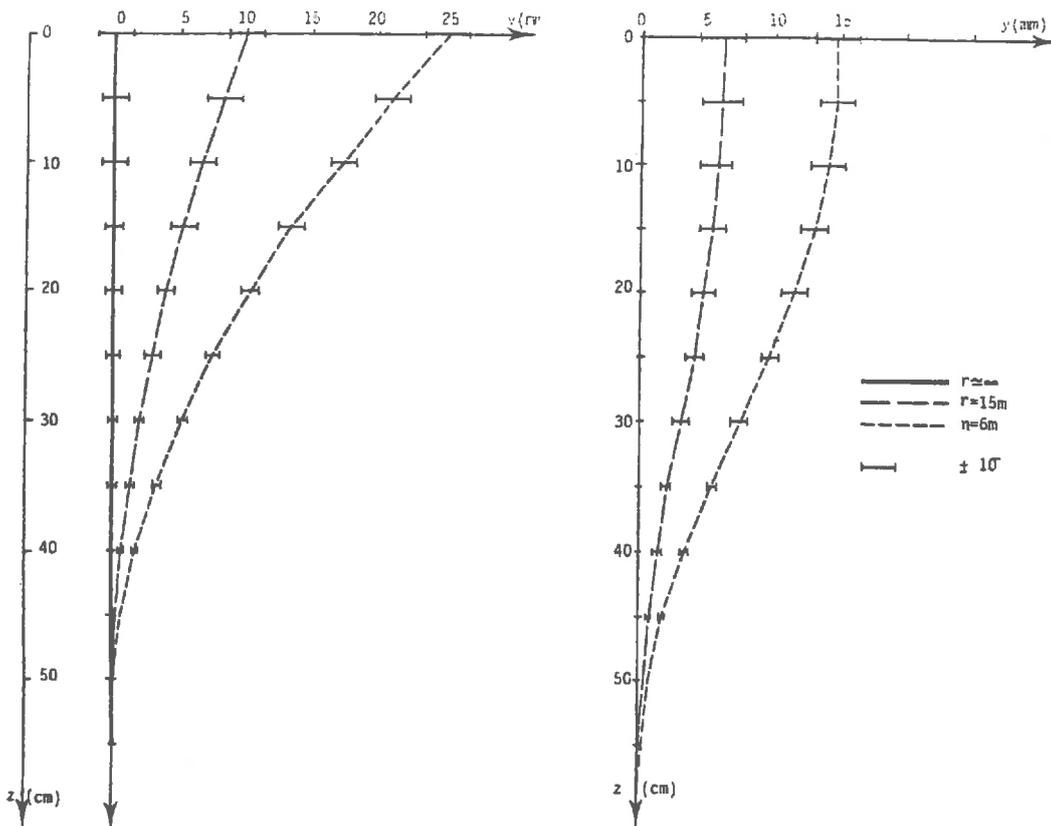


fig. 4.4 Influence des erreurs aléatoires des mesures de déformations sur la reconstitution de formes simples (erreurs prélevées dans une série pseudoaléatoire, $\sigma \approx 9 \mu m/m$).

- dans le cas de deux arcs de cercle alternativement convexe et concave, l'erreur augmente avec la courbure ; elle est maximale juste au-dessus du point d'inflexion (essai 2, annexe 4.2) ; pour les essais effectués, elle est au maximum de + 0.23 mm, soit dans ce cas une erreur relative de 2.9 %.

L'erreur imputable à la procédure de dépouillement est donc faible et la qualité de l'approximation semble suffisante si les points d'inflexion ne sont pas trop nombreux le long du profil.

4.3 Influence des erreurs de mesure et de la précision du modèle de dépouillement sur la reconstitution des déplacements :

Pour tester l'influence des erreurs de mesure sur les déplacements calculés, des erreurs prélevées dans une série aléatoire de moyenne nulle et d'écart type $\sigma \approx 9 \mu\text{m/m}$ (maximisation volontaire de l'erreur) ont été ajoutées aux déformations fictives du test précédent et à une déformation nulle à tous les niveaux (capteur droit).

Cent séries de mesures ont ainsi été générées pour chacun des deux types de courbes précédents et pour le capteur droit, permettant de calculer dans chaque cas cent profils de déplacements en utilisant la procédure de dépouillement et d'établir la moyenne et l'écart type des déplacements en chaque point de mesures fictifs.

Il ressort de ce test que les erreurs sur les déplacements ne sont pas liés aux formes : en effet, les écarts type sont les mêmes, quelle que soit la courbure et sont en fait dépendants du nombre de points de mesures : pour une erreur prélevée dans une distribution d'écart type $\sigma \approx 9 \mu\text{m/m}$, l'écart type des déplacements en surface est de 1.3 mm s'il y a 12 points de mesures, de 1.0 mm s'il n'y a que 10 points et de 0.6 mm s'il y en a 7 (fig. 4.4).

CHAPITRE V : VERIFICATIONS DU FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR.

L'objectif des vérifications a été de contrôler le fonctionnement du capteur dans son ensemble :

- de manière sommaire, sur des maquettes en bois représentant des profils déformés inspirés de la bibliographie, et ce pour chaque capteur construit,
- pour deux prototypes, dans un modèle réduit de versant conçu pour étudier la cryoreptation ; les conditions partiellement contrôlées sont plus proches de celles de l'utilisation pour laquelle le capteur a été conçu ; la déformation du profil a pu être suivie dans le temps.

5.1 Sur les maquettes en bois :

Trois maquettes différentes ont été utilisées . La maquette 1 est plate et sert à mesurer le déséquilibre initial des ponts de Wheatstone formés avec les deux jauges de chaque niveau et les résistances calibrées du pont de mesure . Les maquettes 2 et 3 ont une partie plane qui s'incurve progressivement : elles se différencient entre elles par la position du début de la flexion et son importance (fig. 5.1 et 5.2 ; annexe 5.1).

Chaque capteur a été appliqué sur les trois maquettes et maintenu par des morceaux de ruban adhésif à ses extrémités, en glissant sous la lame, entre les jauges, une pastille de caoutchouc d'épaisseur sensiblement équivalente aux protections butyl des jauges. Les mesures faites à chaque niveau ont permis de reconstituer les formes imposées connues.

Ce type de vérification est nécessairement sommaire : le mode d'application, la discontinuité et l'irrégularité des protections en pâte butyl (qui améliorent par ailleurs, en conditions réelles, le contact entre le sol et le capteur) ne permettent pas au capteur d'épouser parfaitement la forme en bois.

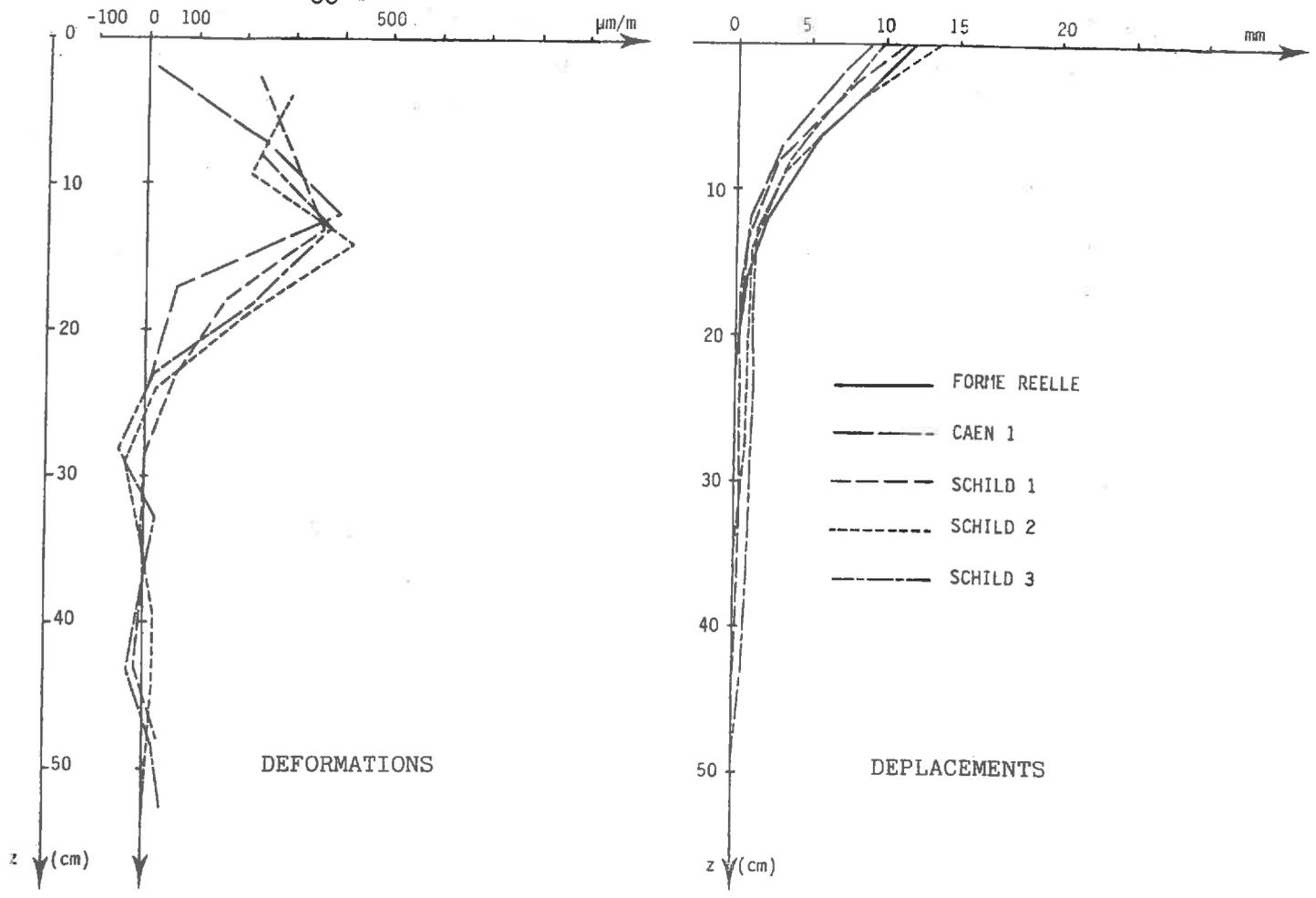


fig. 5.1 Profils de déformations et de déplacements établis sur la maquette 2 et forme réelle.

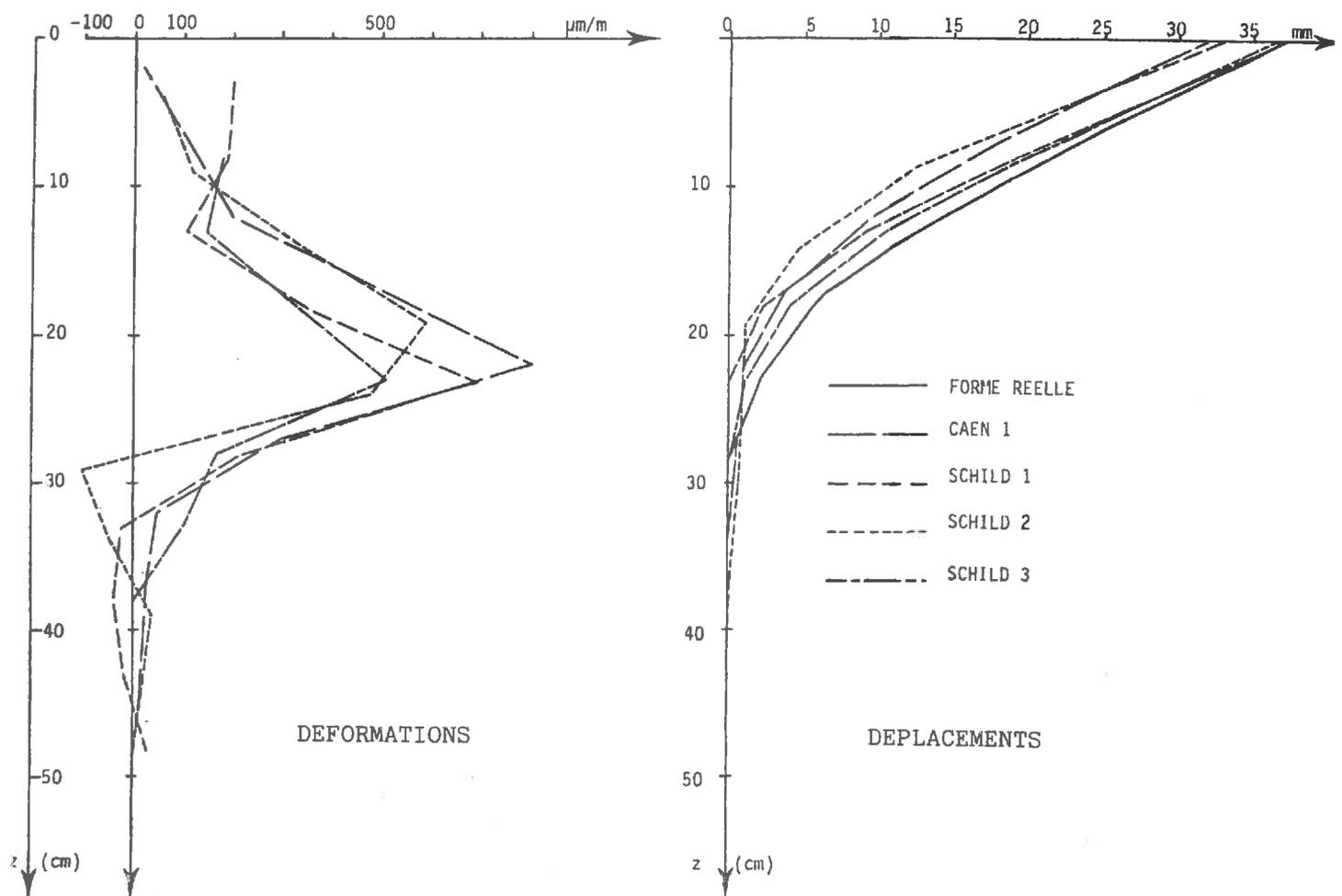


fig. 5.2 Profils de déformations et de déplacements établis sur la maquette 3 et forme réelle.

Les figures 5.1 et 5.2 représentent respectivement pour les quatre capteurs (CAEN1, SCHILD1, SCHILD2 et SCHILD3) sur les maquettes 1, 2 et 3 :

- les profils de déformations mesurées des jauges,
- la forme réelle de la maquette,
- la forme reconstituée à partir de ces mesures avec le modèle de dépouillement.

Bien que les points de mesure de chaque capteur se situent à des niveaux différents, pour une même maquette, les profils de déformations ont tous la même allure et les variations à chaque niveau sont du même ordre de grandeur.

Les déplacements ne sont pas très bien reconstitués ; ceci est dû aux problèmes de maintien de la lame et de précision des maquettes. Par contre, la forme globale des profils de déplacements correspond bien au profil imposé par la maquette.

En remplaçant les formes moyennes, reconstituées à partir de cent profils de déformations générés en rajoutant une erreur prélevée dans une série de nombres pseudoaléatoires de moyenne nulle et d'écart type $\sigma \approx 9 \mu\text{m/m}$ (mêmes conditions que le test décrit à § 4.3), dans leur intervalle de confiance (cf. annexe 5.2), on constate que les résultats obtenus avec la forme 2 sont corrects puisque la différence avec la forme réelle est comprise entre 1 et 2σ .

5.2 Dans le modèle réduit de versant :

Un modèle réduit de versant a été construit au Centre de Géomorphologie du C.N.R.S. à Caen pour étudier les phénomènes de cryoexpulsion et de cryoreptation (VAN VLIET-LANOE et COUTARD, 1984). Des lentilles de glace de ségrégation se forment lors du gel et croissent avec l'abaissement de la température, absorbant l'eau disponible ; lors du dégel, le matériel soulevé s'affaisse sur place et, sur pente, se déplace légèrement vers l'aval. Les déplacements superficiels observés sont de l'ordre du centimètre par cycle de gel-dégel (trois semaines environ).

Le modèle a été réalisé dans une cuve de 5m x 5m. Un versant y a été reconstitué sur une base de limon tassé recouverte par cinq centimètres de sable servant au drainage (fig. 5.3). Il comprend quatre bandes juxtaposées latéralement dans le sens de la pente et composée de matériaux différents : limoneux, limono-sableux, hétérométrique, limono-argileux. L'épaisseur de ces bandes est de 30 à 35 cm. La pente moyenne est de 12° et passe à 4° à l'aval. Le modèle est soumis à des cycles de gel-dégel une cloche est adaptée sur la cuve et le gel est produit par un courant d'air froid en surface ; le dégel est obtenu en enlevant la cloche et en laissant le modèle à température ambiante, sans chauffage.

Deux cycles de gel-dégel ont été suivis, chacun avec un capteur différent (CAEN1 et SCHILD3) . les capteurs ont été insérés en bas de versant, juste en amont de la rupture de pente le premier dans la bande limoneuse, le second dans la bande limono-sableuse. Leur épaisseur respective était de 0.5 et 0.3 mm.

Le modèle a été mis en gel le lendemain de l'insertion des capteurs. Les mesures n'avaient pas évolué au cours de la nuit : le matériel, très homogène, n'est pas difficile à reconstituer et la stabilisation peut être considérée comme presque immédiate.

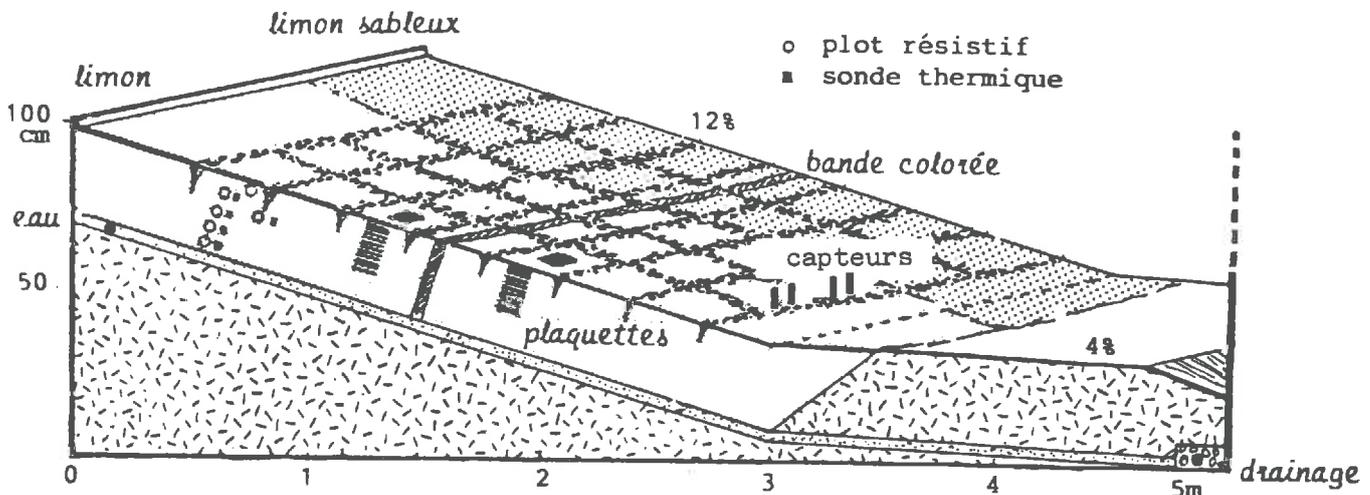


fig. 5.3 Le modèle réduit de versant du Centre de Géomorphologie de Caen (in VAN VLIET-LANOË et COUTARD, 1984)

Les caractéristiques essentielles des deux cycles sont :

	cycle 1	cycle 2
nombre de jours de gel	11	9
épaisseur de sol gelé au retrait de la cloche	35 cm	≈ 25 cm
température ambiante du hall au cours du dégel	≈ 10°C	≈ 15°C
nombre de jours jusqu'à ce que le sol soit à peu près dégelé jusqu'au sable	7	5
humidité estimée lors de la mise en gel	forte	très forte
gonflements observés autour du capteur à l'ouverture de la cloche (début du dégel)	1-2 cm	5-6 cm

Au début et à la fin de chaque cycle, la position d'un repère en amont du capteur (bord d'un polygone strié) ainsi que la position du point de sortie des lames ont été mesurées à l'aide d'un fil à plomb et par rapport à un fil tendu en travers du modèle (précision estimée à ± 1 mm). Pendant le dégel, cela n'a pas été possible à cause des gonflements et aussi pour ne pas toucher les lames.

La progression du front de gel a été suivie à l'aide de thermosondes platine placées dans le modèle à différentes profondeurs, dans la partie amont du versant pour le premier cycle (sondes fixées lors de la construction) et à proximité du capteur lors du second. La progression du dégel a été suivie de la même manière, en enfonçant périodiquement une fine tige métallique pour contrôler l'épaisseur dégelée.

Des mesures de déformations ont été effectuées au moins une fois par jour lors de la mise en gel et plus fréquemment, toutes les deux ou trois heures, pendant le dégel.

Les déplacements mesurés en fin de cycle en surface sont :

	cycle 1	cycle 2
repère en amont	+ 8 mm	+ 17 mm
extrémité des lames	+ 9 mm	+ 18 mm

Pour chaque cycle, l'écart entre les deux mesures est inférieur à la précision de la mesure (± 1 mm) : les lames des capteurs ont donc bien suivi le déplacement du sol.

La différence d'efficacité entre les cycles est liée à la différence entre les gonflements observés. Les gonflements plus importants lors du second cycle sont dus à la très forte humidité.

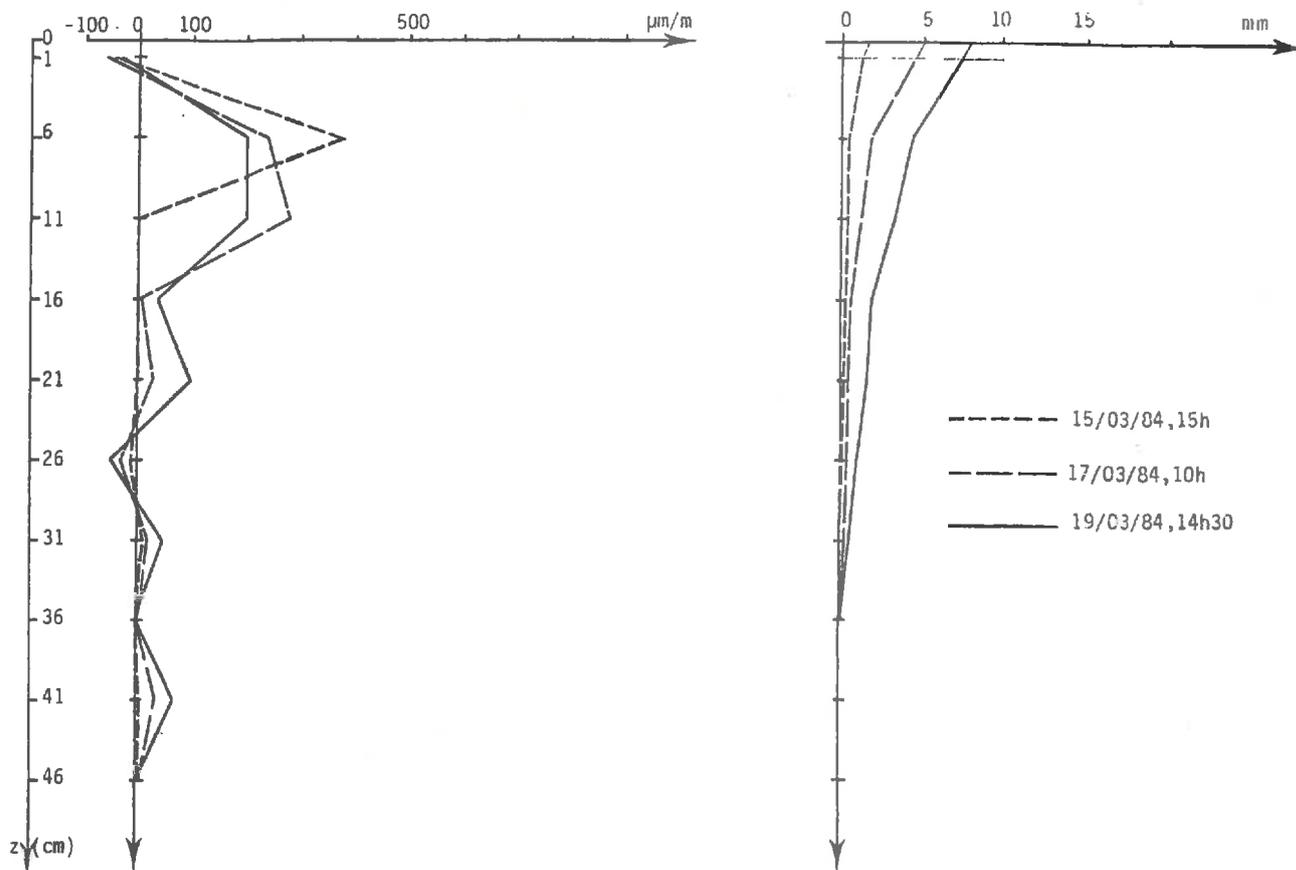


fig. 5.4 Profils de déformations mesurées et de déplacements calculés à trois moments du dégel - 1er cycle, capteur CAEN1.

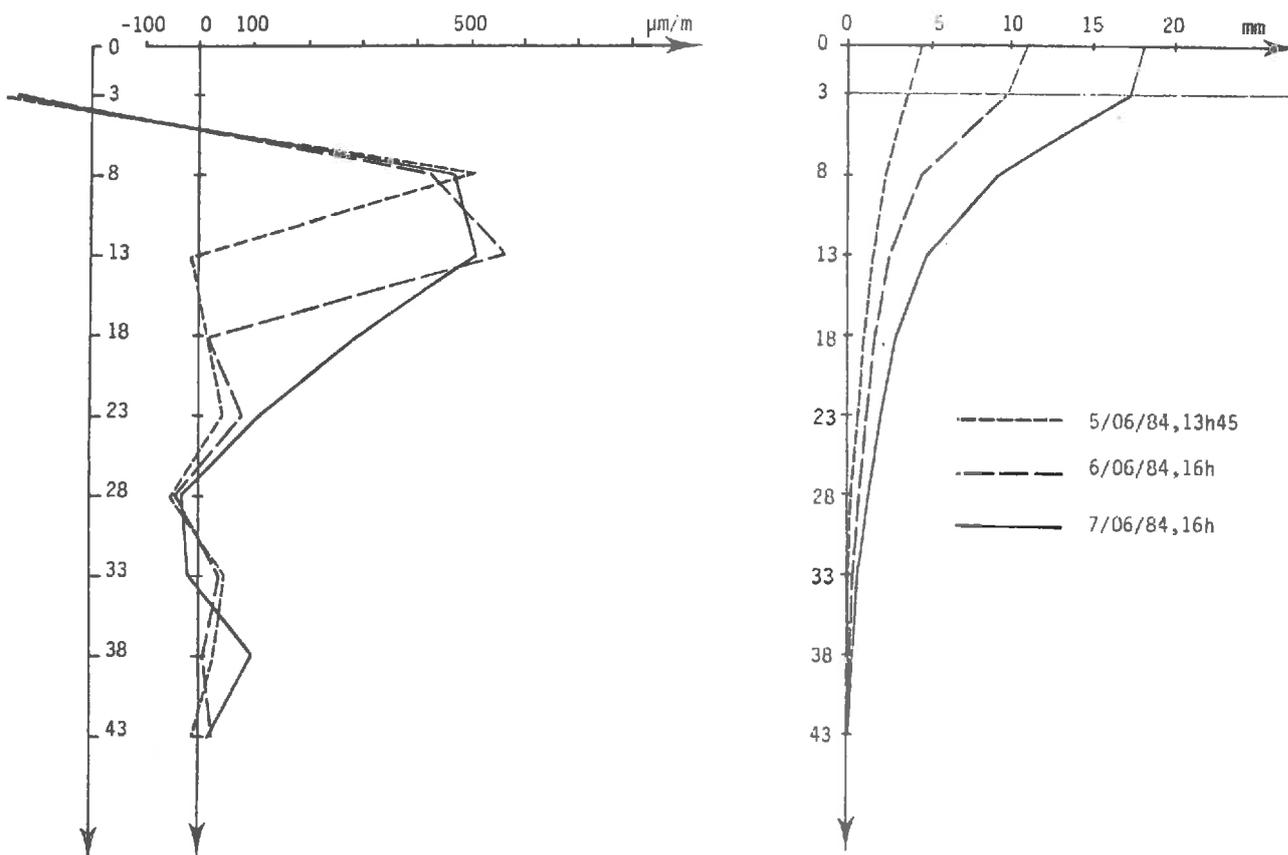


fig. 5.5 Profils de déformations mesurées et de déplacements calculés à trois moments du dégel - 2ème cycle, capteur SCHILD3.

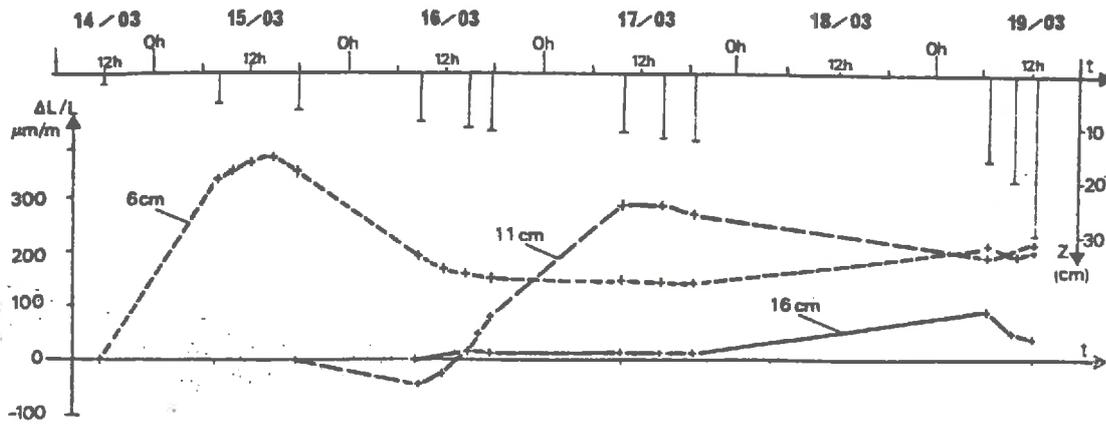


fig. 5.6 Evolution des déformations mesurées à trois niveaux pendant le dégel et de l'épaisseur Z de sol gelé.

Les déplacements calculés à partir des mesures de déformations avec le modèle de dépouillement sont :

- + 7.5 mm à 1 cm de profondeur pour le premier cycle,
- + 17.4 mm à 3 cm de profondeur pour le second cycle.

En extrapolant jusqu'en surface la tangente au dernier point de mesure, le déplacement est de + 8.1 mm pour le premier cycle. Pour le second, la même extrapolation ne peut être faite car la partie aérienne de la lame était presque verticale : le déplacement en surface doit être du même ordre de grandeur qu'à 3 cm de profondeur.

Ces déplacements reconstitués sont très proches de ceux mesurés en surface. Le capteur et le modèle de dépouillement ont ainsi permis de reconstituer convenablement le déplacement de l'extrémité des lames.

En outre, les mesures effectuées ont permis de suivre l'évolution des déplacements du sol le long du profil (fig. 5.4, 5.5 ; annexe 5.3). L'allure de la déformation du profil est continue : s'il y avait eu une rupture ou un plan de cisaillement marqué, même entre deux points de mesure, le déplacement reconstitué en surface ne serait pas aussi proche de celui mesuré. L'évolution au cours du dégel a de plus montré que la déformation du capteur - et donc du profil de sol - est en relation étroite avec la position du front de dégel : s'il y a flexion en un point du capteur, cette flexion commence au passage du front. La déformation est maximale lorsque le front se situe au niveau du point de mesure : la courbure atteint alors son maximum à ce niveau et diminue ensuite avec la descente du front et de la base de la flexion (fig. 5.6).

Tout se passe comme si, à la fonte des lentilles de glace, le matériel soulevé s'affaissait en glissant légèrement vers l'aval ; les lentilles en fondant seraient ainsi à l'origine de multiples et très petits plans de cisaillement.

L'évolution des profils de déplacements reconstitués avec le capteur semble tout à fait cohérente avec ce que l'on sait de la cryoreptation (VAN VLIET-LANOE, 1985 a,b).

Les tests effectués ont permis de définir la précision des mesures réalisées avec le capteur et les limites de la procédure de dépouillement.

Compte tenu des vérifications faites dans le versant modèle réduit, le capteur mis au point semble bien adapté à la mesure et au suivi de la déformation des profils de sol soumis à la reptation.

Trois de ces capteurs ont donc été installés en un site forestier également équipé pour suivre les profils hydriques et thermiques du sol dans le but de mettre en relation les déplacements par reptation avec les évènements microclimatiques et leur succession.

TROISIEME PARTIE : APPLICATIONS ET RESULTATS.

INTRODUCTION

Au site de Schildmatt, le suivi simultané des déplacements par reptation, des conditions climatiques et des conditions hydriques et thermiques du sol au cours de la période de novembre 1984 à juillet 1985 permet de mettre en évidence des relations entre des situations climatiques particulières et les déplacements qui ont été observés.

Avant de présenter ces résultats, il importe de caractériser le site et la période au cours de laquelle les mesures ont été effectuées.

CHAPITRE VI : LE SITE DE SCHILDMATT ET SON EQUIPEMENT.

Le site de Schildmatt est situé dans le bassin versant de la Petite Fecht du Nord (commune de Soultzeren, Haut-Rhin), dans la partie méridionale des Vosges centrales cristallines, à 1200m à l'Est de la ligne de crête principale. Il se trouve à 950 m d'altitude, dans le vallon du Missen, à mi-pente sur le versant exposé au Nord. Le sous-bassement est constitué par une arène granitique, recouverte d'une formation de gélifluxion sur laquelle s'est développé un sol brun ocreux. Le versant est couvert d'une forêt de résineux (épicéas et sapins) mêlés de quelques hêtres. La pente très variable localement, a une allure rectiligne à la hauteur du site ; elle est de l'ordre de 20° (fig. 6.1).

L'objectif de l'équipement de ce site est d'étudier, à l'échelle stationnelle, la reptation en relation avec les conditions hydriques et thermiques du sol. Un seul site a été retenu car le capteur utilisé pour mesurer la reptation est encore au stade expérimental. D'autre part, il a semblé préférable, dans un premier temps, de concentrer les investissements en temps et en crédits pour développer le plus possible ce site, en l'équipant de manière à avoir de nombreuses mesures, éventuellement redondantes, tant des conditions hydriques et thermiques du sol que de la reptation.

Après la justification du choix du site, celui-ci sera présenté dans son cadre spatial. Le climat de la période sur laquelle porte plus particulièrement ce travail (novembre 1984 à juillet 1985) sera globalement replacé dans le contexte climatique général. Enfin, l'équipement du site sera décrit.

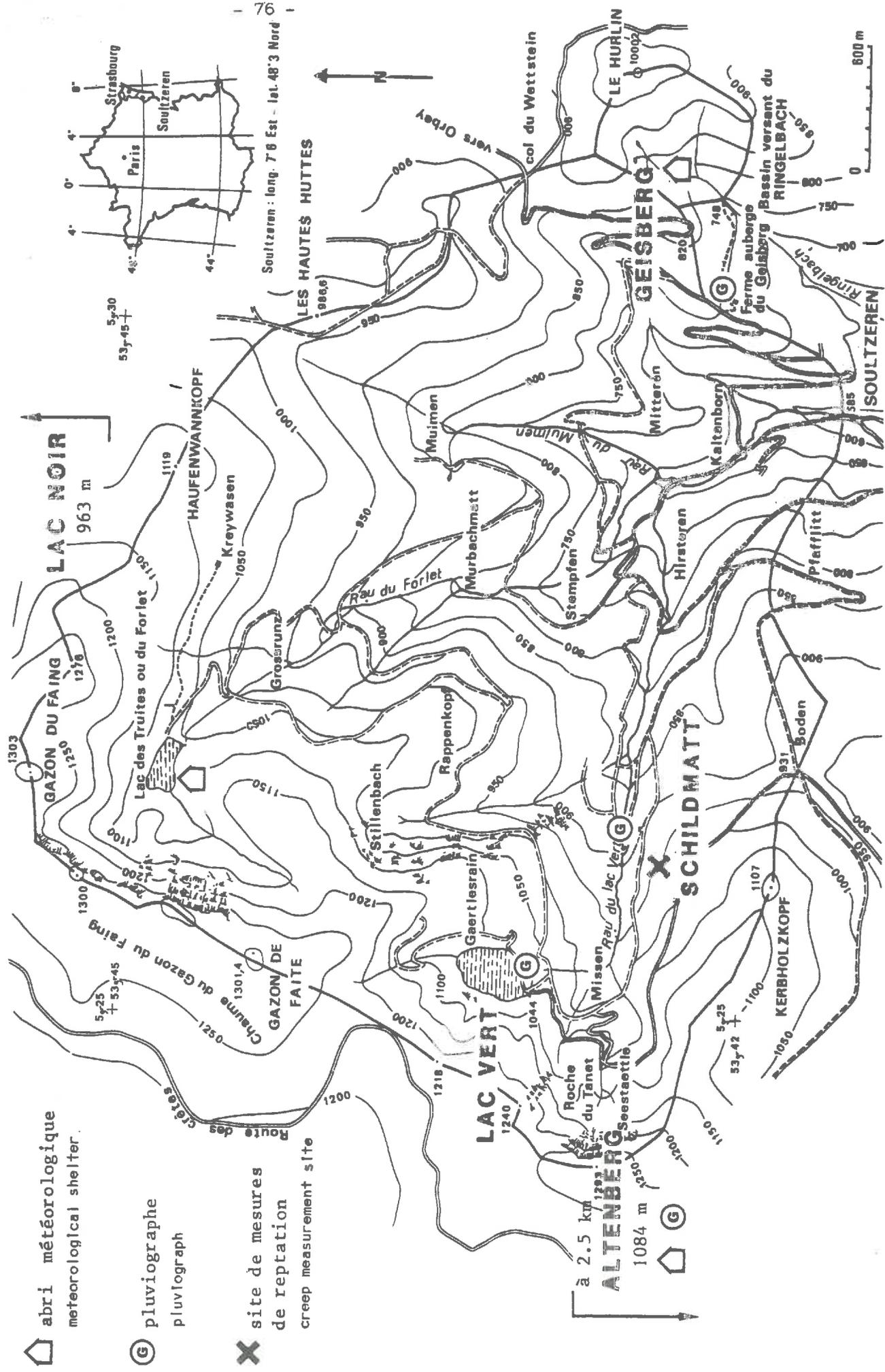


fig. 6.1 Bassin versant de la Petite Fecht à Soultzeren : Carte de localisation du site de Schildmatt et des équipements climatologiques cités dans le texte.

6.1. Choix du site :

Le nouveau site de Schildmatt jouxte l'un des trois sites retenus par GEISSERT (1981) et, à sa suite, par AUZET (1982). Cet ancien site avait été trop piétiné en dehors des périmètres protégés pour y insérer les nouveaux capteurs.

La forme des troncs, les accumulations généralisées en amont des obstacles, le microclimat désignaient ce versant comme un lieu effectif de reptation liée aux conditions hydriques, ce que confirmaient les mesures effectuées à l'ancien site. De plus, le chevelu racinaire, peu dense dans les premiers centimètres de sol en ce site forestier, ne peut guère opposer de résistance aux déplacements.

En outre, l'expérience avait montré que cette partie du versant était peu perturbée par le passage du gibier et par conséquent des chasseurs ; légèrement en retrait des sentiers, il n'attire pas non plus l'attention des promeneurs. Depuis l'été 1979, où il avait été créé, l'ancien site n'a jamais fait l'objet d'actes de vandalisme alors qu'un autre site forestier a été saccagé et totalement détruit. Compte tenu de l'investissement important en temps et en crédits, ces éléments ont nettement pesé dans le choix de ce site plutôt que d'un autre.

Si l'éloignement (120 km de Strasbourg) et l'accessibilité difficile en hiver constituent un handicap, surtout pour suivre de façon précise les événements climatiques, il est largement compensé par l'abondance des informations déjà disponibles (cf. ERA 569 CNRS, 1982) : de nombreux travaux ont été effectués dans le bassin versant de La Petite Fecht, permettant de disposer d'un grand nombre de données (géologiques, géomorphologiques, pédologiques, climatiques et hydrologiques) de qualité connue.

Le versant et le site semblent représentatifs de milieux où se produisent des déplacements par reptation (JAHN A., communication orale). La formation et le sol eux-mêmes correspondent à un type très répandu sur les versants de moyenne montagne : si leur hétérogénéité complique et limite les investigations possibles, elle représente par contre l'intérêt de correspondre à des conditions naturelles fréquentes.

6.2 Présentation du site

6.2.1 Le cadre géomorphologique :

Le site de Schildmatt, à 950 m d'altitude, se trouve à mi-versant, à 200 m du fond du vallon du Missen. Celui-ci, descendant du Rocher du Tanet, s'encaisse rapidement : les versants sont relativement raides, avec des pentes de l'ordre de 20°, et la distance entre les deux crêtes, de part et d'autre du vallon est de 1200m au niveau du site.

Le sous-bassement rocheux est constitué par le granite du Lac Vert, à grain moyen de 1 à 2 mm, à biotite et à muscovite (SCHWEBEL, 1982).

Au quaternaire, le fond du vallon a été englacé ; les versants, pour leur part, ont été essentiellement façonnés par les actions périglaciaires (VOGT, 1982). Des formations enrichies en limons (20 à 30% de la matrice fine) et chargées de blocs anguleux recouvrent l'arène ou la roche en place, comme sur la plupart des versants du bassin de la Petite Fecht. La persistance de conditions favorables à la microgélifraction, responsable de l'enrichissement en limons par rapport à l'arène a ainsi favorisé la gélifluxion qui a véhiculé cailloux et blocs provenant de la macrogélifraction des chicots rocheux (OH,1985). Suivant leur position sur le versant, ces formations ont été plus ou moins lavées lors de la fonte du glacier du Lac Vert.

Les sols qui se sont développés sur ces formations sont acides et vont de la série des bruns ocreux à celle des podzols (AMIET, 1980). Le climat océanique de montagne, humide et frais, à brouillards fréquents, a favorisé le développement des espèces comme le hêtre et le sapin.

Le groupement forestier sur le versant est la hêtraie sapinière à luzule, à canche et à myrtille (RUFFRAY, 1982). Il s'agit d'une sapinière (*Abies alba*) très pauvre en hêtres (*Fagus sylvatica*) où des épicéas (*Picea excelsa*) ont été introduits. La strate herbacée, discontinue sur le site, est très pauvre en espèces. Elle est dominée par la canche flexueuse (*Deschampsia flexuosa*) et la myrtille (*Vaccinum myrtillus*). En outre, les fougères sont relativement nombreuses. La luzule (*Luzula albida*) est peu présente sur le site même, mais abondante en aval.

L'activité biologique ne semble pas très importante : si on trouve des déjections d'enchitréides dans la litière et le premier horizon (annexe 6.2), nous n'en avons jamais vu sur le terrain en creusant des fosses. D'autre part, les trous de mulôts sont exceptionnels.

6.2.2 Formation superficielle et sol :

La formation de gélifluxion a 1 m d'épaisseur au niveau du site. Le sol brun ocreux, de texture limino-sableuse (annexe 6.1) développée sur cette formation comporte cinq horizons : A_1 (0-10 cm), A_1/B_h (10-18 cm), B_h (18-60 cm), B_s (60-100 cm), C (>100 cm). Sa rétention hydrique et sa conductivité hydraulique, lorsqu'il n'est pas saturé, sont faibles. Son comportement mécanique est difficile à estimer compte tenu de l'hétérogénéité du matériel et de la forte teneur en matière organique.

Caractéristiques physiques

L'analyse des caractéristiques texturales confirme la limite entre la formation de gélifluxion et l'arène : les courbes cumulées (fig. 6.2) et les profils granulométriques (fig. 6.3) montrent un enrichissement en limons, particulièrement en limons grossiers (20 à 50 microns) pour les échantillons prélevés à une profondeur inférieure à 1 m (cf. annexe 6.1). Les éléments grossiers, de taille supérieure à 2 mm, sont abondants dans tout le profil, constituant 20 à 45 % du matériel.

La différenciation avec l'arène est donc relativement nette. Cette séquence convoi à blocs sur arène correspond à celle décrite pour des dépôts mis en place dans des conditions périglaciaires sur des versants de massifs anciens (GODARD, 1975 ; PINCZES, 1978).

Le sol brun ocreux développé sur cette formation ne retouche que faiblement les caractéristiques granulométriques héritées. Les éléments grossiers (minéraux et organiques supérieurs à 2 mm) sont abondants dans tout le profil. Les horizons A_1 et A_1/B_h sont riches en argile, cette fraction pouvant atteindre 10 % de la matrice fine (inférieurs à 2 mm).

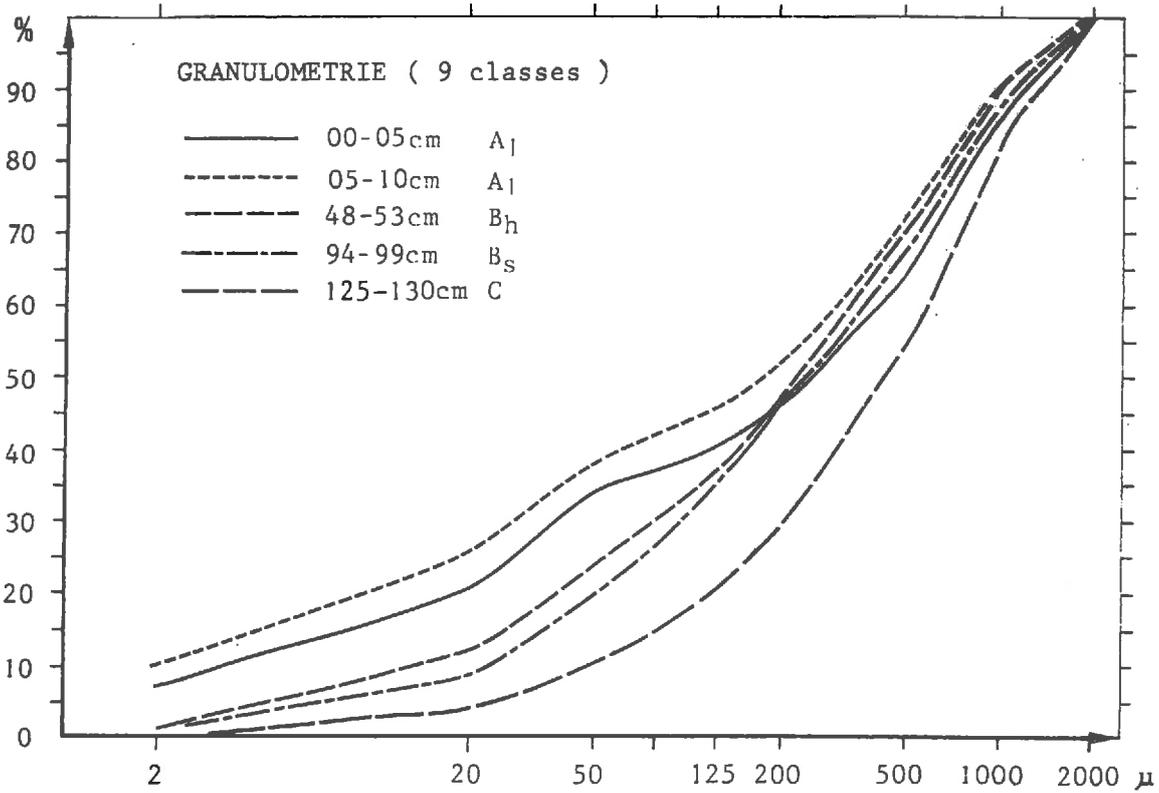


fig. 6.2 Courbes granulométriques cumulées de la fraction fine (<2mm) d'échantillons prélevés dans les différents horizons au site Schildmatt.

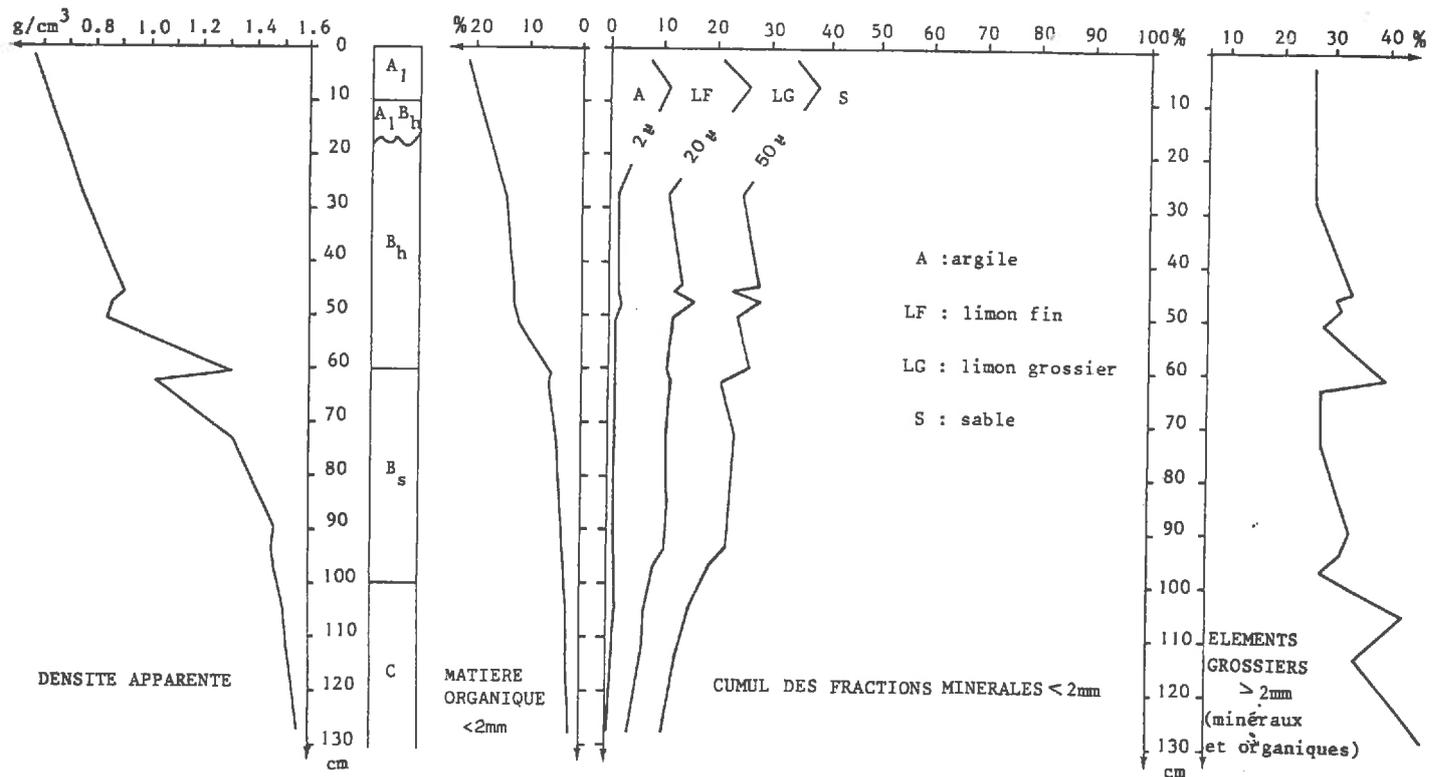


fig. 6.3 Caractéristiques physiques du sol au site de Schildmatt.

Cet enrichissement est probablement lié à la forte teneur en matière organique fine : supérieure à 10 % dans ces deux horizons, elle peut atteindre 40% juste sous la litière (GEISSERT, 1981 ; VIVILLE, MONNON, résultats non publiés. Ces teneurs sont encore de l'ordre de 10 % vers 50 cm et de 3 à 6 % jusqu'à 1 m de profondeur.

Le profil de densité apparente (fig. 6.3), relativement continu et décroissant de la profondeur vers la surface, est essentiellement lié aux teneurs en matière organique qui sont responsables des très faibles valeurs (0.6 à 0.8 g/cm³) dans les horizons de surface. Cette abondance de matière organique dans le profil est probablement due à un type de mise en place par aggradation à partir de la surface.

Les résineux fournissent l'essentiel d'une litière épaisse, pouvant atteindre 7 cm. En plus des aiguilles, on y trouve des feuilles de hêtres, des graminées, des spores et de nombreuses racines rougeâtres, riches en tanin. L'analyse d'un monolithe de sol imprégné de résine et de lames minces taillées dans celui-ci (annexe 6.2, VAN VLIET-LANOE, résultats communiqués) montre un engorgement saisonnier en surface et révèle une reptation de la litière sur l'horizon de surface.

La composition du sol, marquée par les proportions importantes de matière organique, surtout dans les horizons A, et d'éléments grossiers dans tout le profil en conditionnent le comportement.

Caractéristiques hydrodynamiques

Les propriétés hydrodynamiques (rétention hydrique $\psi(\theta)$, conductivité hydraulique $K(\theta)$), des formations superficielles et des sols caractérisent l'aptitude de ces milieux poreux à retenir ou à transmettre l'eau selon leur état hydrique ou énergétique. Ces propriétés contrôlent les processus de redistribution des précipitations au niveau du sol (évapotranspiration, ruissellement, infiltration) et jouent de ce fait un rôle important dans tous les processus dont la teneur en eau est un élément déterminant.

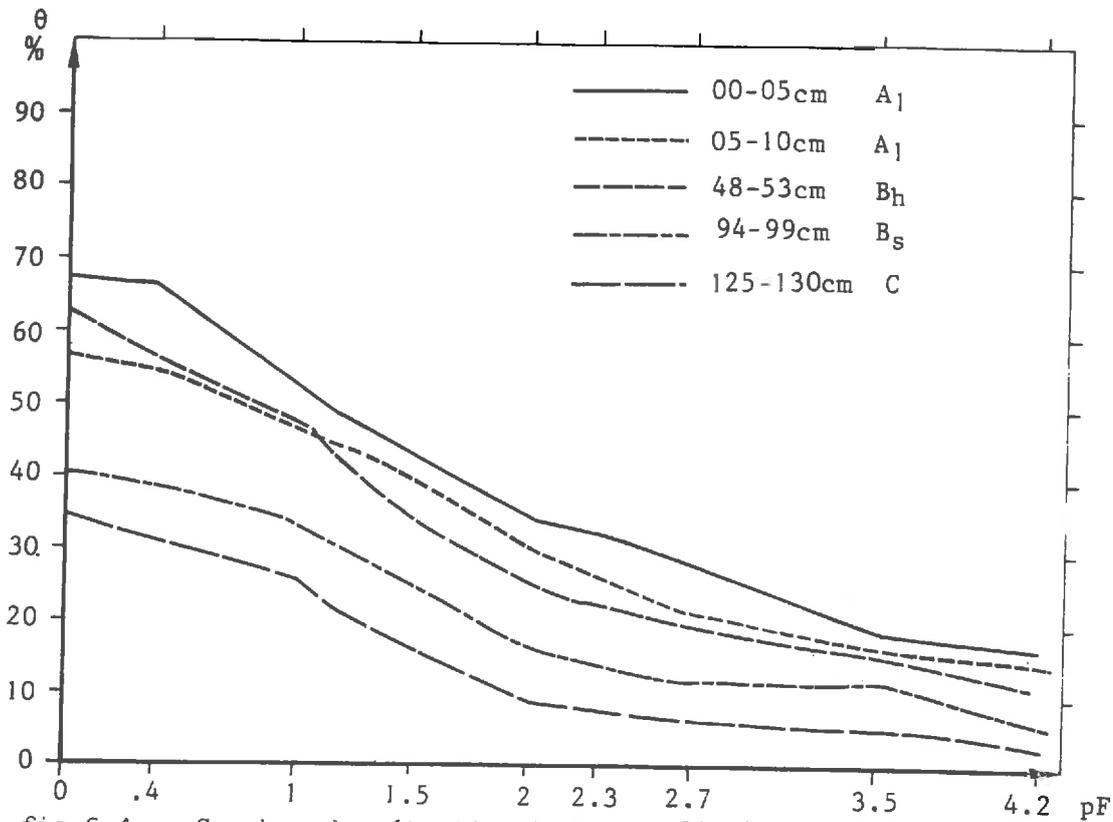


fig 6.4 Courbes de rétention hydrique $\theta(pF)$ établies en désorption pour le site de Schildmatt.

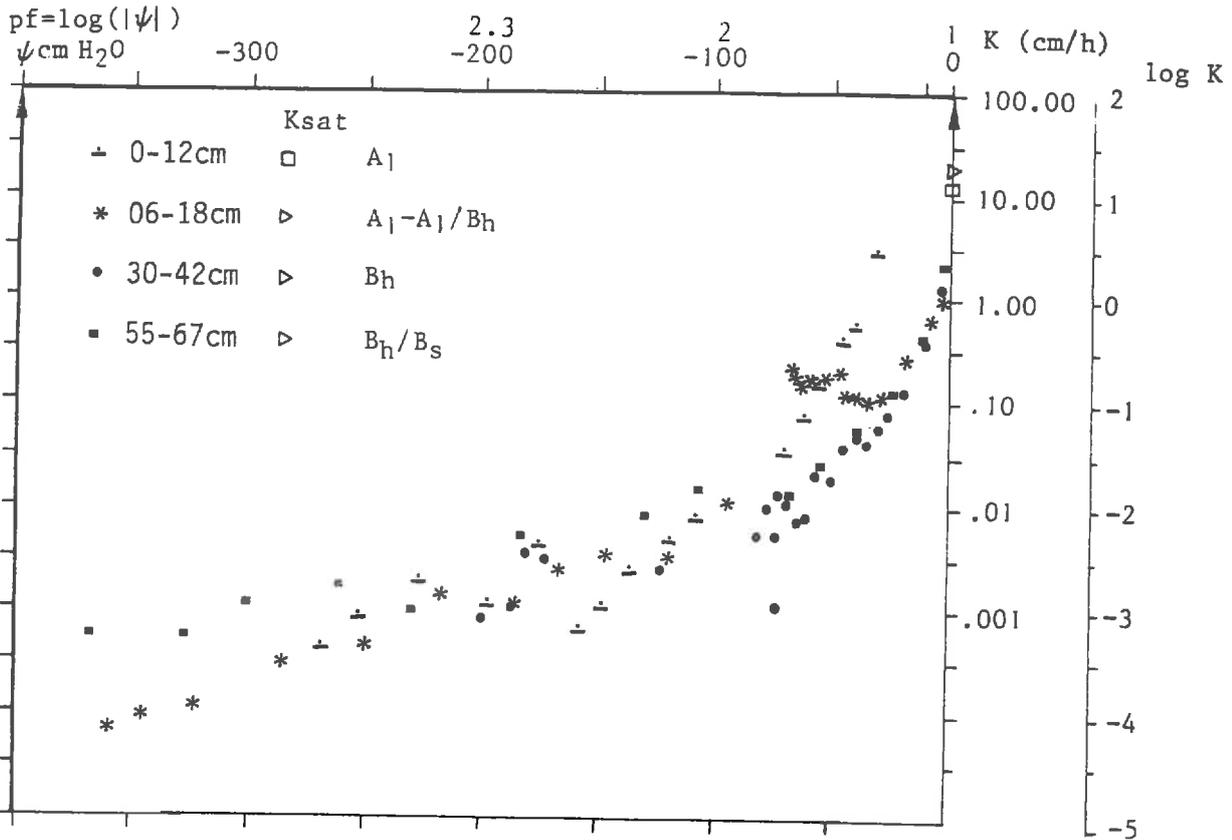


fig. 6.5 Courbes de conductivité hydraulique $K(\psi)$ établies en désorption pour le site de Schildmatt.

Il existe entre la teneur en eau volumique (θ) du sol et son état énergétique exprimé par la tension hydrique (ψ) une relation phénoménologique d'état, qu'exprime la courbe de rétention hydrique ou courbe de pF. Cette relation, affectée par une certaine hystérésis, exprime l'influence de la structure, de la porosité, de la distribution des pores et de l'adsorption sur l'état de l'eau du sol (HILLEL, 1974).

Les courbes de rétention hydrique (fig. 6.4) ont été établies par D. VIVILLE en désorption sur des bacs à sable et à kaolin (VIVILLE et AMBROISE, 1982) pour 18 échantillons, prélevés dans la même fosse à proximité du site. Leur différenciation correspond à celle des horizons pédologiques.

Les rétentions de ces différents horizons sont décalées les unes par rapport aux autres : à pF équivalent, les teneurs en eau volumique sont nettement plus fortes dans les horizons de surface. Les horizons B se distinguent entre eux surtout aux faibles valeurs de pF, inférieures à 2 : les teneurs en eau sont, en effet, plus fortes dans l'horizon B_h en raison de sa teneur en matière organique plus élevée (< 10 % dans l'horizon B_h et 3 à 5 % dans l'horizon B_s). La rétention de l'horizon C arénique est systématiquement plus faible, quel que soit le pF.

Les relations $K(\theta)$ et $K(\psi)$ entre la conductivité hydraulique K du sol et la teneur en eau volumique θ ou la tension hydrique ψ sont fortement non linéaires. Leur connaissance est nécessaire à la compréhension des écoulements.

Les courbes de conductivité hydraulique (fig. 6.5) ont été établies également en désorption sur des bacs à kaolin par D. REUTENAUER, pour 4 échantillons prélevés respectivement dans les horizons A_1 , A_1/B_h , B_h et B_s . Elles montrent que la conductivité chute très vite lorsque le sol s'assèche : légèrement supérieure à 10 cm/h à pF 1 et < 0.01 cm/h à pF 2.3. Les horizons A sont globalement plus conducteurs que les horizons B aux pF < 2.3. Il peut ainsi se produire, lorsque le profil est très humide de manière durable, une variation dans la vitesse de circulation de l'eau à travers le profil et un ralentissement dans le drainage. Les tensions mesurées au site de Schildmatt depuis l'automne 1981 montrent que cela peut être le cas essentiellement au printemps, lors des fontes.

La litière, dont la conductivité à saturation de 14 cm/h n'est pas très différente de celle des horizons de surface, exerce un rôle "tampon" vis à vis des apports d'eau, puisu'elle réagit comme une éponge.

Caractéristiques mécaniques (annexe 6.4)

Les limites d'Atterberg déterminées par GEISSERT (1981) d'après le mode opératoire du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C., 1970) semblent montrer que plus la teneur en matière organique est élevée, plus la quantité d'eau nécessaire pour atteindre les limites de plasticité et de liquidité est grande. Cependant, de sérieuses difficultés sont apparues lors du traitement des échantillons prélevés à proximité de la surface où les teneurs en eau volumique, estimées à partir des teneurs pondérales et de la densité moyenne, sont nettement supérieures à la porosité sèche en raison de la forte teneur en matière organique.

Ces limites ne peuvent donc pas être réellement interprétées. En outre, le fait qu'elles soient établies sur des échantillons tamisés à 400 microns en limite l'intérêt pour ce genre de sol à forte proportion de sables et d'éléments grossiers. Néanmoins, la teneur en matière organique importante dans les horizons A semble conférer à ce matériel à texture sablo limoneuse une plasticité assez importante, en contradiction avec sa texture grossière.

Les essais réalisés avec un pénétromètre à anneau de Viksberg (prêté par le Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts d'Antony) pour déterminer la résistance à la pénétration ne sont guère plus concluants. Le premier horizon (A_1) n'oppose aucune résistance et la pointe du pénétromètre s'y enfonce "comme dans du beurre" ; à 7.5 cm, la résistance est à peine supérieure (0.36 à 4.95 MPA) et s'apparente à celle d'une tourbe (COSTET et SANGLERAT, 1981). Dès 15 cm, sur les 20 profils réalisés, la pointe a été bloquée six fois par des cailloux. Il n'a été possible d'aller au-delà de 20 cm que pour 7 profils. Les valeurs sont alors comprises entre 3.00 et 5.94 MPA et, s'il n'y a pas de cailloux, ce qui est exceptionnel, elles ne varient plus.

Compte tenu des problèmes que posent l'interprétation des limites d'Atterberg et des essais au pénétromètre dans ce type de milieu, nous n'avons pas jugé bon de poursuivre la détermination du comportement mécanique du sol et nous nous sommes limités aux indications données par ces essais.

Les problèmes posés sont ici liés d'une part à la teneur importante en matière organique et d'autre part à la forte proportion d'éléments grossiers.

La matière organique joue en effet un rôle ambigu :

- grossière et non décomposée, elle tend à retenir les particules de sol et constitue un facteur stabilisant,
- mal décomposée, elle forme un feutrage et joue le rôle d'éponge en présence d'eau,
- fine, elle intervient dans l'aggrégation et semble augmenter la plasticité du matériel. Dans cet état, elle influence également la viscosité, sans que cette influence soit réellement appréciable actuellement.

Globalement, elle diminue la densité apparente du sol. Sa responsabilité dans le comportement hydrique du sol - particulièrement évidente dans ce type de matériel poreux à texture grossière (VIVILLE, 1985) - révèle un aspect important de son rôle dans le comportement mécanique. En outre, elle est ici responsable des "foisonnements-retraits" des horizons de surface dont on peut attendre un effet net et durable sur la déformation du profil.

Les éléments grossiers (> 2mm) - qui constituent 30 à 40 % de la totalité du matériel - créent incontestablement des discontinuités dans le profil, dont le rôle vis à vis des déplacements est difficile à appréhender. Ils constituent le principal obstacle à l'établissement des caractéristiques mécaniques in situ et à l'interprétation de celles établies au laboratoire sur le matériel tamisé.

6.2.3 Le contexte climatique :

Les variations qui se produisent dans le sol sur ce type de versant peu perturbé par l'action anthropique sont, à l'échelle de quelques années, essentiellement liées aux conditions climatiques. Les situations connues au cours des neuf mois de mesures (novembre 1984 à Juillet 1985) ont une fréquence d'apparition qui conditionne les bilans sur une plus longue période. Cette présentation du contexte climatique a donc surtout pour but de relativiser la période de mesures encore trop restreinte dans le temps, en la replaçant dans un contexte plus large.

Pour caractériser le contexte climatique du site et de la période de mesures, on utilisera des données relevées à des postes d'observation relativement proches du site. Ceux-ci sont localisés sur la figure 6.1 ; leurs principales caractéristiques sont indiquées dans le tableau 6.1 :

poste	alt. (m)	distance au site (m)	distance à la crête (m)	équipement	dates disponibles
SCHILDMATT (ferme)	885	200	1380	pluviographe	1980/85 (sauf mois d'hiver)
LAC VERT	1044	750	630	pluviographe	1971/84
GEISBERG	840 743	3500	3850	abri-météo pluviographe	1976/85
LAC NOIR	963	4000	1500	pluviographe piquets à neige	1920/71

Tab. 6.1 Postes d'observations climatologiques utilisés.

Les postes de Schildmatt (ferme) et du Geisberg sont gérés par le Laboratoire de Géographie Physique, et les relevés effectués chaque semaine par R.BRAUN sont immédiatement disponibles. Le poste du Lac Vert dépend du Service Régional d'Aménagement des Eaux ; les données de ce poste sont communiquées annuellement. Enfin, le poste du Lac Noir était géré par la Météorologie Nationale qui l'a malheureusement supprimé à partir de 1971.

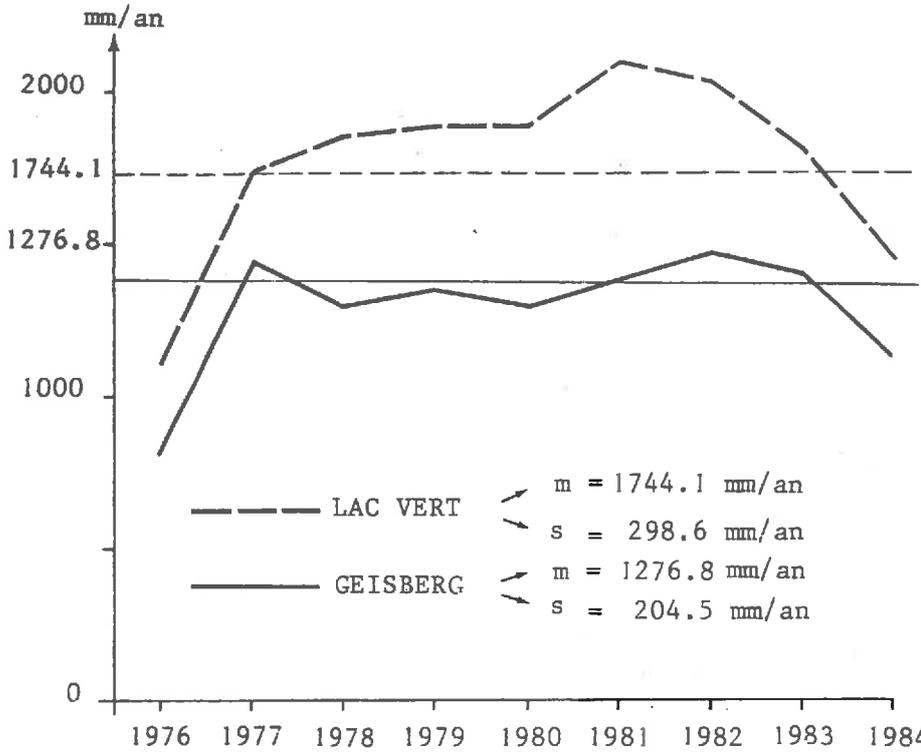


fig. 6.6 Précipitations annuelles au Lac Vert (1044 m) et au Geisberg (743 m) : 1976 - 1984.

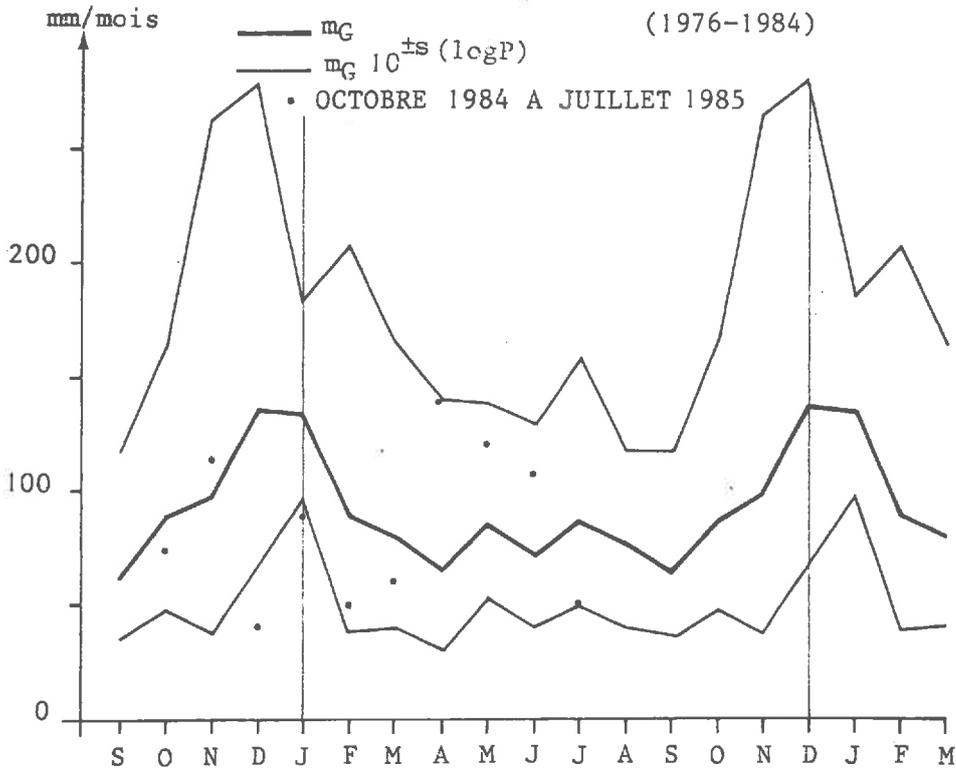


fig. 6.7 Moyenne géométrique et intervalle de confiance des précipitations mensuelles corrigées (30 j) au Geisberg (743 m) : 1976 - 1984
 Précipitations mensuelles corrigées (30 j) au Geisberg de octobre 1984 à juillet 1985

Les précipitations

La hauteur annuelle des précipitations a été en moyenne de 1744 mm au Lac Vert (1044 m) et de 1277 mm au Geisberg (743 m) au cours de la période 1976/84 (fig. 6.6). L'hiver est la saison la plus arrosée, le printemps la plus sèche. La ligne de crêtes constitue une barrière continue de 1150 à 1350 m d'altitude vis à vis des flux d'Ouest qui sont dominants, particulièrement en hiver. C'est la distance à la ligne de crêtes et non l'altitude locale du poste qui constitue le facteur principal de la répartition spatiale des précipitations (HUMBERT et PAUL, 1982).

La variabilité interannuelle est relativement importante puisque les écarts type sont de 299 mm au Lac Vert et de 205 mm au Geisberg pour la période prise en compte. Les résultats obtenus pour une série plus longue (1920/71) au Lac Noir (963 m), qui se trouve à une distance de la crête et à une altitude voisines de celles du site, sont du même ordre de grandeur : 1568 mm/an en moyenne, avec un écart type de 317 mm et la distribution suit assez bien une loi normale (AMBROISE, 1980).

Si les deux postes ne se différencient pas de la même manière suivant les années, au niveau des moyennes mensuelles par contre, pour la période 1976/84, les évolutions sont relativement semblables : le mois de décembre est le plus arrosé avec 161.5 mm (rapportés à 30 j) au Geisberg, les mois d'avril et de septembre sont les plus secs avec respectivement 85.5 et 74.8 mm au même poste.

Cependant, l'utilisation des moyennes arithmétiques et des écarts type n'est pas satisfaisante pour caractériser la distribution des précipitations mensuelles P et replacer les neuf mois de mesures dans cette distribution. En effet, la distribution suit plutôt une loi log normale, c'est à dire que $\log P$ suit une loi normale de moyenne m_L et d'écart type s_L (AMBROISE, 1980). La moyenne géométrique ($Mg = 10^{m_L}$) et son intervalle de confiance asymétrique, déduit de la loi log normale ($Mg 10^{\pm s_L}$) permettent de montrer que, relativement aux moyennes géométrique (fig. 6.7) :

- les mois de l'hiver 1984/85 ont été secs, décembre a même été très sec,
- les mois du printemps 1985, et particulièrement avril, ont été humides,
- le mois de juillet a été très sec.

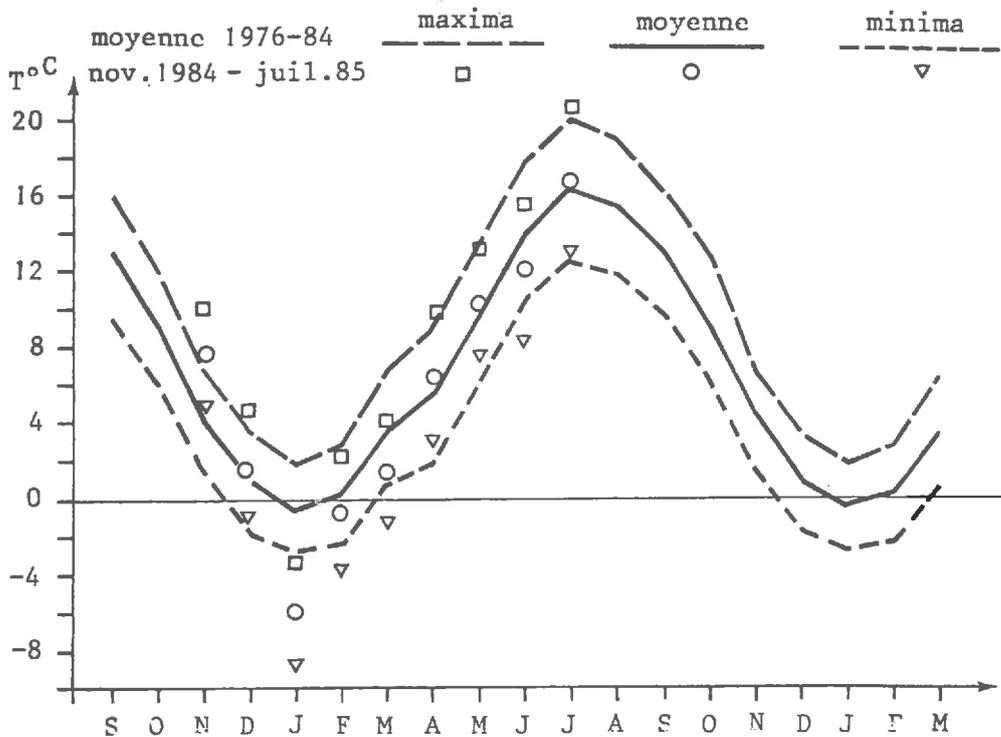
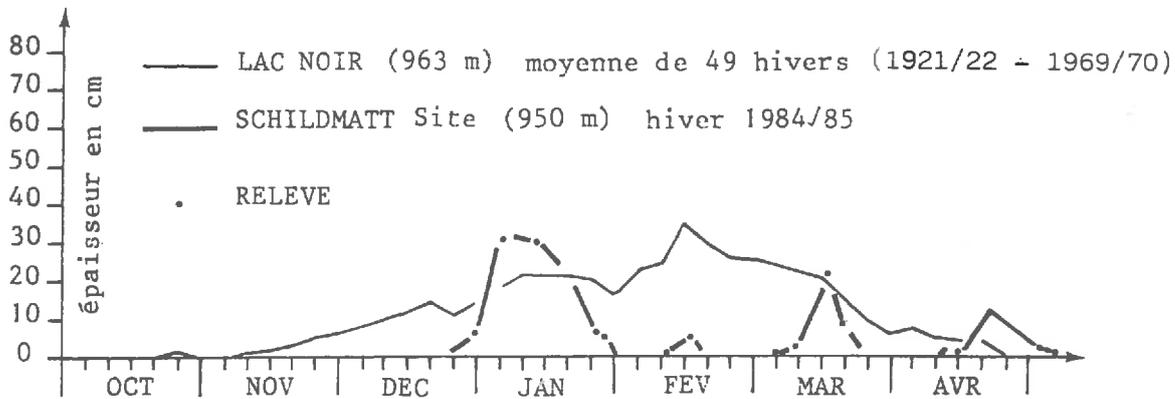
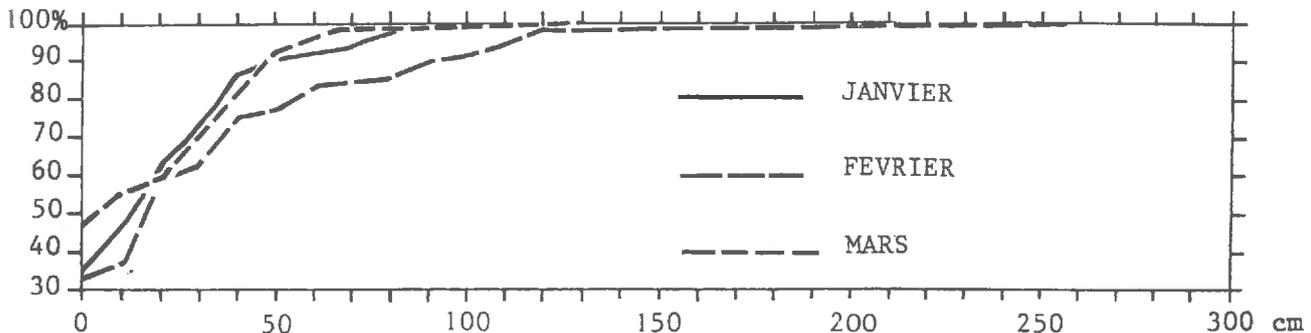


fig. 6.8 Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales au Geisberg (840 m) moyennes 1976 - 1984 valeurs de novembre 1984 à juillet 1985



a) moyenne des hauteurs de neige (1921/22 - 1969/70) relevées le 1er jour de chaque pentade au Lac Noir (963 m) et hauteur moyenne relevée au site de Schildmatt au cours de l'hiver 1984/85.



b). fréquence cumulée des hauteurs de neige au Lac Noir (963 m) : 49 hivers (1921/22 - 1969/70).

fig. 6.9 Enneigement

Les températures

Le régime des températures (fig. 6.8) est relativement contrasté, avec pour la même période 1976/84 au Geisberg (860 m), la température moyenne mensuelle :

- la plus basse en janvier, -0.5°C
- la plus élevée en juillet, $+16.2^{\circ}\text{C}$

soit une amplitude thermique annuelle moyenne de 16.7°C , plus faible qu'en plaine d'Alsace (18.5°C)

Le réchauffement s'amorce dès février, portant surtout sur les maxima : la différence avec janvier est de 0.9°C au niveau des maxima et de $+0.6^{\circ}\text{C}$ au niveau des minima. La hausse est relativement régulière jusqu'en juin. La baisse assez lente en septembre s'accroît en octobre et surtout en novembre.

Les séquences des jours à minimum inférieur à -10°C sont généralement brèves. Même en hiver, les nuits sans gelée ne sont pas rares (PAUL, 1982).

L'hiver 1984/85 se distingue nettement de ce régime moyen : il a été marqué par deux épisodes de gel intense, avec des séquences de jours où les maxima ont été inférieurs à -5.0°C et même à -10.0°C en janvier :

	janvier 1985	février 1985
Tmax < -5.0°C	3 au 10, 13 au 16	10 au 12 et le 18
Tmax < -10.0°C	5 au 8, 13 au 14	

Le mois de janvier, avec une température moyenne mensuelle de -5.9°C , a été le plus froid depuis 1963. Relativement, février apparaît comme moins exceptionnel, avec une moyenne de -0.7°C .

L'altitude du site de Schildmatt et sa situation sur un versant exposé au Nord, dans un vallon relativement encaissé, le rendent globalement "plus froid" que le Geisberg qui est sur un adret.

Cette situation topographique limite l'ensoleillement à tel point que la quantité d'énergie qui arrive au site serait celle d'une latitude de 65.05° , ce qui correspondrait à un décalage vers le Nord de 1888 km (MERCIER, 1982). Ainsi, les températures moyennes du site de Schildmatt sont inférieures d'environ 1°C à celles du Geisberg.

L'enneigement

Précipitations et températures conditionnent l'enneigement qui est un élément important du climat local et du microclimat du site. La couverture neigeuse constitue un stock d'eau et provoque en outre une rupture dans les transferts hydriques et thermiques entre l'air et le sol.

L'enneigement est difficile à apprécier car les données sont peu nombreuses pour le Massif Vosgien. Les travaux existants (JUILLARD, 1954 ; ROTHE et HERRENSCHNEIDER, 1963 ; ADJIZIAN, 1985) sont basés essentiellement sur des hauteurs de neige. Les données concernant les précipitations neigeuses sont encore peu nombreuses. Une étude plus précise du manteau neigeux (nombre de densité des strates, évolution...) a été entreprise depuis deux ans par R.BRAUN dans le bassin de la Petite Fecht, mais l'enneigement est resté faible ces deux dernières années.

Une série continue de relevés effectués quotidiennement le long de piquets au Lac Noir (963 m) au cours des 49 hivers 1920/21 à 1969/70 montre que les hivers peu enneigés sont fréquents : les fréquences calculées des hauteurs de neige relevées les 16 des mois de janvier, février et mars montrent que mars, avec 47 % de hauteurs nulles, est peu enneigé. Janvier et février ont à peu près le même nombre de hauteurs nulles : 35 et 33 %. Si février apparaît "en moyenne" plus enneigé que janvier, c'est essentiellement lié à quelques valeurs très élevées liées à un cumul des enneigements de janvier et février (fig. 6.9).

L'hiver 1984/85 a été peu enneigé : si la neige a recouvert le sol de la fin décembre à la fin janvier, l'épaisseur moyenne de la couche n'a pas dépassé 32 cm au site. Cet enneigement a été pratiquement nul en février. En mars, le sol a été recouvert du 11 au 25, mais l'épaisseur n'a pas dépassé 20 cm.

Cet enneigement différencié a pourtant eu un rôle considérable puisque en janvier, le gel intense et prolongé n'a pas pénétré dans le sol, tandis qu'en février, il s'est propagé rapidement dans un sol très humide, alimenté en grande partie par la fonte de fin janvier. Les irrégularités de la topographie sur le versant du site créent des discontinuités dans la couverture neigeuse et les 8 cm de neige au sol en février n'ont pas bloqué les transferts thermiques. Enfin, les fontes de fin janvier et de fin mars se sont produites rapidement : elles ont été surtout liées à des précipitations pluvieuses.

La succession et la conjonction d'évènements climatiques est déterminante pour l'évolution du microclimat du sol. Ces évènements peuvent en effet avoir d'une part un effet cumulatif sur l'évolution hydrique et d'autre part, leur conjonction peut être à l'origine de situations exceptionnelles. Ainsi, la situation -gel intense et durable sur sol non enneigé- qui s'est produite en février est plus rare que le gel de janvier car, en analysant les épisodes très froids du même type, il faut remonter à l'hiver 1939-40 pour qu'ils se soient produits alors que le sol n'était pas enneigé à cette altitude (d'après les relevés au Lac Noir qui se trouve à une altitude et une distance de la crête principale très voisines de celle du site).

Le suivi des conditions climatiques constitue donc un élément d'interprétation nécessaire mais non suffisant du microclimat du sol. C'est pourquoi un équipement particulier du site a été réalisé en même temps que l'installation des capteurs pour suivre l'évolution des conditions hydriques et thermiques à différentes profondeurs dans le sol.

6.3 L'équipement du site de Schildmatt :

L'ancien site avait été équipé entre 1979 et 1981. Le nouveau site l'a été progressivement entre mai et novembre 1984. Les équipements des deux sites et leur localisation sont présentés sur la figure 6.10 et dans le tableau 6.2 .

Ces équipements de quatre types servent à évaluer ou à mesurer la reptation, les conditions hydriques du sol, les conditions thermiques du sol et de l'air, ainsi que les précipitations qui arrivent au sol.

Mesure de la reptation

La reptation est mesurée avec les trois capteurs à jauges d'extensométrie SCHILD1, SCHILD2 et SCHILD3. Les deux premiers ont été mis en place perpendiculairement à la surface du sol en mai 1984, le troisième a été placé verticalement début novembre 1984. Les mesures effectuées avec les deux premiers capteurs de juin à novembre ne peuvent malheureusement être reliées à celles faites à partir de novembre : l'amplificateur du pont de mesure, assez ancien, est tombé en panne et, faute d'un étalonnage récent, l'incertitude subsiste quant au début de cette panne. C'est pourquoi seules les mesures réalisées à partir de novembre 1984 avec un nouveau pont sont prises en compte dans la présentation de ce travail.

Des tubes d'Anderson ont été placés verticalement dans le sol en octobre 1983. Les mesures servent essentiellement de contrôle. En outre, deux colonnes de sol coloré ont été mises en place en 1984 pour une échéance plus lointaine.

Mesure des conditions hydriques du sol

Elles sont effectuées avec des tensiomètres. Ceux-ci sont constitués d'une bougie en céramique poreuse reliée à un manomètre à mercure par un capillaire en nylon rempli d'eau. La bougie étant placée en contact le sol, un équilibre s'établit à travers la céramique poreuse, entre les suctions à l'intérieur de la bougie et dans le sol autour de la bougie. La céramique reste imperméable à l'air tant que la tension ψ est inférieure à 0.8 bars (≈ 800 cm H_2O).

La mesure des tensions permet en outre de connaître les charges hydrauliques à différentes profondeurs et de déterminer le sens des flux. En outre, en relation avec les teneurs en eau, les tensions permettent d'en apprécier l'ordre de grandeur et d'estimer ainsi les stocks.

Deux types de tensiomètres, construits avec des bougies de taille différente (annexe 6.5), sont utilisés :

- les petites bougies (6.3 mm de diamètre, 28.6 mm de long), placées horizontalement dans les 25 premiers centimètres pour permettre de mettre en évidence les éventuels gradients dans cette zone,
- les grandes bougies (23 mm de diamètre, 72 mm de long), placées verticalement pour les profondeurs supérieures à 30 cm.

La tension hydrique ψ est déduite directement de la hauteur de mercure lue sur le manomètre :

$$\psi = -12.6 i + j + z \quad (6.1)$$

avec i = hauteur du mercure (en cm)

j = altitude du toit du mercure dans le réservoir par rapport à la surface du sol (en cm)

z = profondeur de la bougie dans le sol (en cm, comptée positivement depuis la surface du sol,

12.6 = différence de densité entre le mercure et l'eau.

tab. 6.2

EQUIPEMENT DU SITE SCHILDMATT

Haut Prof (cm)	NOUVEAU SITE					ANCIEN SITE					Haut Prof (cm)							
	Pluvio-mètre	Thermo-sonde	Tensio-mètre	Capteur			Horizon pédologique	Tubo d'Anderson				Tensio-mètre	Tubo neutronique			Pluvio-mètre		
	N°	N°		SCHILD1	SCHILD2	SCHILD3		1	2	3		4	Sth	Stb	ALU	PVC	PVC	N°
100	4 à 6	10															1 à 3	100
10		11																10
0*		12					A 0 (Litière)											0*
0*		1	2	3														0*
1																		1
2		4				h												2
3						h												3
4																		4
5		5				h												5
6						h												6
7						h	h											7
8		6				h	h											8
9						h	h											9
10																		10
11						h	h	h										11
12						h	h	h										12
13						h	h	h										13
14						h	h	h										14
15						h	h	h										15
16		7				h	h	h										16
17						h	h	h										17
18						h	h	h										18
19						h	h	h										19
20																		20
21																		21
22																		22
23		8				h	h	h										23
24						h	h	h										24
25						h	h	h										25
26																		26
27																		27
28																		28
29																		29
30						v												30
31																		31
32		9																32
33																		33
34																		34
35																		35
36																		36
37																		37
38																		38
39																		39
40						v												40
41																		41
42																		42
43																		43
44																		44
45																		45
46																		46
47																		47
48																		48
49																		49
50						v												50
51																		51
52																		52
53																		53
54																		54
55																		55
56																		56
57																		57
58																		58
59																		59
60						v												60
61																		61
62																		62
63																		63
64																		64
65																		65
66																		66
67																		67
68																		68
69																		69
70						v												70

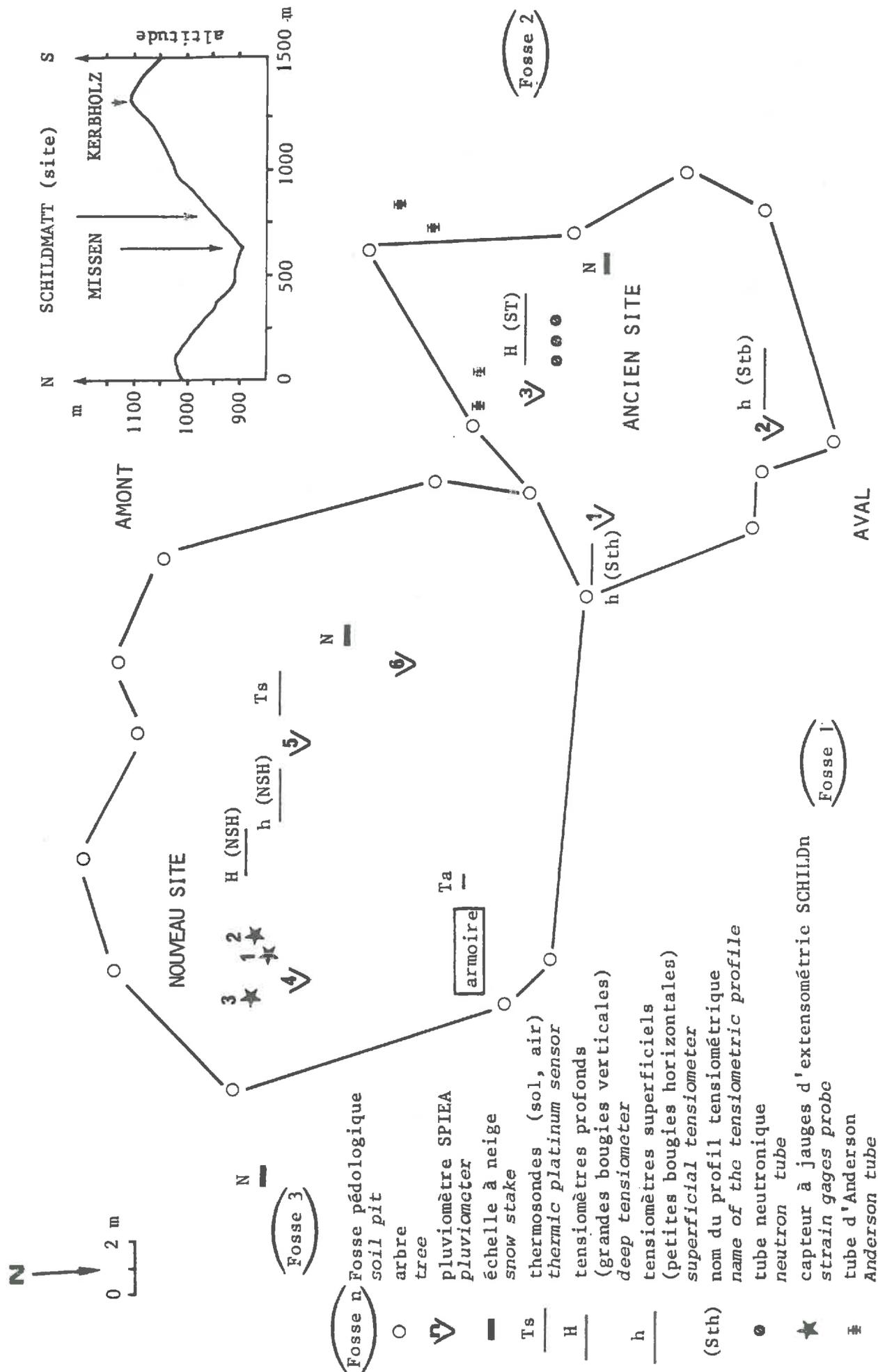


fig. 6.10 Localisation des équipements sur le site de Schildmatt.

La charge hydraulique ϕ (cm d'eau) est composée de la tension hydrique et de la charge gravitationnelle. Elle est établie directement à partir des mesures tensiométriques et de l'altitude relative du point de mesure z (en cm, comptée positivement à partir de la surface du sol) :

$$\phi = \psi - z \quad (6.2)$$

L'ajustement des courbes de rétention hydrique (VAN GENUCHTEN, 1980 ; AMBROISE, 1982) permet d'évaluer les teneurs en eau volumique θ (cm³/cm³) : l'hystérésis de la relation $\psi(\theta)$ n'étant pas connue au site, les valeurs seront considérées davantage comme des ordres de grandeur. Leur validité est néanmoins correcte à proximité de la saturation ou de l'assèchement et également pour les périodes de drainage correspondant aux conditions dans lesquelles les courbes de rétention ont été établies.

Les stocks d'eau peuvent être également calculés à partir des teneurs en faisant les mêmes restrictions que pour celles-ci. Ils expriment la lame d'eau, en millimètres, contenue dans le sol entre la surface et une profondeur donnée, considérée comme intermédiaire entre deux points de mesure tensiométrique.

Enfin, 3 tubes pour effectuer des mesures neutroniques sont disponibles à l'ancien site. Le procédé de mesure des teneurs en eau volumique à l'aide d'une sonde neutronique utilise le ralentissement des neutrons rapides par les atomes d'hydrogène (GUENNELON et CABIBEL, 1977). Il suppose un étalonnage du milieu, car l'eau de constitution ne doit pas être confondue avec l'eau libre et certains corps absorbent les neutrons. La présence de blocs complique sérieusement l'étalonnage. En outre, la sphère d'influence de 15 à 25 cm de rayon ne permet pas les différenciations à proximité de la surface. C'est pourquoi son utilisation au site de Schildmatt a pour intérêt essentiel de contrôler l'allure globale des profils d'humidité établis à partir des mesures tensiométriques.

Mesure des températures

Les températures de l'air et du sol sont mesurées par des sondes de platine reliées à un enregistreur graphique. Ce procédé de mesure de la température utilise la relation entre la résistance électrique d'un fil conducteur et sa température. Ces variations de résistance sont dues aux dilations thermiques et surtout aux variations de résistivité (cf. VITON, 1970 ; CATIER, 1978). Le système thermosondes/enregistreur sur piles (GRANT) a été conseillé par le Centre de Géomorphologie du C.N.R.S. à Caen qui l'utilise depuis plusieurs années dans des conditions encore plus rudes que celles du site. Les sondes ont été assemblées au Centre par G.GUILLEMET.

La mesure est effectuée toutes les quatre heures pour chaque sonde. Les bandes d'enregistrement sont dépouillées sur une table à digitaliser.

D'autres systèmes d'enregistrements plus séduisants, tels les enregistrements sur mémoires, existent actuellement : insuffisamment testés dans des conditions de terrain rudes au moment du choix, ils n'ont pas été retenus. L'enregistrement graphique permet un contrôle rapide à chaque passage sur le terrain : à cet effet, une sonde est disposée à côté des thermomètres à minima et à maxima dans l'armoire contenant l'enregistreur.

Mesure de l'eau qui arrive au sol

Le couvert forestier constitue un écran qui transforme considérablement la quantité d'eau qui arrive au sol (AUSSENAC et BOULANGEAT, 1980 ; PETIT et KALOMBO, 1984). Les mesures tensiométriques effectuées sur le site depuis l'automne 1981, suggéraient l'importance locale de l'interception par la couronne des arbres. Un pluviomètre a été disposé à proximité directe de chacun des profils pour connaître la quantité d'eau arrivant au sol au-dessus de chaque profil équipé de capteurs, tensiomètres ou thermosondes.

La hauteur de neige est mesurée le long de piquets en bois et contrôlée par sondage.

CHAPITRE VII : LA REPTATION AU SITE DE SCHILDMATT

(Novembre 1984 - Juillet 1985).

De novembre 1984 à juillet 1985, les mesures ont été faites de manière régulière, en général une fois par semaine, et de manière plus rapprochée lorsqu'elles indiquaient une évolution.

L'hypothèse que les déplacements par reptation sont surtout liés à certains évènements climatiques capables d'exercer une influence sur les conditions hydriques et thermiques du sol a également amené à multiplier les mesures lors des évènements où des déplacements risquaient de se produire : précipitations importantes, fonte et dégel du sol. Ainsi, des mesures ont été réalisées au cours de 49 jours différents répartis sur ces neuf mois.

La figure 7.1 regroupe de manière synoptique des indications concernant l'évolution des paramètres climatiques et situe les jours où les mesures ont été réalisées.

De novembre 1984 à juillet 1985, les évènements climatiques les plus exceptionnels sont les deux périodes de gel intense et prolongé de janvier et de février. L'enneigement n'a pas été important ; le sol n'a été couvert de manière continue qu'au mois de janvier et du 11 au 27 mars. Les épisodes de précipitations importantes sont relativement peu nombreux : fin novembre, fin avril-début mai et début juin. L'orage le plus important s'est produit le 29 juillet : il n'est tombé qu'une dizaine de millimètres sous le couvert forestier.

Après avoir présenté les règles adoptées pour le dépouillement des mesures, l'examen de l'évolution des mesures de déformations permettra de définir les dates ou périodes où cette évolution a été significative. Les profils de déformations mesurées et de déplacements établis à partir de celles-ci seront ensuite décrits et interprétés dans ce chapitre à la lumière des évènements climatiques.

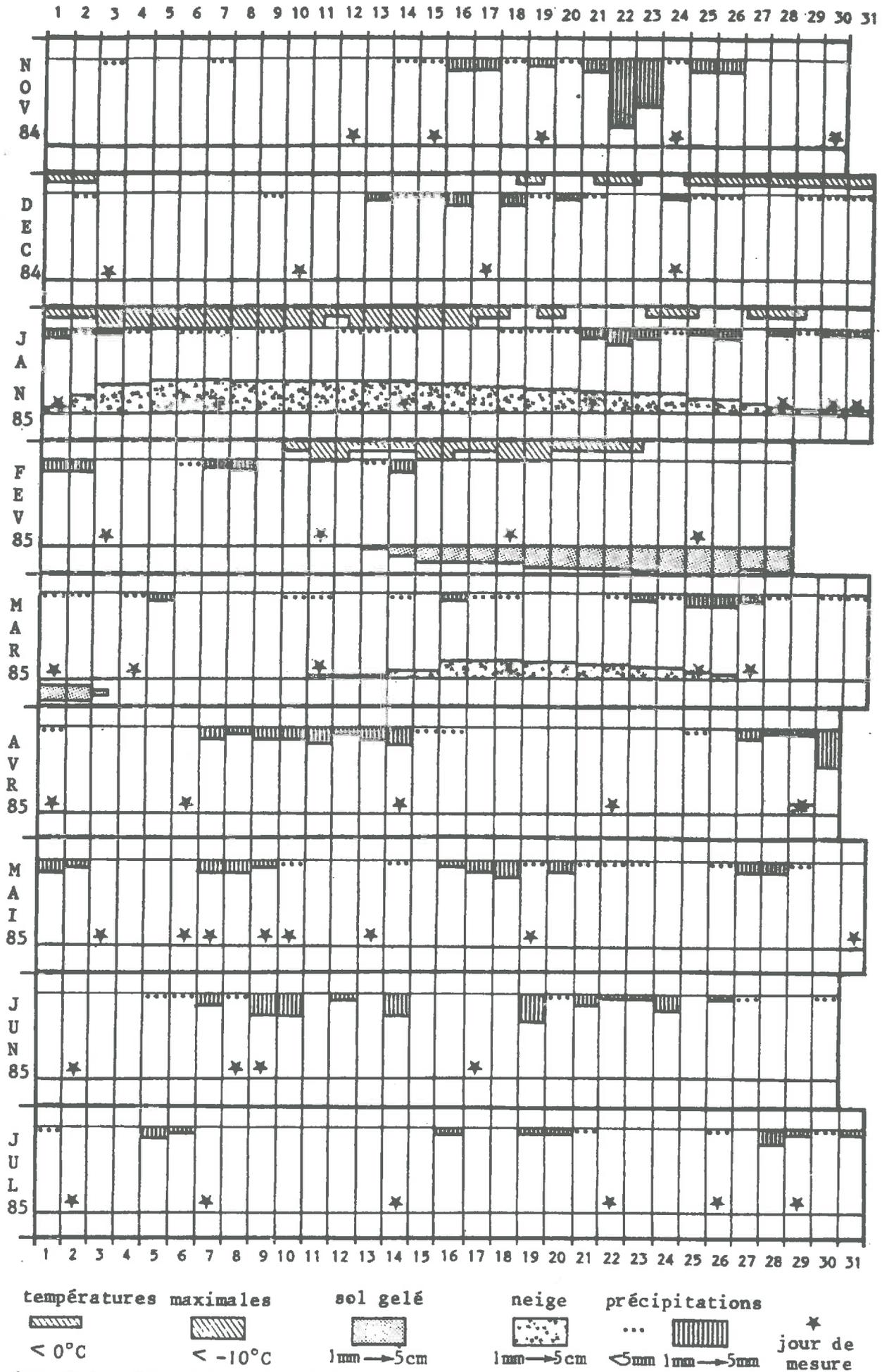


fig. 7.1 Synoptique des évènements climatiques et des jours de mesure : novembre 1984 - juillet 1985

7.1 Règles adoptées pour le dépouillement des mesures :

Les capteurs à jauges d'extensométrie permettent de mesurer la valeur des déformations relatives à chaque niveau de jauges. A partir de ces déformations, la forme du capteur, et, ainsi l'évolution des déplacements, peuvent être reconstituées (cf. § 3.4).

Il importe de ne pas confondre ce qui est réel et ce qui est dû aux erreurs inhérentes aux mesures et à l'approximation de la procédure de traitement. Dans ce but, des règles rigoureuses ont été fixées, à partir des tests réalisés pour chaque capteur (cf. § 4.1).

Les erreurs interviennent en effet à deux niveaux :

- sur les mesures de déformation,
- sur la reconstitution des déplacements.

Les tests ont permis d'établir que la distribution de l'erreur inhérente aux mesures de déformations était de type gaussien, d'écart type $s = 8 \mu\text{m/m}$ pour SCHILD1 et $s = 6 \mu\text{m/m}$ pour SCHILD2. Les résultats obtenus pour SCHILD3 ($s = 4 \mu\text{m/m}$) étant inférieurs à la précision du pont de mesure donnée par le constructeur ($\pm 6 \mu\text{m/m}$), on retiendra néanmoins dans ce qui suit $s = 6 \mu\text{m/m}$ pour ce capteur

Ces écarts types correspondent à une série de mesures effectuées le même jour. L'erreur étant de cet ordre de grandeur pour chaque date, il faut considérer que l'écart type de la distribution de l'erreur sur l'évolution des déformations entre deux dates est de l'ordre de $s\sqrt{2}$ et ainsi que la quasi totalité de l'erreur sur l'évolution des déformations est comprise entre $\pm 2 s\sqrt{2}$.

- a) Les évolutions des déformations ne seront considérées comme significatives à un niveau que si elles sont supérieures à $\pm 2 s\sqrt{2}$
- b) Les déplacements relatifs entre deux dates ne seront calculés que si des déformations se sont avérées significatives à un ou plusieurs niveaux.

Si c'est le cas, pour chacune des deux dates, cent profils sont générés à partir des mesures de déformations en prélevant des valeurs dans une série pseudoaléatoire gaussienne d'écart type s . La moyenne et l'écart type des déplacements sont ensuite calculés, permettant de conclure si le déplacement entre les deux dates est lui-même significatif ou non.

- c) La reconstitution des déplacements étant effectuée de la base vers la surface, les erreurs éventuelles se cumulent et l'écart type sur les déplacements en surface dépend du nombre de niveaux pris en compte. C'est pourquoi, quand les déformations de plusieurs niveaux à la base n'évoluent pas de manière significative (règle a), seuls les niveaux supérieurs sont pris en compte pour la reconstitution des déplacements.
- d) Pour évaluer le déplacement global sur une plus longue période, la moyenne des mesures des déformations sur plusieurs dates où leur évolution n'était pas significative sera effectuée au début et en fin de période. Le but est de réduire ainsi l'effet, sur les déplacements calculés, des erreurs inhérentes aux mesures : la distribution de l'erreur sur les déformations serait en effet de s/\sqrt{n} pour chacune des moyennes, n étant le nombre de dates prises en compte.

Ces règles peuvent paraître lourdes à mettre en oeuvre. Cependant, les calculs ont été réalisés de manière automatique sur un microordinateur (VICTOR S1). Une fois que nous avons mis les programmes au point (annexe 3.3), le principal travail a consisté à analyser les données. L'interprétation a été encore facilitée en utilisant un logiciel de dessin sur écran permettant la visualisation des évolutions des profils.

7.2 L'évolution des déformations des jauges : mise en évidence des périodes de déplacement.

L'évolution des déformations à chaque niveau, d'un jour de mesure à l'autre est présentée sous forme de courbes pour le capteur SCHILD3 dans la figure 7.2. Les mêmes figures pour les deux autres capteurs peuvent être consultées en annexe 7.1 et 7.2. Sur ces courbes, un "créneau" qui s'étendrait sur plusieurs mesures successives marquerait une évolution continue pendant la période. La stabilisation, figurée par un retour à zéro, correspond à une évolution nulle tandis que deux pics successifs de sens opposé indiquent un retour à la déformation antérieure. Un écart positif traduit une incurvation à ce niveau dont la concavité est dirigée vers l'amont et inversement, un écart négatif indique une incurvation dont la concavité est dirigée vers l'aval.

Ce qui apparait en premier lieu, c'est une évolution discontinue : seuls quelques créneaux s'individualisent nettement : les périodes où des déplacements se produisent sont brèves. A une évolution positive ou négative succède, en général, une évolution de sens opposé, plus faible. Ces évolutions peuvent être confrontées avec les événements climatiques présentés de manière détaillée sur la figure 7.3 pour les mois de décembre 1984 à mars 1985, où les évolutions des déformations les plus marquantes ont été observées.

Pour les trois capteurs, ces courbes montrent en outre que :

- Les quatre niveaux supérieurs (1 à 4, profondeur inférieure à 18 cm) sont ceux qui présentent les plus nombreux pics : ce sont aussi ceux qui se trouvent dans les deux horizons superficiels, les plus sensibles aux variations climatiques. Ce constat confirme les résultats déjà obtenus antérieurement par GEISSERT (1981) et AUZET (1982). MERCIER (1982) les interprétait comme liés aux "foisonnements-retraits" de ce matériel à forte teneur en matières organiques.

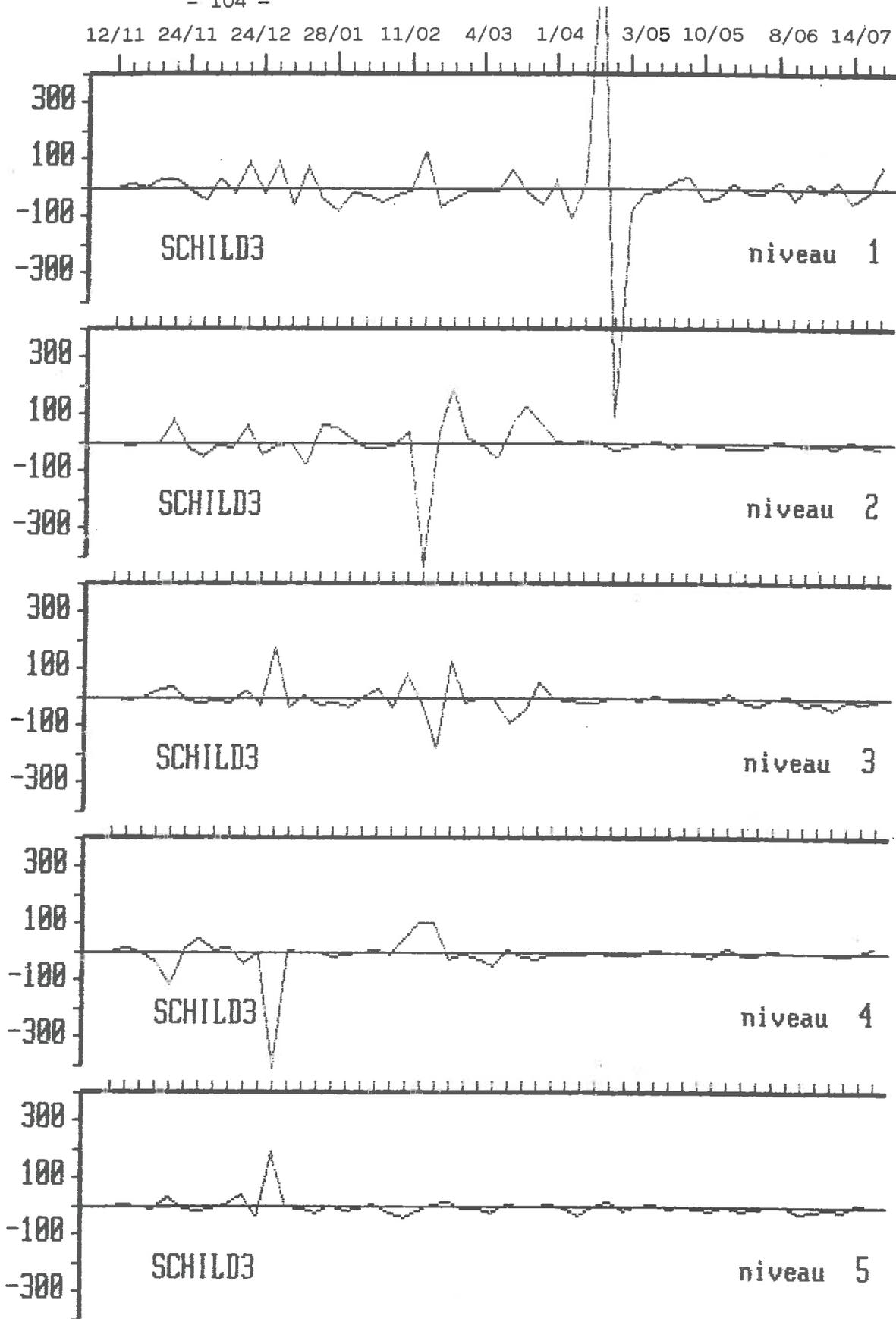
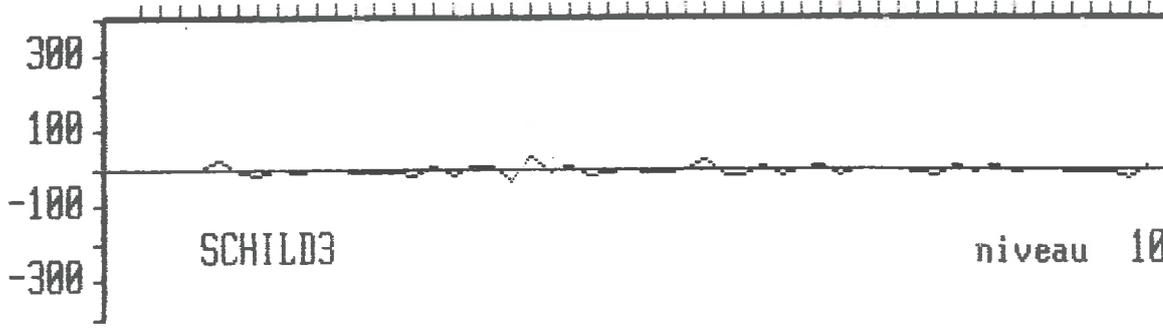
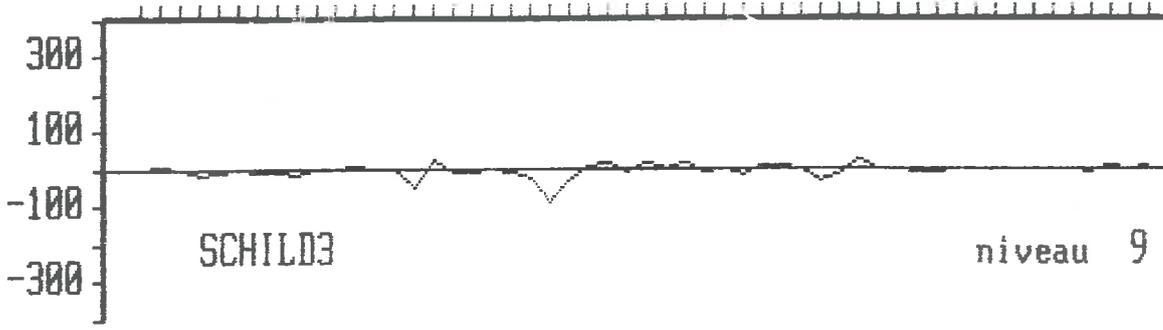
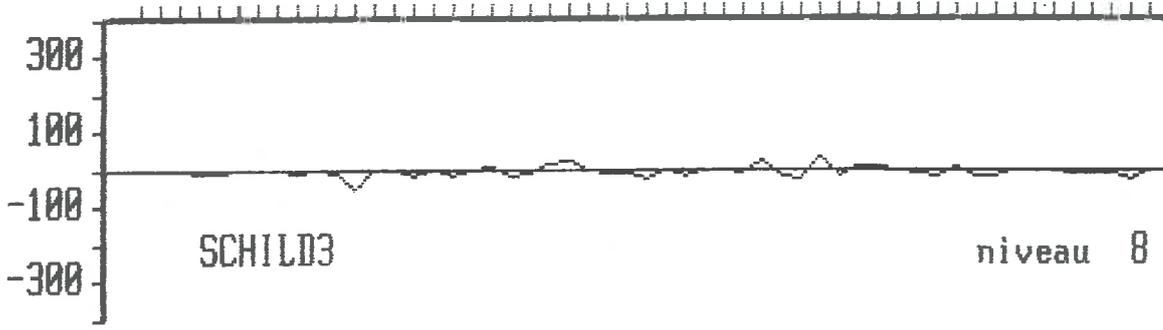
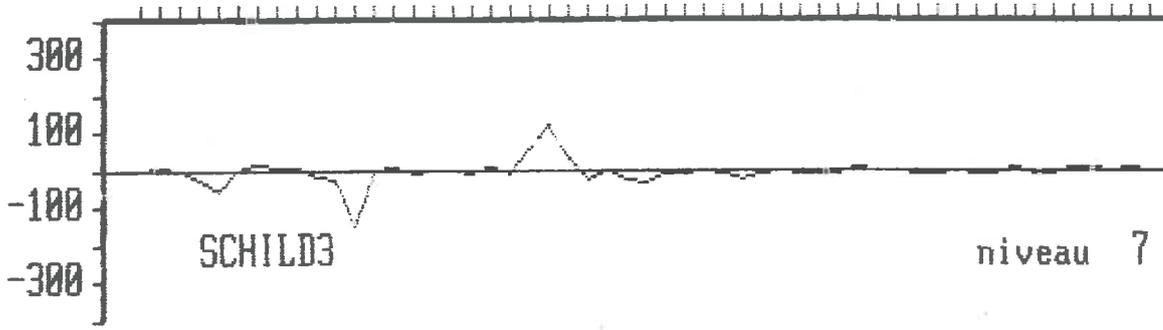
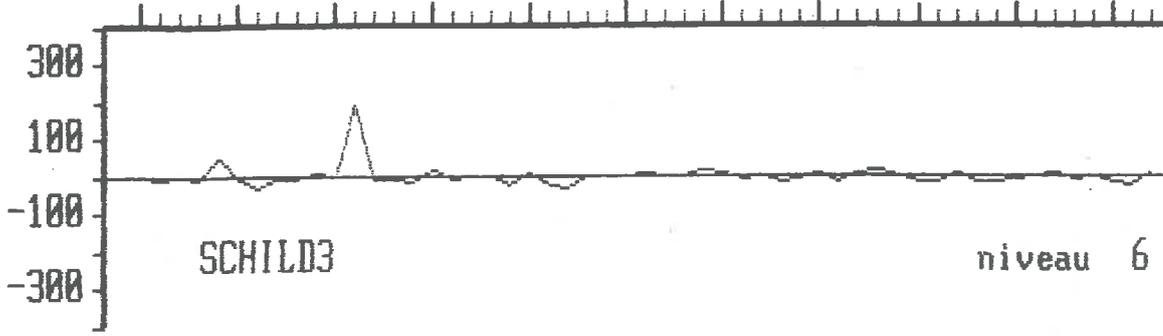


fig. 7.2 Evolution des déformations relatives à chaque niveau d'un jour de mesure à l'autre pour le capteur SCHILD3.

12/11 24/11 24/12 28/01 11/02 4/03 1/04 3/05 10/05 8/06 14/07



- Tous les niveaux présentent des pics au cours d'une période qui débute le 11 ou le 18 février et qui correspond à l'engel et au dégel du sol : le niveau inférieur du capteur SCHILD3 échappe à cette tendance. Ce sont donc les mesures effectuées avec ce capteur qui permettront de reconstituer les déplacements pour toute période encadrant cet épisode de gel.
- Certains niveaux supérieurs présentent des pics les 27 mars ou le 1er avril 1985, après une période de relative stabilisation au courant du mois de mars : ces dates correspondent à la fonte de la fin du deuxième enneigement.
- Le premier niveau de chacun des trois capteurs accuse une évolution positive le 29 juillet où se sont produites des précipitations orageuses après une période sèche et chaude.

Cette analyse de l'évolution des déformations entre deux dates de mesure a permis de mettre en évidence la correspondance globale entre certains évènements climatiques et une évolution significative des déformations mesurées avec les trois capteurs.

Elle permet de montrer également que certains évènements climatiques -tels les épisodes pluvieux importants de novembre et fin avril ou la fonte de janvier- n'ont pas eu d'effet réellement sensible.

Enfin, elle va permettre de "cibler" les dates pour lesquelles des déplacements peuvent être reconstitués avec une précision suffisante.

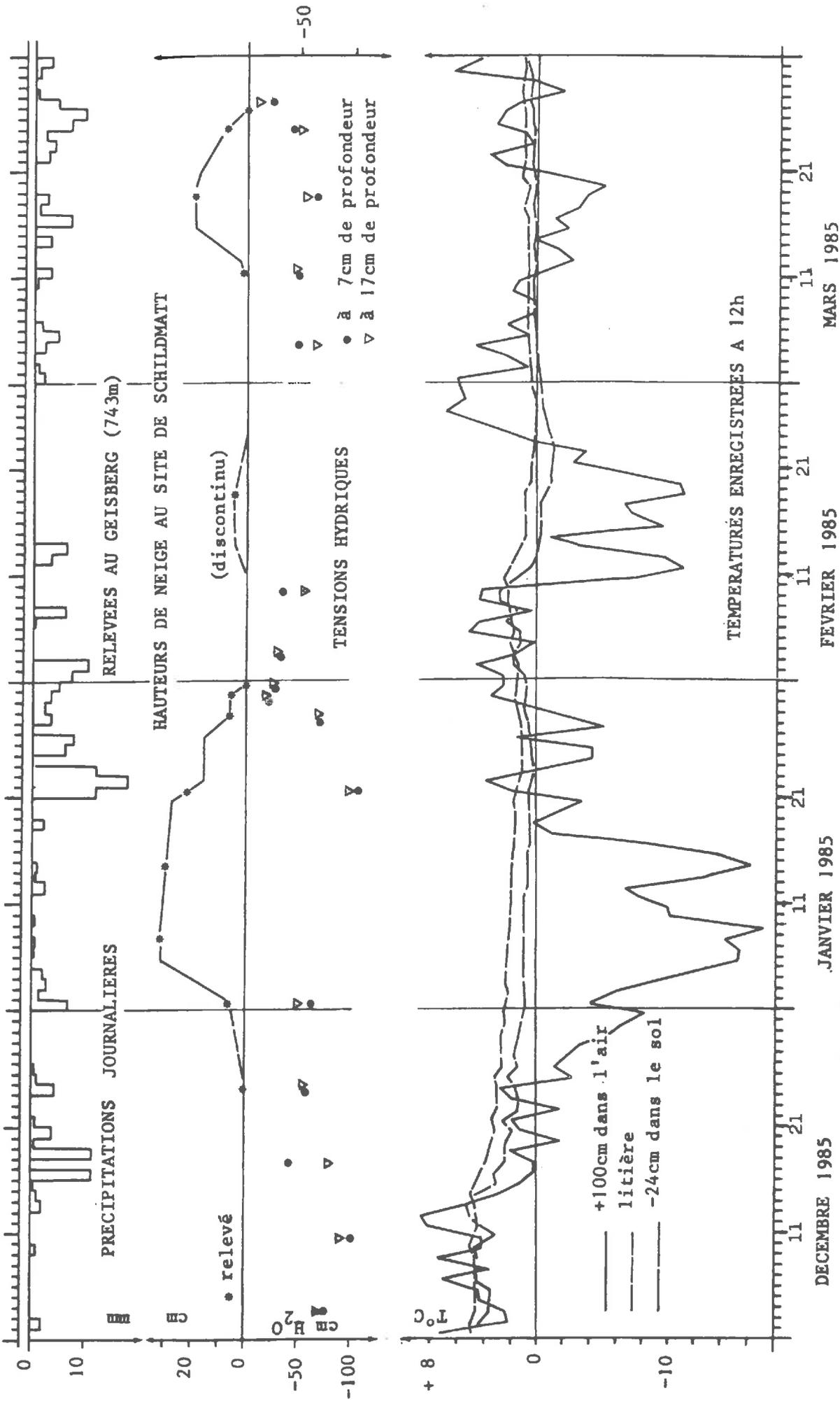


fig. 7.3 Evolution du climat et des conditions hydriques et thermiques du sol : décembre 1984 - mars 1985.

7.3 Les déplacements

7.3.1 Le déplacement global sur la période de janvier à juillet 1985 :

De janvier à juillet 1985, ce déplacement global, établi à partir de deux profils moyens de périodes relativement stables pour le capteur SCHILD3, a été de l'ordre de 3 mm vers l'aval en surface (tab. 7.1).

Pour une période à peu près identique, compte tenu de l'absence d'évolution réelle entre novembre et janvier, les mesures du déplacement de l'extrémité des lames des capteurs SCHILD1 et SCHILD2 ont été respectivement de 6 et 5 mm (± 2 mm). La même mesure n'a pas pu être faite pour SCHILD3, faute de point de repère. Pour la même période, la moyenne des déplacements mesurés en surface avec les quatre tubes d'Anderson est de 2 mm.

Tous ces résultats sont du même ordre de grandeur, compte tenu de leur précision respective. Les tubes d'Anderson ont tendance à sous-estimer les déplacements : il semble que leur taille, leur rigidité et la densité du P.V.C. (1.38 g/cm^3), nettement supérieure à celle des horizons de surface (0.6 à 0.8 g/cm^3), les rendent nettement moins sensibles que les capteurs. Le cylindre en P.V.C. n'a pas conservé correctement sa forme cylindrique (cf. annexe 7.3). Les résultats ne sont cependant pas très différents, et ces mesures constituent un contrôle très peu coûteux.

Les capteurs de reptation permettent une analyse plus fine de l'évolution des déplacements entre deux dates où l'évolution des déformations a été significative. Celles-ci vont être présentées par type d'évènement climatique, et les profils de déformations et déplacements relatifs seront confrontés à l'évolution des conditions hydriques.

Mesures par rapport
à un fil tendu

NOV. 84 - JUL. 85 JANVIER-JUILLET 9/02/85-4/03/85 25/02/85-4/03/85 18/03/85-1/04/85

		gel-dégel du sol		dégel du sol		fonte de la neige	
		MOY	ECT	MOY	ECT	MOY	ECT
SCHILD1	surf. 2 cm	6.1		11.8	1.85	1.0	0.75
				11.2	1.76	0.8	0.68
SCHILD2	surf. 3 cm	5.0		14.7	1.42	1.9	0.59
				12.6	1.31	1.4	0.51
SCHILD3	surf. 2 cm		2.9	0.44	2.8	0.96	0.56
			2.5	0.41	1.9	0.90	1.4	0.51
Tubes 18/12/83							
d'Anderson	24/11/84	24/11/84-26/07/85	24/11/84-4/03/85	4/03/85-6/04/85			
1	-1.2	2.5	2.4		-0.8		
2	1.5	-	0.9		-0.8		
3	2.5	2.1	1.9		(0.4)		
4	1.8	1.4	4.1		-2.0		
MOY	1.1	2.0	2.3		-1.2		
ECT	1.62	0.56	1.34		0.69		

tab. 7.1 Déplacements par reptation mesurés au site de Schildmatt.

7.3.2 L'engel et le dégel du sol : 11/02/85 - 4/03/85

A l'échelle des déplacements par reptation, cet évènement est le plus important qui se soit produit au cours des neuf mois de mesures. Le gel s'est propagé jusqu'à 26 cm de profondeur en quinze jours. Cet engel lent a favorisé la production de glace sous forme de lentilles et la croissance de celles-ci, bousculant et étirant les lames des capteurs. Cette vitesse est liée à l'état très humide du sol (fig. 7.4). La localisation de ces lentilles est probablement aléatoire compte tenu de leur hétérogénéité. Cependant, leur développement a davantage malmené les capteurs SCHILD1 et SCHILD2 placés perpendiculairement à la surface du sol que le capteur SCHILD3 qui a été mis en place verticalement. Il semble impossible de dire s'il s'agit d'un hasard lié à la localisation aléatoire des lentilles ou d'un réel avantage de l'insertion verticale.

Deux dépouillements différents ont été effectués :

- par rapport à la date antérieure au gel (9/02/85) ; seuls les déplacements du capteur SCHILD3, dont l'ancrage n'a pas "lâché", ont pu être établis (fig. 7.5),
- par rapport à la fin de la propagation du gel (25/02/85), pour les trois capteurs (fig. 7.6);

Les déplacements au cours du dégel ont été importants pour les capteurs inclinés SCHILD1 et SCHILD2 : 11.8 mm et 14.7 mm en surface ; le déplacement en surface du capteur SCHILD3 pour la même période est nettement inférieur : 2.8 mm. Celui-ci accuse néanmoins un déplacement en surface de 10.2 mm sur l'ensemble de la période d'engel-dégel.

Lors du dégel, le déplacement des capteurs inclinés a été nettement plus important que celui du capteur vertical. Il peut s'agir en partie d'une remise en place. Néanmoins, pour la totalité de la période engel-dégel, les déplacements des trois capteurs sont du même ordre de grandeur (cf. tab. 7.1). Cela peut signifier qu'un déplacement important est possible lors de l'engel.

Le déplacement a été sensible jusqu'en dessous de la profondeur atteinte par le gel. Il est en grande partie réversible, puisque tous les niveaux où les déformations ont été très importantes vont évoluer relativement lentement en sens inverse courant mars. Cette évolution est également nette sur les tubes d'Anderson (tab. 7.1).

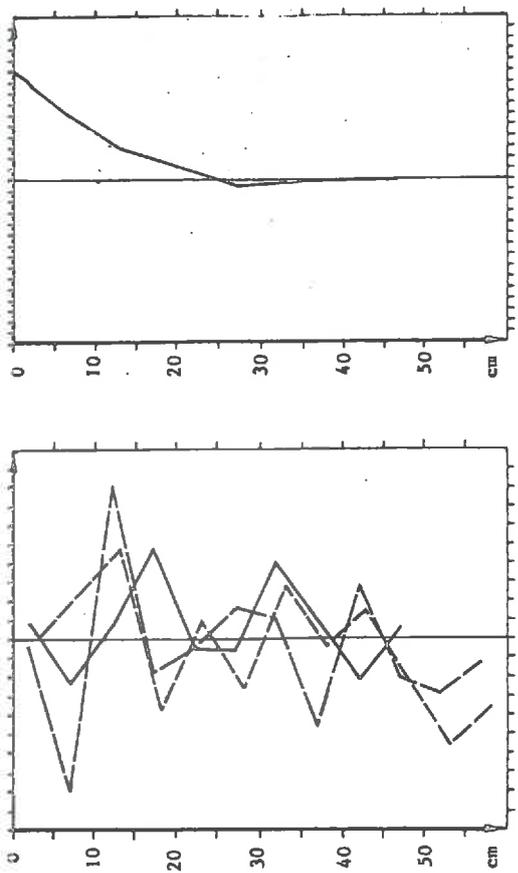


fig. 7.5 Evolution des déformations et des déplacements au cours de l'engél et du dégel : 9/02/85 - 4/03/85.

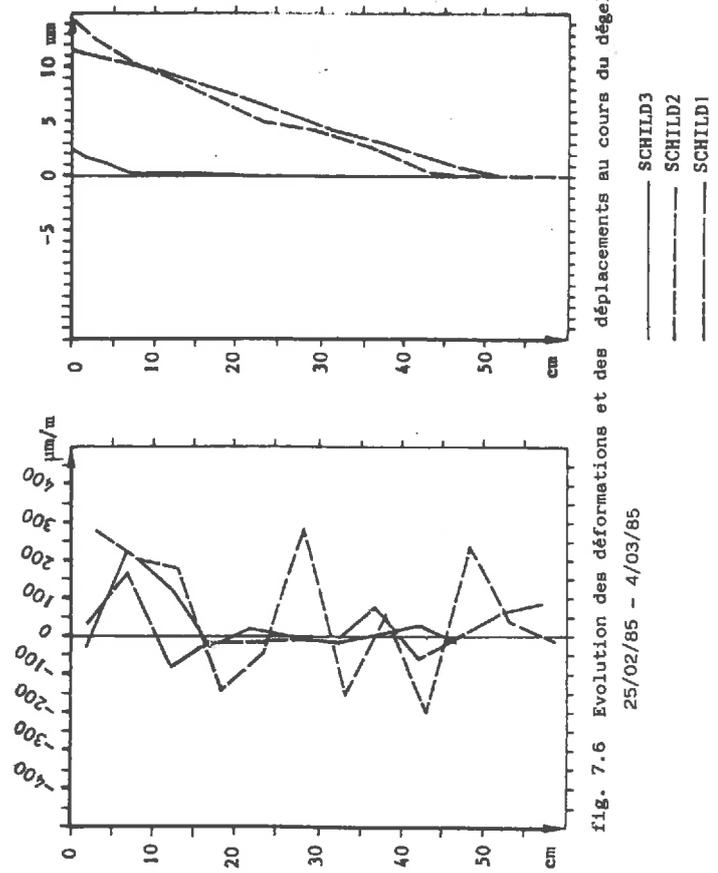
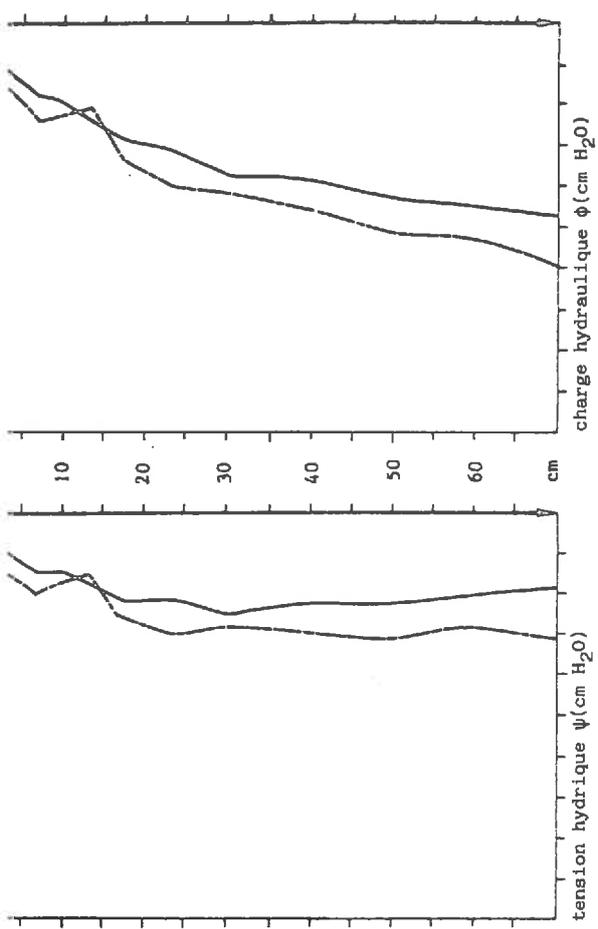


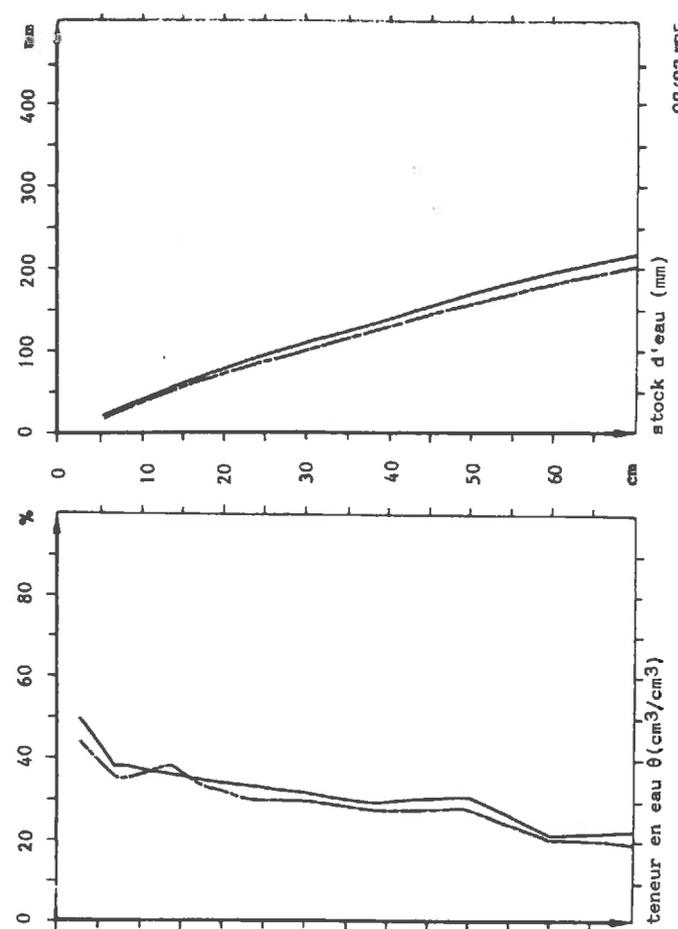
fig. 7.6 Evolution des déformations et des déplacements au cours du dégel 25/02/85 - 4/03/85

SCHILD3
SCHILD2
SCHILD1



charge hydraulique φ (cm H₂O)

tension hydrique ψ (cm H₂O)



teneur en eau θ (cm³/cm³)

stock d'eau (mm)

03/02/85
04/03/85

fig. 7.4 Conditions hydriques du sol les 9/02 et 4/03/1985.

7.3.3 La fonte de la neige :

Il y a eu deux fontes au cours de l'hiver 1984/1985 dont les effets sur les déplacements ont été très différents.

Celle de fin janvier, pourtant plus importante que celle de fin mars du point de vue de l'épaisseur de neige qui a fondu (30 cm au lieu de 20), n'a eu que peu d'effet sur les déformations (fig. 7.7), et celui-ci a été trop faible pour se traduire par des déplacements. La neige qui a fondu fin janvier recouvrait le sol depuis fin décembre et n'avait pas fondu avant le 21 janvier du fait des températures extérieures très négatives. L'eau libérée par la fusion, à laquelle s'est ajoutée celle des précipitations qui ont provoqué la fonte, a d'abord dû resaturer le profil.

Par contre, les profils de déformations relatives du 1er avril, établis par rapport au 18 mars (fig. 7.8), avant la fonte, montrent pour les trois capteurs une évolution positive significative marquée à un ou plusieurs des quatre niveaux à proximité de la surface. Seuls sept niveaux ont été pris en compte pour la reconstitution des déplacements, les niveaux les plus profonds n'ayant pas évolué de manière significative.

Les déplacements reconstitués sont compris entre 1 et 2 mm en surface et sont significatifs compte tenu des intervalles de confiance de ces déplacements calculés pour chaque capteur (cf. règle b). Les profils hydriques indiquent un état proche de la saturation dans tout le profil à partir du 25 mars, et un état de départ déjà très humide le 18 mars, avant le début de la fonte (fig. 7.9). Le stock d'eau est très important, de l'ordre de 240 mm à 70 cm de profondeur, dès le 25 mars. La fonte était déjà achevée le 27 mars, alors que les déplacements les plus importants ont été mesurés le 1er avril. Entre ces deux dates, l'évolution des conditions hydriques est nulle.

En janvier et en mars, l'état hydrique du sol était comparable en fin de fonte. Il a été moins durable lors de la première, le stock d'eau du sol étant au départ moins important (fig. 7.10). Ces observations semblent ainsi montrer que, plus que la saturation importante du profil, c'est la prolongation de cet état qui favoriserait les déplacements. Or ce type de situation n'a été lié, au cours des neuf mois de mesures, qu'à une fonte entretenue par des précipitations et se produisant sur un sol très humide au départ.

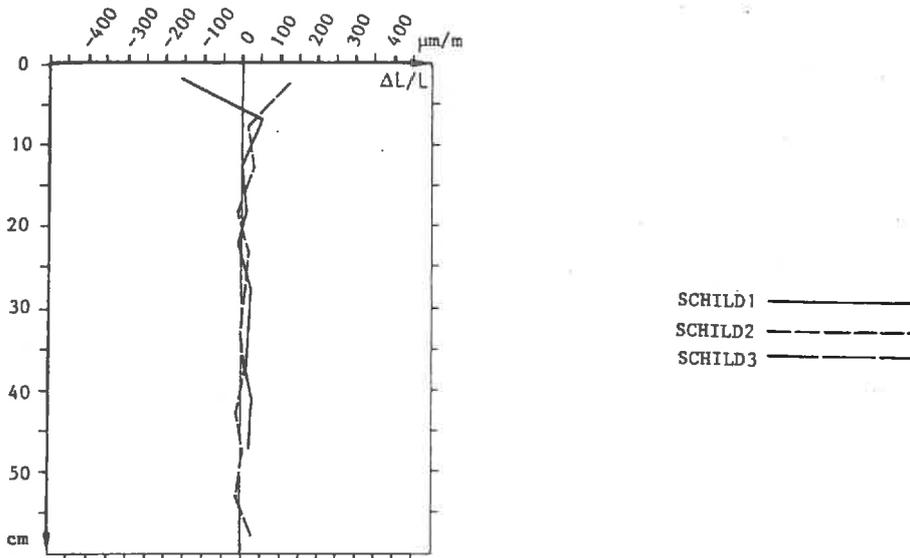


fig. 7.7 Evolution des déformations au cours de la fonte de fin janvier : 21/01/85 - 3/02/85.

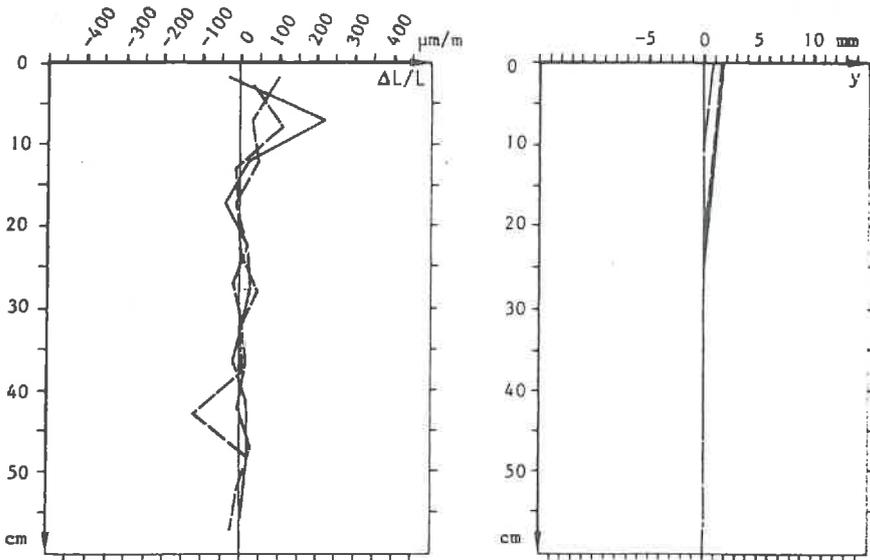


fig. 7.8 Evolution des déformations et des déplacements au cours de la fonte de neige de fin mars : 18/03/85 - 27/03/85.

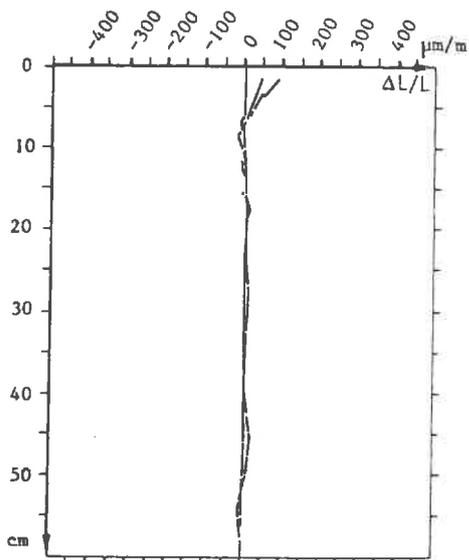


fig. 7.12 Evolution des déformations liées à un orage : 26/07/85 - 29/07/85.

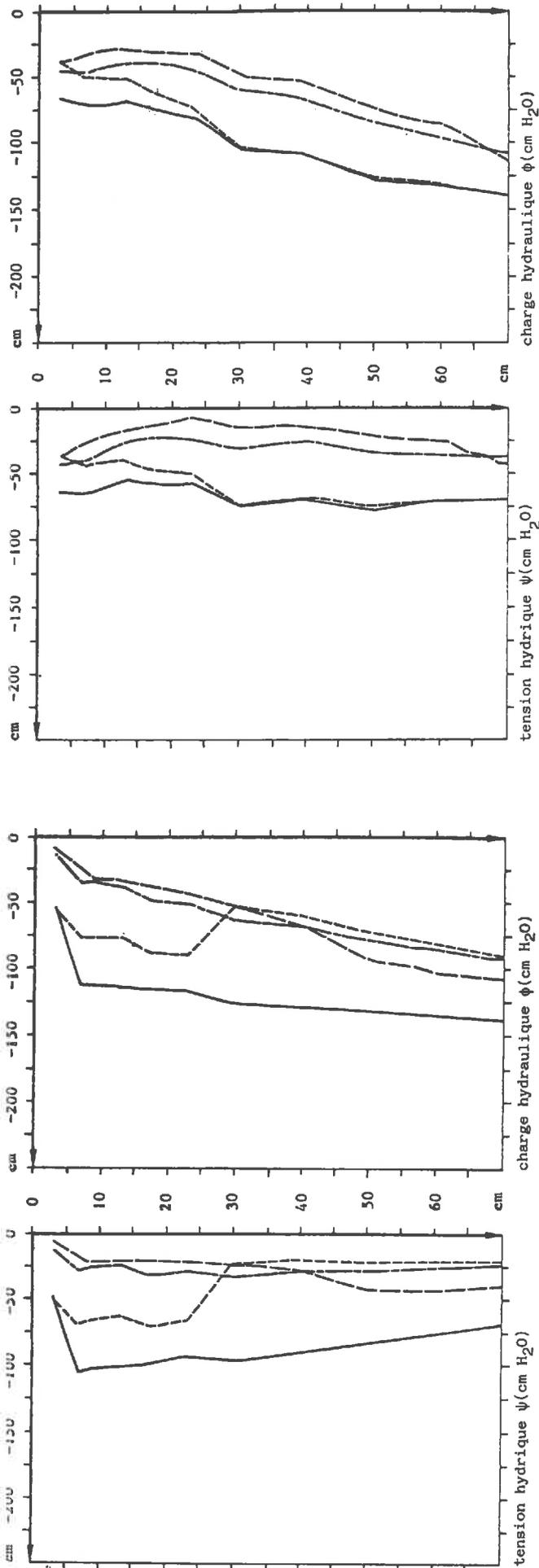


fig. 7.9 Evolution des conditions hydriques du sol : 21/01/85 - 3/02/85

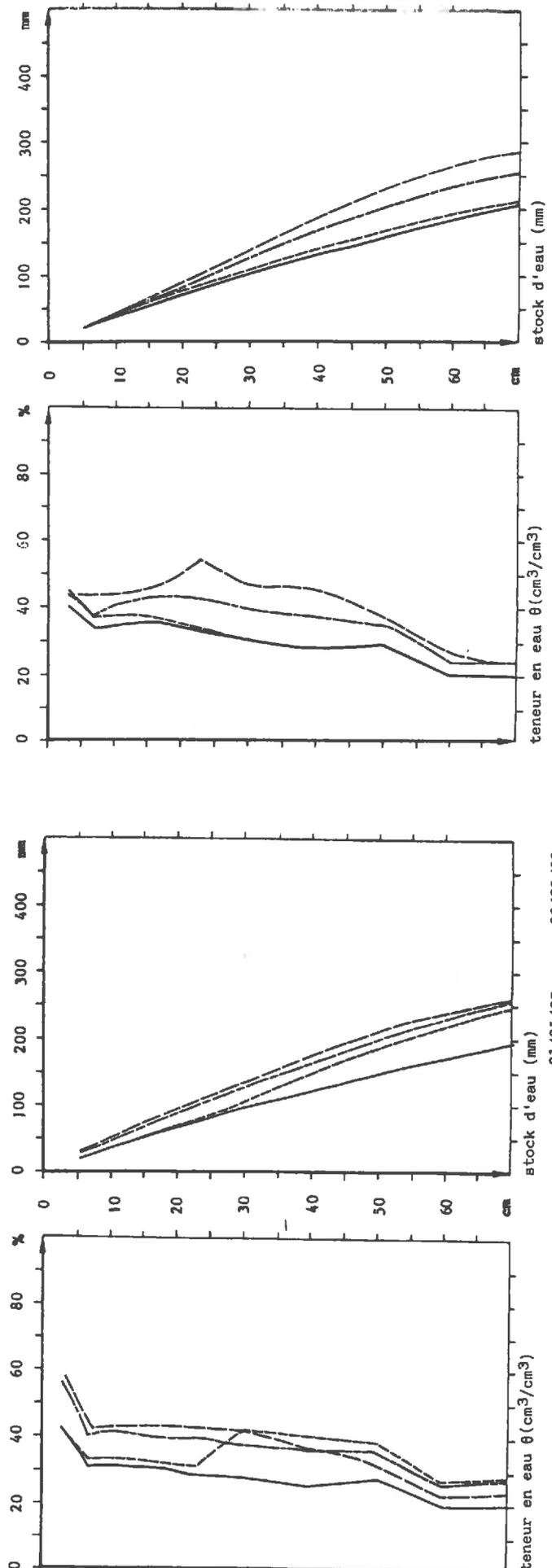


fig. 7.10 Evolution des conditions hydriques du sol : 18/03/85 - 1/04/85

7.3.4 Episodes pluvieux et précipitations orageuses :

Aucun des épisodes pluvieux importants -en novembre, en avril ou en juin- n'a produit des déplacements significatifs. Ils ont pourtant considérablement humidifié le profil (fig. 7.11), mais cette humidification forte n'a probablement pas été assez durable.

A l'opposé, le seul orage - d'intensité pourtant relativement faible (10 mm au sol en une seule journée) - qui ait été observé au cours du mois de juillet a produit un effet sur le niveau de surface de chacun des trois capteurs (fig. 7.12). Cette évolution n'est cependant pas assez importante pour se traduire par un déplacement significatif.

Compte tenu de l'assèchement antérieur considérable du profil (fig.7.13), cette évolution peut correspondre à un léger gonflement de l'horizon organique, peut-être même limité à l'interface litière/sol : les précipitations arrivées au sol au cours de cette journée n'ont pas pénétré au-delà des premiers centimètres.

7.3.5 Les évènements résiduels :

Un certain nombre d'évolutions significatives des déformations se sont en outre produites sur un seul des trois capteurs.

Les plus marquantes sont celles :

- du 3 décembre 1984, sensible à tous les niveaux du capteur SCHILD2,
- du 1er janvier 1985, pour le capteur SCHILD3,
- du 22 avril, sensible uniquement en surface et pour le capteur SCHILD3.

Cette dernière déformation, liée à la chute d'une branche sur l'extrémité du capteur a été rapidement compensée lorsque la branche a été enlevée.

Les autres évolutions n'ont pu être reliées à des conditions hydriques ou thermiques particulières.

Il y a donc un certain aspect "aléatoire" des déplacements qui n'ont pas pu être mis en relation avec des conditions particulières. En analysant uniquement les évènements où les trois capteurs montraient la même tendance, on évite les erreurs d'interprétation. L'objectif que nous nous étions fixé était une analyse des rapports entre la reptation et les conditions hydriques et thermiques du sol : aucun autre élément qui permettrait une analyse de ces évènements résiduels n'est maîtrisé, particulièrement dans ce type de milieu très hétérogène.

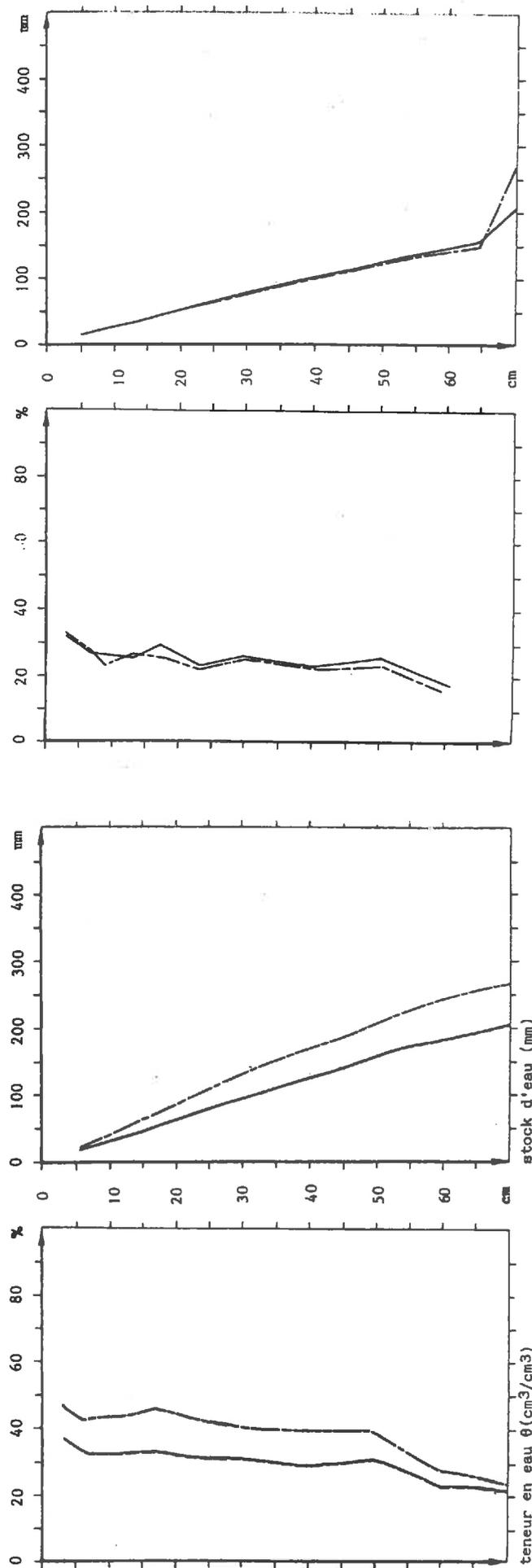
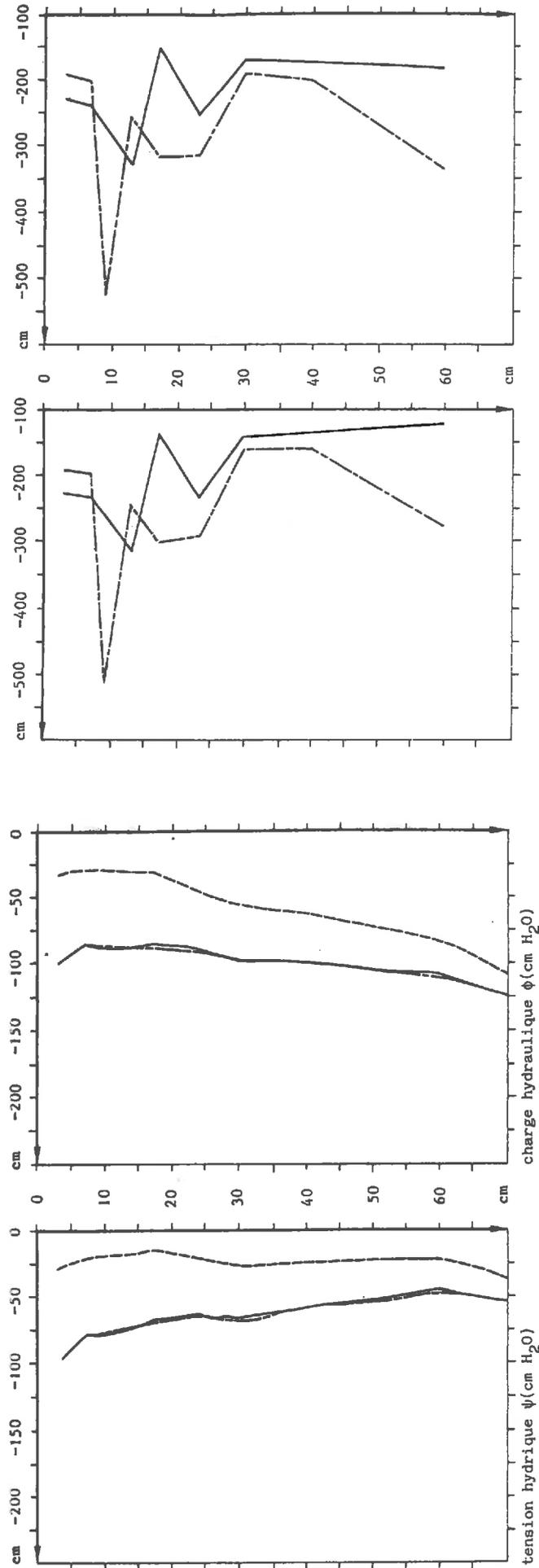


fig. 7.13 Evolution des conditions hydriques du sol 22/07/85 - 29/07/85

fig. 7.14 Evolution des conditions hydriques du sol 06/04/85 - 14/04/85

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Les mesures effectuées au cours de la période de novembre 1984 à juillet 1985 mettent en évidence le caractère très discontinu, concentré sur de très courtes périodes, des déplacements par reptation au site de Schildmatt. Ceux-ci sont liés aux conditions hydriques et thermiques du sol. La forte relation entre l'humidité et les déplacements, évoquée traditionnellement et montrée statistiquement (ANDERSON et COX, 1983), est en fait complexe. En effet, la confrontation entre l'évolution de la déformation du profil de sol et les conditions hydriques indique que, pour qu'un déplacement se produise, il ne suffit pas que le sol atteigne un état proche de la saturation, mais il faut encore que cet état soit maintenu pendant un certain temps.

La comparaison entre les deux épisodes de fonte est, à cet égard, très démonstrative. En janvier, la neige étant restée au sol sans fondre pendant tout le mois, le sol était ressuyé au début de la fonte, et l'eau de fusion a d'abord resaturé le profil; en mars, par contre, l'enneigement ayant été moins durable et les températures moins froides, le sol déjà très humide avant la chute de la neige l'est resté jusqu'au début de la fonte. Si l'état hydrique du sol était très comparable en fin de fonte, l'évolution a été très différente pendant la fonte. Or seule la fonte de fin mars a été à l'origine d'un déplacement de 1 à 2 mm en surface.

Par ailleurs, les nombreuses mesures effectuées au cours des mois de novembre 1984 à juillet 1985 ont montré que les épisodes à précipitations relativement importantes n'ont pas été marqués par des déplacements : le sol n'a alors jamais été maintenu dans un état proche de la saturation.

Dans ce type de milieu très filtrant, où l'eau circule rapidement quand le sol est très humide, seul un type d'enneigement peu durable, suivi d'une fonte brutale provoquée par des précipitations intenses, a pu être à l'origine d'une évolution des conditions hydriques favorable à la reptation et à un effet durable sur la déformation du profil de sol.

C'est également un état très humide du sol qui a favorisé la formation et la croissance des lentilles de glace lors du gel intense de février. Mais la température exerce en outre probablement un rôle important sur la viscosité et le comportement mécanique du sol, particulièrement des horizons superficiels à forte teneur en matière organique. Cet aspect n'a pu être abordé, faute de connaissances dans ce domaine actuellement.

CONCLUSION GENERALE : DISCUSSION DES RESULTATS.

La reptation apparait comme le résultat d'interrelations complexes à l'intérieur d'un milieu considéré en général comme stable. Déjà, l'étude de la reptation continue a permis de montrer que de tels déplacements pouvaient précéder ou suivre des glissements de terrain (SKEMPTON, 1964). La connaissance des mécanismes de la reptation dite saisonnière permettrait de mieux comprendre le comportement et l'évolution de ces milieux dits stables.

Le déplacement global mesuré de novembre 1984 à juillet 1985 au site de Schildmatt est de l'ordre de 3 mm en surface. Ce résultat correspond bien à l'ordre de grandeur donné dans la bibliographie pour les régions tempérées (RICE, 1981 ; JAHN, 1984). Cette faible amplitude des déplacements, à l'échelle annuelle, ne doit pas amener à négliger le processus ; les mesures effectuées sur de plus longues périodes par YOUNG (1978) et JAHN (1981) suffisent - si c'était encore nécessaire - à démontrer l'importance de la reptation : quelques millimètres par an, cela fait plusieurs centaines de mètres au bout de cent mille ans. A une échelle de temps géologique, la relative continuité du déplacement fait de la reptation un processus géomorphologique qui pourrait s'avérer aussi efficace, dans certains milieux, que des processus plus importants à court terme, mais plus sporadiques.

Cependant, son rôle réel dans le façonnement des versants - souvent discuté (GILBERT, 1909 ; MOSLEY, 1973) - ne peut être réellement apprécié tant que les lois physiques de ces déplacements ne seront pas connues.

Il n'y a pas de consensus, dans la bibliographie, sur la part des différentes causes évoquées - gravité, variations de température et d'humidité, changement d'état de l'eau dans le sol, activité biologique - ni sur les paramètres pseudoconstants, tels la pente et les caractéristiques physiques du sol, qui exercent une influence sur ces causes.

En ce qui concerne la pente, les résultats sont contradictoires : les déplacements vers l'amont mesurés par plusieurs auteurs (KIRKBY, 1967 ; FINLAYSON, 1981 ; GEISSERT, 1981) ne peuvent être négligés.

Le rôle des caractéristiques physiques et mécaniques n'est pas clairement précisé : si les sols à forte teneur en argile présentent apparemment une plus grande sensibilité à ce type de déplacements, nos résultats montrent qu'un matériel à texture sablo-limoneuse peut également être soumis à la reptation. Le fait même que les résultats obtenus dans différentes zones climatiques soient surtout comparés par leurs ordres de grandeurs moyens témoigne du peu de connaissances que l'on a des mécanismes réels.

Etudier les mécanismes de la reptation présente donc un double intérêt ; leur connaissance permettra de mieux comprendre :

- à une échelle de temps réduite, certaines interactions sol-climat et leur rôle dans le fonctionnement des versants,
- à une échelle plus vaste, le rôle de ce processus dans l'évolution des versants.

La confusion évidente qui ressort de la bibliographie à propos de la reptation semble liée à la fois à un problème de démarche et de technique.

La démarche

Si l'on veut pouvoir dépasser les évaluations sous forme d'ordre de grandeur moyen, il est nécessaire d'étudier les déplacements et leurs causes évoquées à des échelles temporelles et spatiales comparables :

- si le climat et les déplacements sont liés, il faut étudier leur évolution respective à une même échelle temporelle,

- la méconnaissance de la variabilité spatiale des déplacements implique de travailler à une échelle spatiale où l'on peut faire l'hypothèse de l'homogénéité des conditions.

Les travaux sur la reptation prennent trop souvent en compte des données climatiques ponctuelles, établies en des postes d'observation assez distants des sites de mesures, et non des données microclimatiques du site lui-même. En outre, alors que les causes hydriques et thermiques sont très souvent évoquées, le suivi simultané des conditions hydriques et des déformations du sol le long d'un profil n'a, à notre connaissance, pas été réalisé jusqu'à présent.

Enfin, pour comprendre les évolutions elles-mêmes, il est nécessaire d'associer, au suivi des déplacements et du microclimat, une caractérisation la plus complète possible du sol : physique, hydrodynamique et mécanique. Mais une telle démarche suppose d'abord de pouvoir suivre l'évolution des déplacements et de disposer d'instruments adaptés.

Technique de mesure de la reptation

L'inconvénient majeur de la plupart des techniques existantes est soit de ne pas permettre un suivi fréquent - donc à l'échelle temporelle qui nous intéresse -, soit de ne pas permettre un suivi du profil - donc une appréhension réelle du phénomène à l'intérieur du sol. Notre choix s'est porté sur l'utilisation des méthodes extensométriques, dont l'intérêt est de fournir une mesure précise sous forme de signal électrique : la mesure peut donc être réalisée à n'importe quel pas de temps et à une certaine distance - elle est ainsi peu perturbatrice.

Nous pouvions nous appuyer sur les utilisations antérieures de ces méthodes pour la mesure de la reptation, et plus particulièrement sur celles de GEISSERT et MERCIER (1980). Le capteur que nous avons conçu se distingue néanmoins nettement des leurs par sa conception et par sa réalisation technique :

- plus souple, suffisamment pour ne pas opposer de résistance au déplacement du sol - ce qui a été testé - ; la mesure de la déformation des jauges doit permettre de mesurer uniquement la flexion de la lame,
- ancré à la base, dans des formations stables, et non par sa partie aérienne, pour ne pas perturber les mesures en surface,

- avec une répartition régulière des jauges de part et d'autre le long de la lame : une telle répartition permet de réaliser un dépouillement uniquement géométrique, et aucune hypothèse n'est faite quant au comportement différent des horizons pédologiques ;
- les types de jauges, de colle et de protection retenus doivent en augmenter la durée de vie : l'intérêt des capteurs, pour ce type de recherche, sera encore confirmé si leur durée de vie est supérieure à deux ou trois ans.

L'insertion d'un prototype dans un modèle réduit de versant soumis à des cycles de gel-dégel a permis de vérifier le bon fonctionnement du capteur et la cohérence entre les déplacements reconstitués par la procédure de dépouillement et mesurés en surface.

Enfin, des tests multiples ont été effectués pour déterminer la précision des mesures ainsi que de la procédure de dépouillement et en déduire des règles d'interprétations des résultats.

Les résultats

Trois de ces capteurs, à jauges d'extensométrie ont été insérés dans le sol au site de Schildmatt. Le résultat global (3 mm en surface) établi pour la période des mesures (novembre 1984 - juillet 1985) masque en réalité l'aspect très discontinu des déplacements. Ce déplacement est en effet essentiellement dû à deux événements climatiques, l'engel et le dégel du sol en février et la fonte de neige de fin mars. En outre, les déformations du profil ont été nettement plus importantes au cours de ces événements climatiques, puisque les déplacements en surface ont pu dépasser 10 mm : ces déformations sont donc en grande partie réversibles, et ce n'est qu'à cette occasion que des déplacements vers l'amont ont été mesurés.

Malgré la courte durée de la période de mesure, la dépendance par rapport aux événements climatiques est donc évidente. Cependant, la relation entre l'évènement climatique lui-même et le déplacement est plus complexe qu'elle n'est généralement présentée dans la bibliographie : les mesures ont montré qu'aucun déplacement n'a été produit par

- la fonte de fin janvier, pourtant plus importante que celle de fin mars,
- les précipitations importantes de fin novembre et fin avril,
- le gel intense et prolongé de janvier, sur sol couvert de neige.

Si la fonte de fin mars a eu un effet, c'est parce qu'au départ le sol était déjà très humide et si le gel de février a provoqué un développement important des lentilles de glace, c'est parce que le sol, très humide au départ, n'était pas protégé par la neige.

Les mesures effectuées montrent l'importance des conditions microclimatiques du sol initiales et donc de leur histoire : suivre in situ leur évolution est donc essentiel pour la compréhension des mécanismes.

Les évolutions plus importantes sur de courtes périodes montrent que la base de la déformation liée à la fonte de la neige correspond à la base des horizons A, qui peut être une zone de ralentissement dans le drainage du profil. La déformation du profil au cours de la fonte n'a ainsi affecté qu'une épaisseur inférieure à vingt centimètres et ceci semble bien lié à la stratification pédologique. Par contre, la base de la déformation liée à l'engel et au dégel du sol a été nettement plus profonde : les mesures indiquent qu'elle s'est située légèrement en dessous de la profondeur atteinte par le front de gel.

Aucune forme caractéristique du profil de déplacement, permettant de confirmer l'un ou l'autre modèle de reptation, n'a pu réellement être mise en évidence : la durée de la période de mesure est encore trop restreinte, et le déplacement en surface est trop faible pour qu'une allure éventuellement incurvée soit reconstituée de manière certaine. Cependant, il semble que, pour l'instant, les déplacements les plus importants soient localisés en surface, et non pas légèrement en dessous, comme le prévoit le modèle de KIRKBY (1967) et les mesures obtenues par d'autres auteurs (JAHN, 1974) : ceci peut être lié d'une part à l'importance de la cryoreptation dans la reptation au cours de la période prise en compte et, d'autre part, à l'absence de chevelu racinaire dense dans les premiers centimètres de sol.

Le site de Schildmatt correspond à une formation sablo-limoneuse chargée en éléments grossiers et en blocs, sur laquelle s'est développée un sol brun ocreux, dont les horizons A ont une très forte teneur en matière organique. Ce type de formation est assez répandu sur les versants des massifs anciens des régions tempérées. Du fait de l'hétérogénéité spatiale de ces formations de pente, il faudrait pouvoir tester la représentativité, à l'échelle du versant, de ces mesures locales de reptation, qui à l'échelle du site se sont avérées assez similaires. Néanmoins, les mesures effectuées soulèvent des

questions quant à la nature réelle de la reptation sur ce type de versant : leurs formes actuelles, héritées des périodes froides, seraient encore actuellement retouchées par des processus de type périglaciaire. La question avait déjà été soulevée par BLACK (1969) pour un versant situé dans le Wisconsin (43°lat N), mais où le sol pouvait fréquemment geler sur une épaisseur importante.

Certains processus actifs sur ce type de versants stables, d'exposition nord, constitueraient ainsi une transition entre les processus des régions froides et ceux des régions tempérées, et ce, malgré leur localisation incontestable dans la zone tempérée.

La cryoreptation, même si elle est faible à long terme, ne peut être négligée et, comme elle peut affecter, semble-t-il, une épaisseur plus importante que la reptation d'origine hydrique, son efficacité globale pourrait être ici du même ordre de grandeur. Mais pour confirmer ces indications, il faudra poursuivre les mesures sur une plus longue période. Il n'a pas été possible de mettre en évidence des structures micromorphologiques caractéristiques, mais cela n'est pas surprenant : compte tenu de la rareté du phénomène, celles-ci ne peuvent être conservées. Il faut en effet remonter à l'hiver 1939/40 pour retrouver un gel de cette intensité et de cette durée alors que le sol n'était pas couvert de neige.

Seule une fonte de neige, consécutive à un enneigement de courte durée, et provoquée par des précipitations importantes, a été à l'origine de déplacements significatifs : mais ce type d'enneigement est fréquent en moyenne montagne des régions tempérées, où ce type de formations filtrantes recouvre souvent les versants. Ces indications devront également être confirmées par la poursuite des mesures

Il faudrait également situer les résultats par rapport aux autres transferts de matières solides, dont il faudrait effectuer un inventaire complet et des mesures. Lors des passages répétés sur le terrain, nous avons observé que les châblis étaient de loin le processus le plus catastrophique, capable de mobiliser localement plusieurs mètres cubes (PESCATORE, 1984). D'autre part, malgré l'épaisseur de la litière, le volume des matières minérales déplacées par l'impact des gouttes de pluie paraît relativement important. L'absence de mesure de ces autres déplacements ne permet pas de comparer leurs parts respectives et celle de la reptation.

Enfin, s'il a été possible dans ce travail de confirmer et d'analyser certains de ces facteurs, les mécanismes en jeu restent encore mal connus, faute de théorie du comportement des milieux anisotropes adaptée aux sols naturels et surtout aux horizons organiques. Il semble indispensable d'appliquer à d'autres milieux la même démarche -impliquant une caractérisation texturale, mais aussi hydrodynamique, thermique et si possible mécanique- pour recenser tous les facteurs pouvant influencer la reptation. Ce n'est que l'identification, suivant les types de milieux, des séquences climatiques efficaces pour les déplacements qui permettra de guider les nécessaires expérimentations au laboratoire - sur modèle réduit de versant- pour aboutir à une bonne compréhension et, à terme, à la modélisation du processus.

Appliquée à la seule reptation dans le cadre de ce travail, une telle démarche, associant des mesures précises et fréquentes des déplacements et du microclimat, une caractérisation complète des milieux, ainsi que des expérimentations en laboratoire, semble également intéressante pour d'autres processus d'érosion où intervient, au moins partiellement, un mouvement de masse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADJIZIAN J., 1985 : L'enneigement dans le massif Vosgien. Mémoire de Maîtrise géographie physique, ULP Strasbourg.
- AHNERT F., 1967 : The role of the equilibrium concept in the interpretation of landforms of fluvial erosion and deposition. In "L'évolution des versants", Univ. Liège, Slopes Comm. Rep., vol. 5 : 23-41.
- AHNERT F., 1970 : A comparison of theoretical slope models with slopes in the field. Z. Geomorph. , Suppl. Bd. 9 : 88-101.
- AHNERT F., 1976 : Darstellung des Struktureinflusses auf die Oberflächenformen im theoretischen Modell. Z. Geomorph. , Suppl. Bd. 24 : 11-22.
- AMBROISE B., 1978 : Modèles mathématiques dynamiques en Géographie Physique. Revue Géog. de l'Est, vol. 3 : 149-167.
- AMBROISE B., 1980 : Structure temporelle des précipitations dans la région de Sultzeren (Haut-Rhin) - premiers résultats -. Rech. Géogr. à Strasbourg, vol. 13/14 : 85-94.
- AMBROISE B., 1982 : Première caractérisation hydrodynamique des formations superficielles et des sols des bassins de la Petite Fecht et du Ringelbach. II - Ajustement des courbes de rétention hydrique et estimation des courbes de conductivité hydraulique relative. Rech. Géogr. à Strasbourg, vol. 19/20/21 : 139-146.
- AMBROISE B., 1982 : Modèle hydrodynamique de la circulation verticale de l'eau dans le sol. Rech. Géogr. à Strasbourg, vol. 19/20/21 : 147-154.
- AMBROISE B., AMIET Y., MERCIER J.L., 1984 : Spatial variability of soil hydrodynamic properties in the Petite Fecht catchment at Sultzeren, France. Preliminary results. In BURT & WALLING, "Catchment experiments in Fluvial Geomorphologie", Norwich (GB), Geo books : 35-53.
- AMBROISE B., VIVILLE D., 1983 : Spatial variability of textural and hydrodynamical properties in a soil unit of the Ringelbach study catchment, Vosges (France). 6ème colloque "The role of geomorphological field experiments in land and water managements" de la Commission "Expérimentation de Terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Bucarest (R), 25/8-3/9/1983. A paraître dans Z. Geomorph. , Suppl. Bd.
- AMIET Y., 1980 : Méthode d'approche de la spatialisation des caractéristiques hydrodynamiques des formations superficielles ; exemple du haut bassin de la Petite Fecht (Haut-Rhin). Th. 3ème cycle Géogr. Phys. ULP Strasb., 113p.
- AMIET Y., AMBROISE B., MERCIER J.L., 1982 : Première caractérisation des formations superficielles et des sols des bassins de la Petite Fecht et du Ringelbach. I - Détermination des courbes de rétention hydrique. Rech. Géogr. à Strasbourg, vol. 19/20/21 : 129-138.
- AMIET Y., MERCIER J.L., 1982 : Inventaire, description et cartographie des formations superficielles et des sols des bassins de la Petite Fecht et du Ringelbach. Rech. Géogr. à Strasbourg, vol. 19/20/21 : 41-52.
- ANDERSON E.W., COX N.J., 1978 : A comparison of different instruments for measuring soil creep. CATENA, vol. 5 : 81-93.

- ANDERSON E.W., COX N.J., 1983 : An assesment of soil movement time series from Brandon, County Durham, U.K. 6ème colloque "The role of geomorphological field experiments in land and water managements" de la Commission "Expérimentation de terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Bucarest (R),25/8-3/9/1983.
- ANDERSON E.W., COX N.J., 1984 : The relationship between soil creep rate and certain controlling variables in a catchment in upper Weardale, Northern England. In BURT & WALLING, "Catchment experiments in Fluvial Geomorphology". Norwich (GB), Geo-books :
- ANDERSON E.W., FINLAYSON B., 1975 : Instruments for measuring soil creep. British Geom. Res. Group., Techn. Bull. vol. 16, 51p.
- ANDERSON M.G., BURT T.P., 1977 : Automatic monitoring of soil moisture conditions in a hillslope spur and hollow. J. of Hydr. vol. 33 : 27-36.
- ANDERSON M.G., BURT T.P., 1981 : Methods of geomorphological investigation ; Process determination in time and space. In GOUDIE "Geomorphological Techniques", London, Allen & Unwin : 3-21.
- ANDERSSON J.G., 1906 : Solifluction, a component of subaerial denudation. J. of Geol. vol. 14 : 91-112.
- ARMSTRONG A.C., 1980 : Soils and slopes in a humid temperate environment. A simulation study. CATENA, vol. 7 : 327-338.
- AUSSENAC G., BOULANGEAT T.C., 1980 : Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus silvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* "Mirb. Franco"). Ann. Sc. Forest. vol. 37(2) : 91-107.
- AUZET A.V., 1982 : Les déplacements par reptation en région tempérée : exemple du bassin versant de la Petite Fecht, les sites de Geisberg et Schildmatt. Rapport de DEA, ULP Strasbourg, 75p.
- AUZET A.V., 1982 : La mesure du creep : mise au point bibliographique. Rech. Geogr. à Strasbourg, vol. 19/20/21 : 211-218.
- AUZET A.V., AMBROISE B., MERCIER J.L., 1984 : Réalisation et test d'un capteur flexible à jauges d'extensométrie pour la mesure des profils de reptation et le suivi de leur évolution. 7ème colloque de la Commission "Expérimentation de Terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Strasbourg-Heidelberg, 19-25/8/1984. A paraître dans Z. Geomorph., Suppl. Bd.
- AVENARD J.M., 1962 : La solifluxion ou quelques méthodes de mécanique des sols appliquées au problème géomorphologique des versants. Travaux du Lab. de Géogr. Phys., C.G.A., Paris, SEDES, 164p.
- AVRIL J., 1984 : Encyclopédie Vishay de l'analyse des contraintes. Vishay Micro-mesures, 533p.
- BAGUELIN F., JEZEQUEL J.F., 1972 : Etude expérimentale du comportement des pieux sollicités horizontalement. Bull. de liaison L.P.C., vol. 62 : 129-170.
- BALTEANU D., 1983 : Experimentul de teren în geomorfologie. Aplicatii la Subcarpatii Buzaului. Bucarest, Editura Acad. Rep. Soc. România : 87-149.
- BARR D.J., SWANSTON D.N., 1970 : Measurement of creep in a shallow slide-prone till soil. Am. J. of Sc. vol. 269 : 467-480.
- BENEDICT J.B., 1970 : Downslope soil movement in a Colorado Alpine Region : rates, processes and climatic significance. Arctic and Alpine Res. vol. 2(3).

- BIROT P., 1970 : Etude quantitative des processus érosifs agissant sur les versants. Z. Geomorph. , Suppl. Bd. 9 : 10-43.
- BISHOP A.W., 1966 : The strength of soil as engineering materials. Geotechnique, vol. 16 : 91-130.
- BISHOP A.W., BLIGHT G.E., 1963 : Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. Geotechnique, vol. 13 : 177-197.
- BISHOP A.W., MORGENSTERN N.R., 1960 : Stability coefficients for earth slopes. Geotechnique, vol. 15 : 1-34.
- BLACK R.F., 1969 : Slopes in southwestern Wisconsin, U.S.A., periglacial or temperate ? Biul. Perygl. vol. 18 : 69-82.
- BLACKWELL C.C., KIRKLAND J.T., BLACKWELL A.L., KIRKLAND L.L., 1979 : A mathematical model for predicting the dynamics of expansive soil desiccation due to the transpiration of trees. Abs. Am. Soc. Adv. Sci. Ann. Mtg. Prog. with Abs., Houston . Cité dans KIRKLAND & ARMSTRONG, 1982.
- BONNEAU M., SOUCHIER B., 1979 : Pédologie t,II : Constituants et propriétés du sol. Sous la direction de DUCHAUFOR et SOUCHIER. Paris, MASSON, 459p.
- BROMHEAD E.N., 1979 : Factors affecting the transition between the various types of mass movements in coastal cliffs consisting largely of overconsolidated clay, with special reference to southern England. Quaterly J. of Eng. Geol. vol. 12 : 291-300.
- BURT T.P., 1978 : An automatic fluid-scanning switch tensiometer system. British Geom. Res. Group, Techn Bull. vol. 21, 30p.
- BURT T.P., 1981 : Factors influencing the growth of miniature ice lenses. Earth Surf. Proc. vol. 6 : 179-182.
- BURT T.P., WILLIAMS P.J., 1976 : Hydraulic conductivity in frozen soils. Earth Surf. Proc. vol. : 349-360.
- CAILLEUX A., TRICART J., 1956 : Le problème de la classification des faits géomorphologiques. Ann. de Géographie vol. 65 : 162-186.
- CAINE T.N., 1963 : Movement of low angle scree slopes in the Lake District Northern England. R.G.D. vol. 14 : 171-177.
- CAINE T.N., 1982 : The spatial variability of surficial soil movement rates in alpine environments. In Thorn "Space and Time Geomorphology", London, Allen & Unwin.
- CAMBEFORT H., 1971 : Introduction à la Géotechnique. Paris, Eyrolles.
- CAPPS S., 1941 : Observations of the rate of creep in Idaho. Am. J. of Sc. vol. 239 : 25-33.
- CAQUOT A., KERISEL J., 1966 : Traité de Mécanique des Sols. Paris, Gauthier-Villars.
- CARBIENER R., 1963 : Les sols du massif du Hohneck. In "Le Hohneck", Assoc. Philomatique d'Alsace-Lorraine : 103-154.
- CARBIENER R., 1966 : Relations entre cryoturbation, solifluxion et groupements végétaux dans les Hautes Vosges. Oeco. Planta. : 335-368.

- CARSON M.A., 1971 : The mechanics of erosion. London, Pion Limited, 174p.
- CARSON M.A., 1979 : Slopes and slope processes. Oxford, Progress in Physical Geography vol. 3(1) : 132-141.
- CARSON M.A., KIRKBY M.J. : Hillslope form and processes. Cambridge University Press, 396p.
- CARTIER G., 1981 : Recherches et études sur les glissements de terrains. Bull. de liaison L.P.C. vol. 115.
- CATIER E., 1978 : La mesure des températures. EAI vol 259(1) : 47-56.
- CASAGRANDE A., 1947 : Classification and identification of soils. Proc. A.S.C.E. 783-810.
- CHAMBERLAIN E.J., GOW A.J., 1979 : Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. Eng. Geol. vol. 13 : 73-92.
- COSTET J., SANGLERAT G., 1981 : Cours pratique de mécanique des sols. Plasticité et calcul des tassements. Paris, Dunod, 283p.
- COUCHAT P., 1977 : Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols. Ann. Agron. vol. 28(5) : 477-488.
- COX N.J., 1977 : Climatic geomorphology and fully developed slopes : a discussion. CATENA vol. 4 : 229-231.
- CULLING W.E.H., 1963 : Soil creep and the development of hillside slopes. J. of Geol. vol. 71 : 127-161.
- CULLING W.E.H., 1965 : Theory of erosion on soil covered slopes. J. of Geol. vol. 73 : 230-254.
- CULLING W.E.H., 1981 : New methods of measurement of slow particulate transport processes on hillside slopes. In "Erosion and Sediment Transport Measurement" Proceedings of the Florence Symposium, June 1981. I.A.H.S. publ. n°133 : 267-274.
- CULLING W.E.H., 1983 : Slow particulate flow in condensed media as an escape mechanism : mean translation distance. In DE PLOEY "Rainfall simulation runoff and soil erosion", CATENA suppl. 4 : 161-190.
- CULLING W.E.H., 1983 : Rate process theory in geomorphic soil creep. In DE PLOEY "Rainfall simulation runoff and soil erosion", CATENA suppl. 4 : 191-214.
- CULLING W.E.H., 1983 : Steady State Distributions in the Measurement of Soil Creep. Geographical Analysis (Ohio State Univ. Press) vol. 15(3) : 212-230.
- CURTIS L.F., TRUDGILL S., 1974 : The measurement of soil moisture. British Geom. Res. Group, Techn. Bull. vol. 13, 70p.
- DAHLQUIST G., BJÖRCK A., 1974 : Numerical methods. London, Prentice-Hall Int. Inc., 573p.
- DAUDET F.A., VACHAUD G., 1977 : La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. Ann. Agron. vol. 28(5) : 503-519.
- DAVIS W.M., SNYDER W.H., 1898 : Physical Geography. Boston, Ginn., cité dans YOUNG 1978.

- DEDKOV A.P., MOSZEHRIN V.I., TCHASOVNIKOVA E.A., 1978 : Field station studie of soil creep in the central Volgaland. Z. Geomorph. , Suppl. Bd. 29 : 111-116.
- DE PLOEY J., MOYERSONS J., 1975 : Runoff creep coarse debris experiments field observations. CATENA vol. 2 :
- DE PLOEY J., SAVAT J., MOYERSONS J., 1976 : The differential impact of some soil factors on flow, runoff creep and rainwash. Earth Surf. Proc. vol. 1(2) : 151-161.
- DIETRICH W.E., DUNNE T., 1978 : Sediment budget for a small catchment in mountainous terrains. Z. Geomorph. , Suppl. Bd. 29 : 191-206.
- DIETRICH W.E., DUNNE T., HUMPHREY N.F., REID L.M., 1982 : Construction of sediment budgets for drainage basins. In SWANSON et al. "Sediment Budgets and Routing in Forested drainage Basins" : 5-22.
- DION J., 1972 : Etude fréquentielle des précipitations mensuelles du Nord-Est de la France. Revue Géogr. de l'Est vol. 2(3) : 176-223.
- DONOGHUE, 1984 : Review and analysis of slow mass movement mechanisms with reference to Weardale catchment, N. England. 7ème colloque de la Commission "Expérimentation de terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Strasbourg-Heidelberg 19-25/8/1984. A paraître dans Z. Geomorph., Suppl. Bd.
- DUCHAUFOR P., 1983 : Pédologie t1 : Pédogénèse et classification. Paris, Masson 2ème édition, 491p.
- DUIJSINGS J., 1985 : Streambank contribution to the sediment budget of a forest stream. Th. Publ. Fys. Geogr. Bodemkundig Lab. Univ. van Amsterdam vol. 40, 190p.
- ELLIS D.S., 1973 : The measurement of soil creep. Unpubl. B. Sc. project A21, Dep. of Physics., Univ. of Bristol (UK), cité dans ANDERSON et FINLAYSON, 1975.
- EMBLETON C., BRUNSDEN D., JONES D.K.C., 1978 : Geomorphology : present problems and future prospects. Oxford University Press, 281p.
- EMMETT W.W., LEOPOLD L.B., 1967 : Pits with emplaces rod or plates. On the observation of soil movement in excavated pits. R.G.D. vol. 17(4) : 157-158.
- ERA 569 du CNRS, 1982 : Structure et fonctionnement du milieu naturel en moyenne montagne. Bassins de la Petite Fecht et du Ringelbach (Vosges-France) Rech. Geogr. à Strasbourg vol. 19/20/21, 276p.
- EVANS R., 1967 : Inclinomètres or T-bars. Rev. Géom. Dyn. 17(4) : 176-177.
- EYLES R.J., HO R., 1970 : Soil creep on a humid tropical slope. The Journal of Tropical Geography : 40-43.
- FENELON J.P., 1981 : Qu'est-ce que l'Analyse des Données ? Paris, Lefonen, 311p.
- FENNEMANN N.M., 1908 : Some features of erosion by unconcentrated wash. J. of Geol. vol. 16 : 746-754.
- FINLAYSON B., 1981 : Field measurements of soil creep. Earth Surf. proc. and Landforms vol. 6 : 35-48.
- FINLAYSON B., OSMASTON H., 1977 : An Instrument System for Measuring Soil Movement. British Geom. Res. Group, Techn. Bull. 19, 33p.
- FINLAYSON B., STATHAM I., 1980 : Hillslope analysis. Source and methods in Geography. London, Butterworths, 232p.

- FITZSIMMONS D.W., YOUNG N.G., 1972 : Tensiometer-pressure transducers for studying unsteady flow through soil. Transactions American Society of Agricultural Engineers vol. 15 : 272-275.
- FLAVELL W.S., 1984 : Field investigation of soil movement - A different approach. 7ème colloque de la Commission "Expérimentation de Terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Strasbourg-Heidelberg 19-25/8/1984. A paraître dans Z. Geomorph., Suppl. Bd.
- FLEMING R.W., 1975 : Instrument for measuring seasonal soil creep. Bull. for Ass. of Engineering Geologists vol. 10(2) : 83-93.
- FLEMING R.W., JOHNSON A.M., 1975 : Rates of seasonal creep of silty clay soil. Quaterly J. of Eng. Geol. vol. 8 : 1-29.
- FRENCH H.M., 1976 : Current field measurement concerning the nature and rate of periglacial processes. Result of a survey sponsored. Biul. Perygl. vol. 25 : 79-91.
- GABRIELS D., DE BOODT M., 1975 : Moisture content aggregate stability soil conditioner. CATENA vol. 2 : 23-30.
- GARDNER J., 1969 : Observations of surficial talus movement. Z. Geomorph. vol. 13 : 317-323.
- GAUCHER G., 1981 : Traité de Pédologie Agricole. tII : les facteurs de la pédogénèse. Dison (B), Lelotte, 730p.
- GEISSERT E., 1981 : Mesure de la reptation dans le bassin versant de la Petite Fecht (Haut-Rhin). Elaboration d'un capteur à jauges de contraintes résistives. Th. 3ème cycle Géogr. Phys., ULP Strasbourg, 170p.
- GEISSERT E., MERCIER J.L., 1980 : Premières mesures de creep dans la haute vallée de la Petite Fecht (Vosges). 8ème colloque Mathématiques et Géographie, Besançon.
- GERLACH T., 1967 : On the placement of stakes for measuring downhill creep. Rev. Géom. Dyn. 17(4).
- GILBERT G.K., 1909 : The convexity of hilltops. J. of Geol. vol. 17 : 344-350.
- GODARD A., 1972 : Quelques enseignements apportés par le Massif Central français dans l'étude géomorphologique des socles cristallins. Revue de Géogr. Phys. et de Géol. Dyn. vol. 14(3) : 265-296.
- GODARD A., 1975 : Arènes litées et convois limoneux à blocs sur les versants cristallins des massifs anciens. Etudes Géographiques, Mélanges Viers, Univ. de Toulouse Le Mirail : 283-298.
- GOLDENSTEIN M., TER-STEPHANIAN G., 1967 : The long-term strength of clays and deep creep of soils. Fourth Int. Soil. Rech. and Found. Eng. Proc. vol. 2 : 311-314.
- GOUDIE A. (ed.), LEWIN J., KEITH R., ANDERSON M.G., BURT T.P., WHALLEY B., WORSLEY P., 1981 : Geomorphological Techniques. Edited for the British Geom. Res. Group, London, ALLEN & UNWIN, 395p.
- GOUNOT M., BOUDOT J.P., HOEBLICH J.M., WALTER J.M., 1974 : L'évolution des versants et de la végétation dans le paysage glaciaire du Lac des Truites. Bull. Soc. Hist. Nat. de Colmar vol. 55 : 187-192.

- GRIEVE I.C., 1979 : A comparison of aggregate stability tests procedures in determining the stability of fine soils in Fife Scotland. CATENA vol. 6(2)
- GUENNELON R., CABIBEL B., 1977 : Applications diverses de la méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle et à l'utilisation des réserves hydriques des sols. Ann. Agron. vol. 28(5) : 489-502.
- GUERIF J., 1982 : Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. Agronomie vol. 2(3) : 287-294.
- GUERIF J., FAURE A., 1979 : Rôle de la matière organique sur le comportement du sol au compactage. I : étude statistique. Ann. Agron. vol. 30(5) : 387-400.
- GUERIF J., FAURE A., 1979 : Rôle de la matière organique sur le comportement du sol au compactage. II : matières organiques libres et liées. Ann. Agron. vol. 30(6) : 469-480.
- HABIB P., 1973 : Précis de Géotechnique. Paris, Dunod.
- HADLEY R.P., 1967 : On the use of holes filled with colored grains. R.G.D. vol. 17(4) : 158-159.
- HAEFFELI R., 1965 : Creep and progressive failure in snow, soil, rock and ice. Sixth Int. Conf. Soil. Rech. and Founf. Eng. Proc., vol. 3 : 134-148.
- HAMBURGER J., 1973 : Thermomigration de l'humidité en milieu poreux non saturé. Th. Univ. Scientifique et médicale, Grenoble, 91p.
- HARRIS S.A., 1973 : Studies of soil creep, western Alberta, 1970 to 1972. Arctic and Alpine Res. vol. 5(3) part 2.
- HARRIS C., 1981 : Microstructure in solifluction sediments from South Wales and North Norway. Biul. Perygl. vol. 28 : 221-226.
- HARRIS C. 1981 : Periglacial mass-wasting : a review of research. British Geom. Res. Group Research Monograph vol. 4, Norwich, Geobooks.
- HIGASHI A., CORTE A.E., 1971 : Solifluction, a model experiment. Science vol. 171 : 480-482.
- HILLEL D., 1974 : L'eau et le sol, principes et processus physiques. Leuven, Vander,
- HILLEL D., 1980 : Fundamentals of soil physics. London, Academic Press Inc., 413p.
- HILLEL D., 1980 : Applications of soil physics. London, Academic Press Inc., 385p.
- HIRANO M., 1976 : Mathematical model and the concept of equilibrium in connection with slope shear ratio. Z. Geomorph. , Suppl. Bd. 25 : 1-19.
- HOEBLICH J.M., SCHWING J.F., 1976 : Les versants d'un cirque glaciaire des Hautes-Vosges : Le Forlet. Une diversité de formes et d'évolution post-glaciaire, en relation avec le milieu végétal. Rech. Géogr. à Strasbourg, vol. 1 : 23-37.
- HUMBERT J., 1977 : Contribution à l'étude des transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. Th. 3ème cycle Ecologie Végétale, ULP Strasbourg, 194p.
- HUMBERT J., MERCIER J.L., METTHEY J., 1976 : Modélisation de la dynamique de l'eau dans le sol sur un versant : mise au point. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 1 : 39-80.
- HUMBERT J., PAUL P., 1982 : La répartition spatiale des précipitations dans le bassin versant de la Petite Fecht à Soultzeren (Hautes Vosges) - premiers résultats -. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 85-91.

- HUTCHINSON J.N., 1968 : Mass movement . In FAIRBRIDGE "Encyclopedia of Earth Sciences" , New-York, Rheinhold : 688-695, cité dans EMBLETON et al., 1978.
- IMESON A.C., 1977 : Splash erosion, animal activity and sediment supply in a small forested Luxembourg catchment. Earth Surf. Proc. and Landforms vol. 2 : 153-160.
- IWATA S., 1978 : Soil creep measurements in Khumbu. Seppyo (Snow and Ice) vol. 40, Special issue : 60-68.
- JAHN A., 1954 : Balance de dénudation du versant. Wroclaw, Czasopismo Geogr. 57-64.
- JAHN A., 1963 : Importance of soil erosion for the evolution of slopes in Poland. in Neue Beiträge zur internationalen Hangforschung Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen : 229-237.
- JAHN A., 1964 : Slopes morphological feature resulting from gravitation. Z. Geomorph., Suppl. Bd. 5 : 59-72.
- JAHN A., CIELINSKA M., 1974 : The rate of soil movement in the Sudety Mountains. Report of the Commission on present day geomorphological processes (I.G.U.), Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in Göttingen "Geomorphologische Prozesse und Prozesskombinationen in der Gegenwart unter verschiedenen Klimabedingungen" : 86-101.
- JAHN A., 1981 : Some regularities of soil movement on the slope as exemplified by the observations in Sudety Mountains. Transactions, Japanese Geomorphological Union vol. 2(2) : 321-328.
- JAHN A., 1984 : Slow mass wasting. Communication au 7ème colloque de la Commission "Expérimentation de Terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Strasbourg-Heidelberg 19-25/8/1984.
- JAMAGNE M., 1967 : Bases et techniques d'une cartographie des sols. Ann. Agron. vol. 18, hors série I.N.R.A.
- JANBU N., 1979 : The resistance concept applied to deformations of soils. Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Mexico, vol. 1.
- JOURNAUX A., 1976 : Alternance du ruissellement et de la solifluxion dans les milieux périglaciaires : exemples canadiens et expérimentations. Biul. Perygl. vol. 26 : 269-273.
- JUILLARD E., 1954 : L'enneigement dans les Vosges et dans la plaine d'Alsace. Annales de l'Institut de Physique du Globe, Strasbourg vol. 7, 19p.
- KAISER B., 1980 : Observations et premières mesures sur la gélifluxion en Vanoise : les loupes de Lanserlia (Alpes françaises internes). Z. Geomorph., Suppl. Bd. 35 : 118-141.
- KIRKBY M.J., 1967 : Measurement and theory of soil creep. J. of Geol. vol. 75(4) : 359-378.
- KIRKBY M.J., 1969 : Erosion by water on hillslopes. In Chorley "Water, earth and man", London, Methuen : 229-238.
- KIRKBY M.J., 1976 : Deterministic continuous slope models. Z. Geomorph., Suppl. Bd. 25 : 1-19.
- KIRKBY M.J., 1977 : Soil development models as a component of slope models. Earth Surf. Proc. vol. 2 : 203-230.
- KIRKBY M.J., 1978 : Hillslope hydrology. Chichester, New-York, Toronto, Wiley & Sons, 392p.

- KIRKBY M.J., MORGAN P.C., 1981 : Soil Erosion. Chichester, New-York, Toronto, Wiley & Sons, 312p.
- KIRKLAND J.T., ARMSTRONG J.C., 1982 : Slope movements related to expansive soils on the Backland prairie, North Central Texas. In CRAIG & CRAFT "Applied Geomorphology", Proc. vol. of the 11th annual Binghampton Geom. Symp. 2-5/10/1980 : 85-93.
- KLAER W., KRIETER M., 1982 : Über die Bedeutung des Humus für Bodenerosion und Hangstabilität in den feuchten und wechselfeuchten Tropen von Papura, Neuguinea. Erdkunde vol. 3613 : 153-159.
- KOJAN E., 1968 : Mechanics and rate of natural soil creep. Proc. 1st Sess. Int. Ass. Eng. Geol., Prague : 122-154.
- KOOPMANS R.W., MILLER R.D., 1966 : Soil freezing and soil water characteristics curves. Soil Sc. Soc. of Am. Proc. vol. 30 : 680-685.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1970 : Limites d'Atterberg. Mode opératoire G-4, Paris, Dunod.
- LACROIX R., : Thermomètres à résistance.
- LAFONTAINE M., 1984 : Les fortes précipitations sur le massif Vosgien, relations avec les types de temps. Mémoire de Maîtrise, Géographie Physique, ULP Strasbourg, 200p.
- LAGARDE J. de, 1983 : Initiation à l'analyse des données. Paris, Dunod, 157p.
- LASSERRE S., 1983 : Le climat de Colmar. Mémoire de Maîtrise, Géographie Physique, ULP Strasbourg - I.N.R.A. Colmar.
- LECARPENTIER C., SHAMSI F., 1972 : les régimes pluviométriques dans la France de l'Est. Revue Geogr. de l'Est, vol. 2(3) : 159-174.
- LEOPOLD L.B., EMMETT W.W., 1972 : Some rates of geomorphological processes. Geographia Polonica vol. 23 : 27-35.
- LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G., MILLER J.P., 1964 : Fluvial processes in Geomorphology. San Francisco, Freeman and Cie.
- LEWIS L., 1975 : Slow slope movement in the dry tropics : La Paguera, Porto-Rico. Z. Geomorph., vol. 19 : 334-339.
- MAYER A., 1947 : Sols et fondations. Paris, Armand-Colin.
- MAYER A., 1959 : Précis de Mécanique des sols. Paris, Armand-Colin, 215p.
- MERCIER J.L., 1976 : Simulation digitale de l'évolution géomorphologique d'un versant. Thèse d'Etat, ULP Strasbourg, 300p.
- MERCIER J.L., 1976 : Simulation d'un flux de chaleur dans le sol. 4ème colloque sur l'analyse des données en géographie, Besançon.
- MERCIER J.L., 1977 : Hangstabilitätmessung am Beispiel eines Vogesenhanges (methodologische Aspekte). Z. Geomorph., Suppl. Bd. 28 : 30-41.
- MERCIER J.L., 1978 : Contraintes et déplacements de matières sur versant, mesures et modèles de mécanisme. U.G.I., 5/10/1978, 6p. (livret guide de l'excursion).
- MERCIER J.L., 1980 : Statistiques, systèmes et modèles en géomorphologie. Bull. de l'Ass. des Géographes français, vol. 57(468/469) : 113-118.

- MERCIER J.L., 1982 : Contraintes et déplacements de matières sur versant, mesure d'un mécanisme : le creep. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 219-229.
- MERCIER J.L., 1984 : La latitude équivalente : un indice climatique utilisable en géomorphologie. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 263-266.
- MERCIER J.L., 1984 : La mesure du creep : exemple de fonctionnement d'un système géomorphologique. In GUERMOND "Analyse de système en géographie", Presses Universitaires de Lyon : 147-185.
- MERCIER J.L., GEISSERT E., 1982 : Contraintes et déplacements sur versant, mesure d'un mécanisme : le creep. Premiers résultats. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 231-240.
- MERCIER J.L., VIVILLE D., 1982 : La diffusivité thermique du sol sur le versant du Geisberg. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 185-198.
- MESSER T., 1978 : Caractérisation de l'agressivité climatique de quelques stations du vignoble alsacien. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 9 : 19-28.
- MESSER T., 1978 : L'érosion du sol dans le vignoble alsacien. Etude du facteur climatique et étude expérimentale. Th. 3ème cycle Géogr., ULP Strasbourg, 131p.
- METTAUER H., TUAL Y., HUCK C., TRENDEL R., 1983 : De la connaissance du comportement physique des sols de l'Est de la France. Agronomie vol.3(2) : 141-152.
- MICHAUD J., 1950 : Emploi de marques peintes dans l'étude des mouvements du sol. R.G.D. vol. 1 : 180-189.
- MILLER R.D., 1980 : Freezing phenomena in soils. In HILLEL "Applications of soil physics", London, Academic Press Inc. : 254-318.
- MORAND F., 1978 : L'A.M.E.V., appareillage de mesure pour l'évolution des versants. Communication au 1er colloque de la Commission "Expérimentation de Terrain en Géomorphologie", cité dans KAISER, 1980.
- MOSLEY M.P., 1973 : Rainsplash and the convexity of badland divides. Z. Geomorph. Suppl. Bd. 18 : 10-25.
- NAJJAR G., 1982 : Méthode de cartographie de l'évapotranspiration journalière en moyenne montagne tempérée. Application au bassin du Ringelbach (Hautes-Vosges). Th. 3ème cycle Géogr. phys., ULP Strasbourg, 168p.
- NIEUWENHUIS J.D., KLEINENDORST D., 1971 : The measurement of small soil displacements on a dutch hillslope. Eng. Geol. vol. 5 : 271-289.
- OH K.S., 1985 : Mise en évidence de structures cryogéniques quaternaires dans les formations superficielles de la vallée de la Fecht (Vosges moyennes cristallines). Th. Doctorat, Géogr. Phys., RCP 741 du CNRS - ULP Strasbourg.
- OH K.S., MERCIER J.L., REUTENAUER D., 1984 : Caractéristiques hydrodynamiques d'horizons d'origine cryogénique dans les formations superficielles des Hautes Vosges. 7ème colloque de la Commission "Expérimentation de Terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Strasbourg-Heidelberg 19-25/8/1984.
- OHRUN A., LUTHIN J.N., 1974 : A data acquisition system for transient porous media, experiments in a sector tank. Water Resources Research vol. 10(3) : 601-604.
- ORIOLE , DE BOODT M., 1978 : Thermal properties organic and inorganic substrates. CATENA vol. 5 : 389-

- PAUL P., 1977 : La décroissance de la température avec l'altitude dans les Vosges et la Forêt Noire. Aspects locaux et régionaux. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 4 : 55-67.
- PAUL P., 1977 : Remarques préliminaires à propos de deux climats locaux dans le bassin versant expérimental de Soultzeren (Vosges). Rech. Geogr. à Strasbourg vol. 4 : 93-98.
- PAUL P., 1978 : Le cadre climatique. U.G.I. 5/10/1978, 2p. (livret guide de l'excursion).
- PAUL P., 1982 : Le climat de la vallée de la Fecht. Aspects généraux. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 65-78.
- PAUL P., ROUSSEL I., : Les précipitations exceptionnelles d'avril et mai 1983 à l'origine des fortes crues en Alsace et en Lorraine. Mosella, à paraître.
- PEIGNAUD M., 1970 : Le point sur les inclinomètres. Bull. Liaison L.P.C. vol. 49 : 149-164.
- PERRIER A., 1970 : Méthodes et techniques de mesure des températures. In I.N.R.A. "Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère" : 107-130.
- PESCATORE B., 1984 : Les chablis : mise au point et premiers résultats de mesure dans le bassin versant de la Petite Fecht. Mémoire de Maîtrise Géogr., ULP Strasbourg, 161p.
- PETIT F., ERPICUM M., 1983 : Evaluation de l'évapotranspiration réelle d'une pessière. Comparaison avec l'évapotranspiration potentielle. Bull. Soc. Géogr. de Liège vol. 19 : 139-159.
- PETIT F., KALOMBO K., 1984 : L'interception des pluies par différents couverts forestiers. Bull. Soc. Géogr. de Liège vol. 20 : 99-127.
- PHIPPS R.L., 1974 : The soil creep-curved tree fallacy. J. Res. US Geol. Survey vol. 2 : 371-378.
- PINCENT B., 1977 : Surveillance des glissements de terrain. Revue française de Géotechnique vol. 1 : 92-104.
- PINCENT B., BLONDEAU F., 1978 : Détection et suivi de glissements de terrain. 3ème Congrès de Géologie de l'Ingénieur, Madrid, C.R. vol. 1 : 252-266.
- PINCZES Z., 1978 : Untersuchung der Kornzusammensetzung von Solifluktionmaterial. Wissenschaftliche Zeit. der Ernst-Moritz-Arndt Univ. Greifswald Jahrgang XXVII, Mathematisch-naturwissenschaftliche Reihe Heft 1/2 : 73-77.
- PRIGOGINE I., 1968 : Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles. Paris, Dunod, 160p.
- PRIOR D.B., 1978 : Some recent progress and problems in the study of mass -movement in Britain. In EMBLETON et al. : 84-106.
- RAPP A., 1962 : Kärkevagge, some recordings of mass movements in the Northern Scandinavian Mountains. Biul. Perygl. vol. 11 : 287-309.
- RASHIDIAN K., 1984 : A new technique for field measurement of soil creep displacement profiles. 7ème colloque de la Commission "Expérimentation de Terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Strasbourg-Heidelberg 19-25/8/1984. A paraître dans Z. Geomorph. Suppl. Bd.

- REMY J.C., 1971 : Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol. Ann. Agron. vol. 22(3) : 267-290.
- REUTENAUER D., 1983 : Etude expérimentale de la conductivité hydraulique des formations superficielles : mise au point d'une méthode de mesure au laboratoire et application à quelques formations des Vosges et de la plaine d'Alsace. Rapport de DEA, Géogr., ULP Strasbourg, 108p.
- REYNOLDS S.G., 1975 : A note on variability in Young pit and T-bar measurements. Stockholm, Geografiska Annaler, series A, vol. 57(1/2) : 99-103.
- RICE R.J., 1981 : Fundamentals of Geomorphology. London, Longman. p. 154.
- ROGERS N.W., SELBY M.J., 1980 : Mechanisms of shallow translational landsliding during summer rainstorms : North Island, New-Zealand. Stockholm, Geografiska Annaler, series A, vol. 62(1/2) : 11-21.
- ROTHER J.P., HERRENSCHNEIDER A., 1963 : Climatologie du Massif du Hohneck. In "Le Hohneck", Assoc. Philomatique d'Alsace-Lorraine : 63-93.
- RUDBERG S., 1962 : A report on some field observations concerning periglacial geomorphology and mass movements on slopes in Sweden. Biul. Perygl. vol. 11 : 311-323.
- RUDBERG S., 1964 : Slow mass movement processes and slope development in the Norra Storfjäl area, southwestern Swedish Lapland. Z. Geomorph., Suppl. Bd. 5 : 192-203.
- RUFFRAY P. de, 1982 : Principales unités phyto-écologiques du bassin versant de la Petite Fecht, Hautes-Vosges (France). Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 79-84.
- SAITO M., VEZAWA H., 1961 : Failure of soil due to creep. 5th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Proc. vol. 1 : 315-328.
- SALA M., 1981 : Geomorphic processes in a small mediterranean drainage basin (Catalan ranges). Transactions, Japanese Geom. Union vol. 2(2) : 239-252.
- SANGLERAT, 1965 : Le pénétromètre et la reconnaissance des sols. Paris, Dunod.
- SAYLES F.H., HAINES D., 1974 : Creep of frozen silt and clay. Techn. Rep. 252, C.R.R.E.L., Hannover, July 1974.
- SCHNEIDEGGER A.E., 1961 : Theoretical Geomorphology. Berlin-Göttingen-Heidelberg, Springer-Verlag.
- SCHNEPERS J.L., 1977 : Le creep sur les talus de l'autoroute E5 entre Waremmé et Liège. Bull. Soc. Géogr. de Liège vol. 13 : 167-189.
- SCHNEPERS J.L., 1983 : Les stations de mesure du creep et des soulèvements du sol (domaine du Sart Tilman). 3ème colloque BENELUX sur les processus géomorphologiques. Livret guide : 27-33.
- SCHERER J.L., 1977 : Une méthode d'extrapolation dans l'espace de données pluviométriques moyennes. Application à une partie des Vosges et de leur bordure. Rech. Geogr. à Strasbourg vol. 4 : 69-85.
- SCHUMM S.A., 1956 : The role of creep and rainwash on the retreat of badland slopes. Amer. J. of Sc. vol. 254 : 693-706.
- SCHUMM S.A., 1964 : Seasonal variations of erosion rates and processes in western Colorado. Z. Geomorph., Suppl. Bd. 5 : 214-238.

- SCHUMM S.A., 1967 : On vegetation as a marker. R.G.D. vol. 17(4) : 168.
- SCHUMM S.A., 1967 : Rates of surficial rock creep on hillslopes in western Colorado. Science vol. 155.
- SCHWEBEL L., 1982 : Les granites du bassin versant de la Petite Fecht en amont de Sultzeren. Rech. Geogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 29-40.
- SCHWING J.F., 1976 : Contribution des animaux fouisseurs aux phénomènes d'érosion sur quelques pâturages en forte pente des Vosges. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 9 : 119-123.
- SELBY M.J., 1966 : Method of measuring soil creep. J. of Hydrol. (NZ) vol. 5(2) : 54-63.
- SELBY M.J., 1968 : Cones for measuring soil creep. J. of Hydrol. (NZ) vol. 7(2) : 136-137.
- SELBY M.J., 1982 : Hillslope materials and processes. Oxford University Press, 264p.
- SHARPE C.F.S., 1938 : Landslides and related phenomena. New York, Colombia Univ. Press, reprinted 1968, 137p.
- SKEMPTON A.W., 1964 : Long term stability of clay slopes. Geotechnique vol. 14 : 77-101.
- SMITH G.N., 1982 : Elements of soil mechanics for civil and mining engineers. London, Granada, 5ème ed.
- SMITH J., 1960 : Cryoturbation data from South Georgia. Biul. Perygl. vol. 8 : 70-79.
- SOHMA H., OKZAWA S., IWATA S., 1979 : Slow mass movement processes in an alpine region of Mt. Shirowma Dake, the Japan Alps. Geogr. Revue of Japan vol. 52 : 562-579.
- SOUCHEZ R., 1963 : Evolution des versants et théorie de la plasticité. Revue Belge de Géographie vol.1, 94p.
- SOUCHEZ R., 1964 : Viscosité, plasticité et rupture dans l'évolution des versants. Ciel et Terre vol. 11/12 : 389-410.
- STATHAM I., 1977 : Earth surface sediment transport. Oxford, Clarendon Press, 184p.
- STATHAM I., 1981 : Techniques for the measurement of surface water erosion processes on slopes. In GOUDIE "Geomorphological Techniques", London, Allen & Unwin : 174-176.
- STRAHLER A.N., 1952 : Dynamic basis of geomorphology. Bull. of the Geol. Soc. of America vol. 63 : 923-938.
- STRAHLER A.N., 1956 : Quantitative slope analysis. Bull. of the Geol. Soc. of America vol. 67 : 571-596.
- STRAHLER A.N., BAKKER J.P., 1956 : Report on quantitative treatment of slope recession problems. 1er rapport de la Commission "Etude des Versants" de l'U.G.I., Rio de Janeiro.
- SUDGEN K.C., 1973 : Investigation of a method for measuring soil creep. Unpubl. B. Sc. project A21, Dep. of Physics., Univ. of Bristol (UK), cité dans ANDERSON et FINLAYSON, 1975.
- SWANSON S.J., JANDA R.J., DUNNE T., SWANSTON D.N., 1982 : Sediment budgets and routing in forested drainage basins. U.S. Dep. of Agriculture. Forest Service. General Technical Report PNW 141.
- TAYLOR D.W., 1956 : Fundamentals of soil mechanics. New York, Wiley.
- TERZAGHI K., 1950 : Mécanique théorique des sols. Paris, Dunod, 565p.

- TERZAGHI K., 1950 : Mechanism of landslides. Geol Soc. Ann. Berkeley, vol. : 83-123. Cité dans Young, 1978.
- TERZAGHI K., PECK R., 1948 : Soils mechanics and engineering. Wiley, Dunod Paris, traduction française 1957.
- TOWNER G.D., 1981 : The correction of in situ tensiometers readings for overburden pressures in swelling soils. J. Soil Sc. vol. 32 : 499-504.
- TOWNER G.D., 1983 : Effective stresses in unsaturated soil and their applicability in the theory of critical state soil mechanics. J. Soil Sc. vol. 34 : 499-504.
- TRICART J., 1952 : La géomorphologie et la notion d'échelle. Rev. Géom. Dyn. vol. 3 : 213-218.
- TRICART J., 1957 : Mise au point : l'évolution des versants. Informations Géographiques, vol. 3 : 1&8-116.
- TRICART J., 1962 : Les discontinuités dans les phénomènes d'érosion. Publ. 59 A.I.H.S. : 233-243.
- TRICART J., 1962 : L'épiderme de la Terre, esquisse d'une géomorphologie appliquée. Masson, Coll. Evolution des Sciences 21, 167p.
- TRICART J., 1963 : Aspects et problèmes géomorphologiques du Massif du Hohneck. Assoc. Philomatique d'Alsace-Lorraine, in : Le Hohneck : 43-62.
- TRICART J., CAILLEUX A., 1965 : Introduction à la géomorphologie climatique.
- TROEH F.R., 1975 : Measuring soil creep. Soil Sc. Am. Proc., vol. 39 : 707-709.
- USSELMANN P., 1972 : Les mouvements de masse dans le bassin versant. Centre de Perfectionnement "Aménagement du Milieu Naturel", U.L.P. : 1-9.
- VAN GENUCHTEN M.T., 1980 : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sc. Soc. Am. J., vol. 44 : 892-898.
- VAN HOOFF P., 1983 : Earthworm activity as a cause of splash erosion in a Luxembourg forest. Geoderma , vol. 31 : 195-204.
- VAN VLIET-LANOE B., 1985 : From frost to gelifluction : a new approach based on micromorphology its applications to arctic environment. Inter-Nord 17 : 15-20.
- VAN VLIET-LANOE B., 1985 : Frost Effects in Soils. In : Boardman J.(ed.) "Soils and Quaternary Landscape Evolution. Wiley & sons.
- VAN VLIET-LANOE B., COUTARD J.P., 1984 : Structuration et Comportement de matériaux affectés par la glace de ségrégation. Bulletin du Centre de Géomorphologie de Caen vol. 27.
- VAN VLIET-LANOE B., COUTARD J.P., PISSART A., 1984 : Structures caused by repeated freezing and thawing in various loamy sediments : a comparison of active, fossil and experimental data. Earth Surf. Proc. and Landforms vol. 9 : 553-565.
- VAN WIJK W.R., BRUYN P.J., 1964 : Determination of thermal conductivity and volumetric heat capacity of soils near the surface. Soil Sc. Soc. Am. Proc., vol. 28 : 461-464.
- VARNES D.J., 1975 : Slope movement in the Western United States. In : Mass Wasting p. 1-17, Geoabstracts. Cité dans Selby, 1982.
- VERDEYEN J., ROISIN V., NUYENS J., 1968 : Mécanique des sols. Paris, Dunod, 508p.
- VIALOV S.S., 1966 : Methods of determining creep. Long term strength and compressibility characteristics of frozen soil. Techn. Trans. 1364., Nat. Res. Conn. Can., Ottawa 1969.

- VITON P., 1970 : Utilisation des thermorésistances. In : Techniques d'études des facteurs physiques de la biosphère, I.N.R.A. : 143-152.
- VIVILLE D., 1980 : Dynamique des températures dans le sol sur le versant du Geisberg ; application aux calculs de la diffusivité thermique. Rapport de DEA, ULP Strasbourg,
- VIVILLE D., 1985 : Variabilité spatiale des propriétés physiques et hydriques des sols dans le bassin versant du Ringelbach (Vosges granitiques)". Th. de Doctorat, Géogr. Phys., RCP 741 du CNRS - ULP Strasbourg.
- VIVILLE D., AMBROISE B., 1982 : Détermination des courbes de rétention hydrique des sols par la méthode du bac à sable et à kaolin ($pF < 2.7$) Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 253-256.
- VIVILLE D., AMBROISE B., 1983 : Variabilité spatiale de la densité apparente et des propriétés hydrodynamiques des sols dans le bassin du Ringelbach (Vosges). 8èmes Journées Scientifiques du Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique et des Techniques Associées "Densité des sols : mesure et relations avec les comportements hydriques et mécaniques", Rouen 29-30/11/1983.
- VIVILLE D., AMBROISE B., KOROSÉC B., 1984 : Variabilité spatiale des propriétés texturales et hydrodynamiques des sols dans le bassin versant du Ringelbach (Vosges, France). 7ème colloque de la Commission "Expérimentation de Terrain en Géomorphologie" de l'U.G.I., Strasbourg-Heidelberg 19-25/8/1984. A paraître dans Z. Geomorph., Suppl. Bd.
- VOGT H., 1976 : Quelques problèmes de l'étude des versants. Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 1 : 5-12.
- VOGT H., 1980 : Etude géomorphologique du rebord Sud-Occidental du Fossé Rhénan. Th. Doctorat d'Etat, ULP Strasbourg, 372p.
- VOGT H., 1982 : Le cadre géomorphologique du bassin expérimental de la Petite Fecht (Vosges, France). Rech. Géogr. à Strasbourg vol. 19/20/21 : 25-27.
- VOGT H., SITTLER J., 1972 : Le Quaternaire du département du Haut-Rhin. Sc. Géol., bull. 25(2/3) : 127-135.
- WASHBURN A.L., 1960 : Instrumentation for mass wasting and patterned ground studies in northeast Greenland. Biul. Perygl. vol. 8 : 59-66.
- WASHBURN A.L., 1967 : Instrumental observations of mass-wasting in the Mesters Vig District, northeast Greenland. Medd. om Grønland vol. 166(4), cité dans YOUNG, 1978.
- WASHBURN A.L., 1979 : Geocryology. A survey of periglacial processes and environments. Edward Arnold.
- WENDT C.W., WILKE O.C., NEW L.L., 1978 : Use of methanol-water solutions for freeze protection of tensiometers. Agronomy J. vol. 70 : 890-891.
- WIERENGA W.R., NIELSEN D.R., DAGAN R.M., 1969 : Thermal properties of a soil base upon field and laboratory measurements. Soil Sc. Soc. of Am. Proc. vol. 33(3) : 354-360.
- WILLIAMS M.A.J., 1973 : The efficacy of creep and slopewash in tropical and temperate Australia. Aust. Geogr. Stud. vol. 11 : 62-78, cité dans DIETRICH et al., 1982.
- WILLIAMS P.J., 1957 : The direct recording of solifluction movements. Am. J. of Sc. vol. 255 : 707-715.
- WILLIAMS P.J., 1957 : Some investigations into solifluction features in Norway. Géogr. J. vol. 123(1) : 42-48, cité dans SOUCHEZ, 1963.
- WILLIAMS P.J., 1962 : Quantitative investigation of soil movement in frozen ground phenomena. Biul. Perygl. vol. 11 : 353-360.

- WILLIAMS P.J., 1966 : Downslope soil movement at a sub-arctic location with regard to variations with depth. *Can. Geot. J.* vol. 3(4) : 191-203.
- WOJCHIECHOWSKI J., KLIMOWICZ H., 1970 : Geodetical observations of slope creep as a source of information of the rheological properties of natural soils. *Proc. Sem. Soil Mech. and Found. Eng.* 2nd Lodz : 757-773.
- YAIR A., 1973 : Theoretical considerations on the evolution of convex hillslopes. *Z. Geomorph., Suppl. Bd.* 18 : 1-9.
- YAIR A., DE PLOEY J., 1979 : Field observations and laboratory experiments concerning the creep process of Rock Blacks in an arid environment. *CATENA* vol. 6(2).
- YEN B.C., 1969 : Stability of slopes undergoing creep deformation. *J. Soil Mech. Found. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. of Civil Eng.* vol. 95 : 1075-1096.
- YOUNG A., 1960 : Soil movement by denudation processes. *Nature* vol. 188 : 120-122.
- YOUNG A., 1963 : Deductive models of slope evolution. In *Neue Beiträge zur internationalen Hangforschung Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen* : 45-70.
- YOUNG A., 1963 : Soil movement on slopes. *Nature* vol. 200 : 129-130.
- YOUNG A., 1974 : The rate of slope retreat. *Institute of British Geographers Special Publ.* 7 : 65-78.
- YOUNG A., 1978 : *Slopes*. 3ème ed. London, Longman, 288p.
- YOUNG A., 1978 : *Slopes : 1970-75*. In EMBLETON et al., 1978 : 73-83.
- YOUNG A., 1978 : A twelve year record of soil movement on a slope. *Z. Geomorph. Suppl. Bd.* 29 : 104-110.

Annexe 3.1

LES JAUGES D'EXTENSOMETRIE

Une jauge d'extensométrie est constituée par un fil conducteur très fin replié plusieurs fois sur lui-même et collé sur un feuillet plastique. Le raccordement des pattes de sortie des jauges (extrémités du fil) aux instruments de mesure est réalisé par l'intermédiaire de fils de liaison, de cosses-relais et de câbles.

Liée à une structure telle que la lame d'acier souple du capteur, la jauge en subira les déformations qui produiront une variation de la résistance électrique du fil fin.

En effet, Wheastone a montré que l'allongement d'un fil conducteur provoque une diminution de sa section et une augmentation de sa résistance électrique :

$$R = \rho L/s \quad (1)$$

avec R : résistance électrique du fil

L : longueur du fil

s : section du fil

ρ : résistivité

D'autre part, le rapport μ (coefficient de Poisson) entre l'allongement et la diminution de la section est constant dans le domaine élastique :

$$\mu = \Delta L / \Delta s \quad (2)$$

μ est compris entre 0.25 et 0.30 pour les métaux.

Par dérivation logarithmique de l'expression (1), en assimilant les faibles variations des grandeurs physiques aux différentielles mathématiques :

$$\Delta R/R = \Delta \rho/\rho + \Delta L/L - \Delta s/s \quad (3)$$

et $\Delta s/s = -2\mu \Delta L/L \quad (4)$

d'où $\Delta R/R = \Delta \rho/\rho + \Delta L/L (1+2\mu) \quad (5)$

La loi de Bridgman dit que $\Delta \rho/\rho$ varie comme la variation de volume,

d'où $\Delta R/R = [(1+2\mu) + C^{te}(1-2\mu)] \Delta L/L$

$$\boxed{\Delta R/R = K \Delta L/L} \quad (6)$$

pour le constantan, $K \approx 2$.

Annexe 3.2

MODE OPERATOIRE POUR LA FABRICATION DU CAPTEUR DE
MESURE DE REPTATION A JAUGES D'EXTENSOMETRIE

Ce mode opératoire a pu être établi grâce aux conseils des techniciens de la section d'Essais sur Modèles du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées où nous avons construit le premier capteur.

Le capteur est constitué principalement par une lame d'acier à ressort le long de laquelle sont collées des jauges d'extensométrie, sur chaque face. Il y a à chaque niveau, tous les cinq centimètres, deux jauges, une de chaque côté de la lame, montées en demi-pont.

1 - Matériel et outils nécessaires :

a) Matériel :

- support : lame d'acier à ressort (ruban Hasberg, norme AFNOR XC75C) de 12.7 mm de large, 0.5 mm d'épaisseur et 500 mm de long.
- jauges : les jauges utilisées sont des jauges simples de chez Vishay M.M. La grille a 1.57 mm de long et 1.57 mm de large. Leur référence est : EA-06-062AK 120. Vingt jauges sont nécessaires, mais il est prudent d'en prévoir davantage.
- colle : celle utilisée est une colle Epoxy à deux composants (AE 15 de chez Vishay). Cette colle nécessitant un traitement thermique est la plus appropriée pour un capteur dont la durée de vie doit être la plus longue possible. Pour le collage des cosses-relais, une colle à froid (M200 de chez Vishay) convient : elle est en outre plus pratique et bien moins chère.
- cosses-relais : elles doivent avoir à peu près les mêmes dimensions que les pattes des jauges (CEG-50C de chez Vishay).
- fil de liaison émaillé (1 conducteur jauge 34, 0.9 ohms/m, diamètre 0.16 mm).

câbles : il faut les prévoir suffisamment longs car les raccords sont source de problèmes. Il y a trois câbles par niveau. (Filotex jauge 24).
- protections : - vernis silicone (Rhodorsil 991 de Rhône-Poulenc)
- feuille d'aluminium garnie de mastic (ABM 75 de HBM)
- étain pour soudures fines
- scotch non électrostatique et scotch d'électricien
- mouchoirs en papier
- papier carbure de silicium à grain moyen

- conditionneur de métal (Vishay)
- neutralisateur (Vishay)
- caoutchouc de 2 mm d'épaisseur (pour répartir la charge au moment du traitement thermique) ; on a pris des rondelles de bocaux de conserves.
- Araldite souple (AV 129 + HV 997) résistant à l'humidité.

b) Outils :

- grattoir à fibres de verre (pour calques)
- pincette
- spatule
- fer à souder thermostaté avec une panne fine
- barres lourdes pour mettre en charge au moment du collage (7 kg environ).

2 - Préparation de la surface :

Il faut préparer les deux faces de la lame. Passer la lame au papier carbure de silicium en mouillant avec le conditionneur de métal qui favorise l'attaque. Le but est de rayer l'acier suivant deux diagonales pour faciliter le collage. Nettoyer ensuite à l'aide de mouchoirs en papier et du neutralisateur ; effectuer un seul passage à chaque fois pour ne pas ramener les souillures, ceci jusqu'à ce que le mouchoir reste propre.

Protéger alors l'une des faces avec un scotch sur toute sa longueur et découper toutes les parties qui dépassent.

Fixer la lame sur un support propre (plaque de verre). Marquer l'emplacement des jauges avec un crayon à mine dure.

3 - Collage :

Préparer des "fenêtres" de la dimension du support polyimide des jauges avec du scotch ; celui-ci doit bien adhérer à la lame pour la protéger. Les fenêtres doivent être petites pour laisser un maximum de surface sur les côtés pour la protection finale.

Préparer la colle (mélange résine-durcisseur). Pendant qu'elle repose, positionner les jauges sur des morceaux de scotch. Relever ensuite des morceaux de scotch, en faisant un angle aigu avec la surface sur laquelle il est collé pour ne pas plier la jauge et positionner la jauge sur la lame. Faire bien adhérer le scotch du côté des pattes. Mettre un peu de colle sur la lame et sur le dos de la jauge puis coller en exerçant une pression avec le pouce, pas trop forte car en relâchant la pression la jauge pourrait se soulever légèrement. Procéder de la même manière pour chaque jauge, puis mettre sur chacune une pastille de caoutchouc de la taille de la fenêtre et charger uniformément avec une barre lourde.

Il faut effectuer un traitement thermique d'une heure entre 75 et 90°C et laisser refroidir doucement.

Enlever alors les scotchs en faisant un angle de plus de 90° cette fois ; agrandir les fenêtres pour coller les cosses-relais et protéger les jauges avec du scotch pour que la colle ne les souille pas.

Nettoyer la surface où seront collées les cosses-relais avec un mouchoir en papier et du neutralisateur, gratter le dos des cosses-relais avec le grattoir en fibres de verre et nettoyer également avec le neutralisateur.

Coller les cosses-relais à la colle à froid, en positionnant les cosses au moyen de scotch. La colle prend très rapidement.

Décoller ensuite tous les scotchs, puis protéger la face avec une bande de scotch et procéder pour le collage de la même manière sur la seconde face, en ayant soin de mettre une mousse peu épaisse entre la lame et le plan de travail pour ne pas endommager les grilles des jauges.

4 - Cablage :

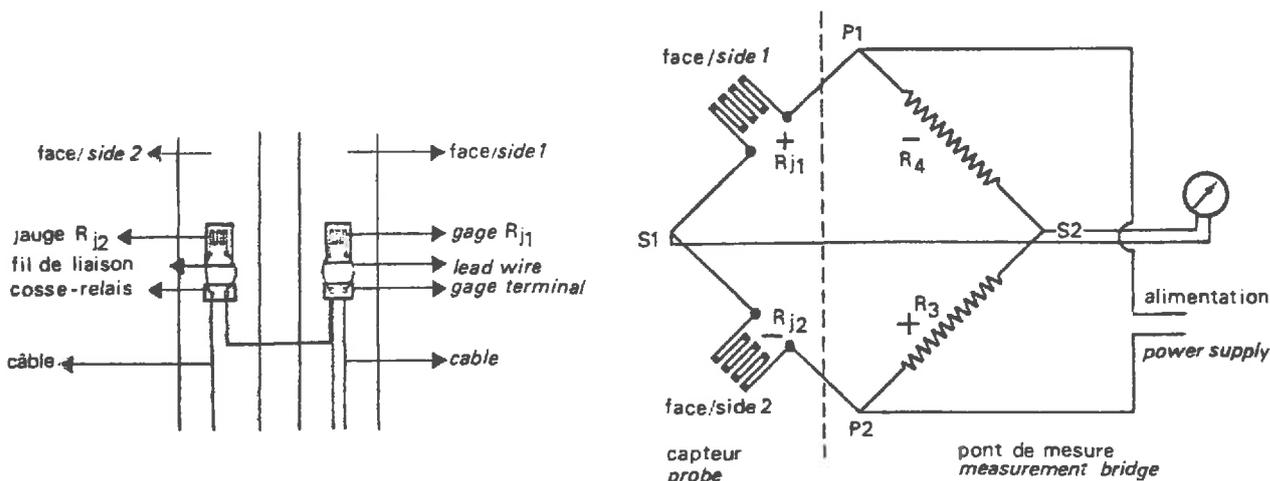
Mettre du scotch d'électricien sur toute la surface comprise entre les pattes de sortie de chaque jauge et sur les cosses-relais, sur la même largeur que celles-ci pour bien isoler la structure. Protéger la grille et 1/3 des pattes de sortie avec un scotch qui doit bien adhérer. Passer légèrement un papier carbure de silicium sur les 2/3 restants des pattes et sur les cosses-relais, puis étamer les cosses et les pattes. Le plus simple consiste à mettre la soudure fine sur les pattes et à chauffer avec le fer étamé, mais il ne faut pas la retirer brutalement car les pattes sont très fragiles et pourraient être arrachées.

Après les avoir étamés, souder les fils de liaison (le vernis part au moment de l'étamage) d'abord sur les pattes en les positionnant avec un scotch après les avoir formés avec la pincette, puis sur les cosses en ayant soin de faire des boucles souples (cf. schéma 1).

Faire ensuite de nouvelles fenêtres de scotch en protégeant la moitié des cosses-relais et donner un coup de pinceau léger de vernis silicone sur la grille et les fils. Laisser bien sécher pendant douze heures au moins.

Procéder de la même manière sur la deuxième face.

Préparer les câbles : il en faut trois par niveau, d'une longueur suffisante, plus un petit (15 mm) pour joindre les deux faces du capteur et effectuer le montage en demi-pont. Etamer toutes les extrémités. Câbler suivant les schéma en ayant soin de numéroter les câbles.



5 - Protection :

La première protection est constituée par le vernis silicone. La seconde est destinée à protéger les jauges et les extrémités des câbles de l'humidité par le mastic et des agressions mécaniques par la feuille d'aluminium.

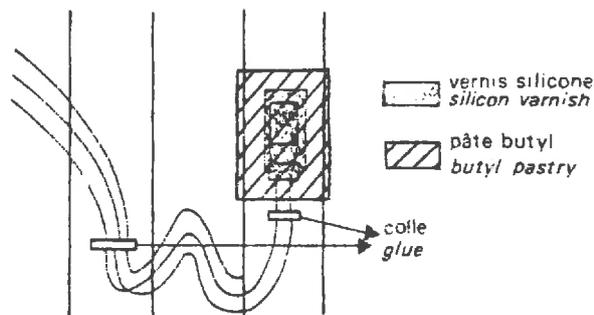
Prélever avec la spatule un peu de mastic et le positionner, après l'avoir travaillé avec les doigts, sous les câbles. Découper ensuite des rectangles de la largeur de la lame et d'une longueur supérieure de cinq millimètres environ à la longueur de la jauge aux cosses-relais incluses. Appliquer ces rectangles, mastic contre la lame, sur chaque jauge. Travailler avec les doigts pour rendre l'adhésion maximale, particulièrement sur les bords et près des câbles.

Une attention particulière doit être portée aux câbles : ceux-ci ne doivent pas pouvoir soulever la protection, ils la rendraient inefficace. Il faut les fixer contre la lame, légèrement en dessous de la protection, avec un point de colle souple (Araldite souple).

6 - Finition :

La lame n'étant pas inoxydable, il faut en protéger toutes les parties "nues" avec un vernis hydrifuge souple qui ne craquellera pas lors de la flexion.

Pour éviter de faire remonter les câbles directement le long du capteur, on les éloigne en les collant sur une seconde lame, préalablement vernie.



Les deux lames sont solidarisées par des "barettes" en PVC à chacune de leurs extrémités. La barette de la base servira à ancrer le capteur, celle de l'extrémité libre sera retirée après l'insertion dans le sol.

Annexe 3.3

```
20 '-----
30 ' - MESURES DE REPTATION A LA SCHILDMATT -
40 '-----
50 '
60 ' ce programme (CREEP) a pour but de creer des fichiers contenant
70 ' les mesures effectuees avec les capteurs a jauges d'extensometrie
80 ' il y a un fichier par capteur et par site ou type d'experience
90 ' et chaque enregistrement d'un fichier correspond a une date de
100 ' mesures, excepte le premier qui contient le nombre total des
110 ' enregistrements du fichier ce qui en permet la gestion par un
120 ' compteur (CPT$). La structure d'un enregistrement est la suivante:
130 ' - la date (DA$), suivie de l'heure (H$) a laquelle ont ete faites les
140 ' mesures,
150 ' - du premier niveau de jauges, en surface, au dernier les valeurs des
160 ' mesures [M$(I)] ;
170 ' Le nombre de niveaux de jauges par capteur est defini par NB.
180 '
190 ' La gestion du fichier s'effectue avec quatre sous programmes :
200 ' - CREAT permet de creer un nouvel enregistrement
210 ' - MODI permet de modifier un enregistrement (il faut en connaitre le No)
220 ' - LECT permet de faire defiler sur l'ecran le contenu et le No de tous
230 ' les enregistrements
240 ' - IMPRIM permet d'imprimer le fichier sous forme de tableau, une ligne
250 ' par mesure pour tous les niveaux.
260 '
270 ' Le traitement des donnees est effectuee avec le sous-programme TRAIT qui
280 ' calcule les deformations relatives a partir de n'importe quel date (a
290 ' defaut la premiere) et les deplacements relatifs correspondants
300 '
310 ' Le modele de calcul des deplacements utilise les approximations'
320 ' de Runge-Kutta et les formules de Simpson.
330 '
340 ' Les VARIABLES en option (differentes d'un capteur a l'autre ou d'un
350 ' choix pour le depouillement a un autre) sont:
360 ' - NOM$ : nom du fichier
370 ' - NB : nombre de niveaux de jauges par capteur
380 ' - P : profondeur dans le sol (ou a partir de l'extremite superieure
390 ' de la lame quand le capteur n'est pas dans le sol) du premier
400 ' niveau de jauges
410 ' - EP : epaisseur de la lame (en millimetres)
420 ' - DIS : distance reguliere entre les jauges (en centimetres)
430 ' - NO : No de l'enregistrement a partir duquel sont calculees les
440 ' deformations et/ou les deplacements relatifs.
450 '
460 '-----
0000 '
0010 CLEAR 1000
0020 INPUT "NOM DU FICHIER (SCHILD1, SCHILD2 OU SCHILD3) "; NOM$
0030 INPUT "NOMBRE DE NIVEAUX DE JAUGES (12 POUR SCHILD1 ET 2, 10 POUR SCHILD3) "; NB
0040 NB2=NB+2: N=3*NB2
0050 PRINT: INPUT "PROFONDEUR DU PREMIER NIVEAU (pres de la surface)"; P
0060 DIS = 5 'distance entre deux jauges (en cm)
0070 '
0080 DIM M$(NB)
0090 OPEN "R", #1, NOM$, 39
0100 FOR K=1 TO NB
0110 FIELD #1, 10 AS DA$, 5 AS H$, 2*(K-1) AS D$, 2 AS M$(K)
0120 NEXT K
0130 FIELD #1, 2 AS CPT$
0140 IF LOF(1)=0 THEN GOSUB 4010
0150 '
0160 GET #1, 1: FF=CVI(CPT$)
0170 DIM T$(FF, 2), I$(FF, NB2), COUR$(FF, NB2), APPROX$(FF, NB2)
0180 DIM G(N, 15), N1(15), N$(15), S$(15), L$(N), A$(N)
0190 '
0200 '-----MENU
0210 '
0220 PRINT "POUR REVENIR AU MENU, APPUYER SUR <RETURN> "
0230 '
0240 PRINT: INPUT "MODE (CREAT, LECT, IMPRIM, TRAIT, MODI, FIN) "; R$
0250 IF R$="CREAT" THEN GOSUB 2000
0260 IF R$="MODI" THEN GOSUB 2300
0270 IF R$="LECT" THEN GOSUB 2500
0280 IF R$="IMPRIM" THEN GOSUB 2700
0290 IF R$="TRAIT" THEN GOSUB 3000
0300 IF R$="FIN" THEN CLOSE #1: END
0310 GOTO 1240
0320 '

```

```
2000 '-----CREATION
2010 '
2020 ' les mesures sont entrees dans l'ordre ou elles ont ete faites :
2030 ' depuis le niveau le plus proche de la surface jusqu'au plus profond
2040 '
2050 GET #1,1:ARANG=CVI(CPT$)+1
2060 GET #1,ARANG
2070 PRINT:X$=" ":INPUT "DATE ";X$
2080 IF X$="" THEN GOTO 2200
2090 LSET DA$=X$
2100 PRINT:X$="":INPUT "HEURE ";X$
2110 LSET H$=X$
2120 PRINT
2130 FOR K=1 TO NB
2140 X=0:PRINT"MESURE AU NIVEAU ";K;" "":INPUT X:RSET M$(K)=MKI$(X)
2150 NEXT K
2160 PUT #1,ARANG
2170 GOSUB 4100
2180 PRINT:PRINT TAB(20);"range en ";ARANG:PRINT
2190 GOTO 2050
2200 RETURN
2210 '-----MODIFICATION
2300 '
2310 '
2320 PRINT:ARANG=0:INPUT"QUEL ENREGISTREMENT VOULEZ-VOUS MODIFIER ";ARANG
2330 IF ARANG=0 THEN 2460
2340 GET #1, ARANG
2350 PRINT "DATE ";TAB(10);DA$;TAB(30);
2360 X$="":INPUT X$:IF X$<>" " THEN LSET DA$=X$
2370 PRINT "HEURE ";TAB(10);H$;TAB(30);
2380 X$="":INPUT X$:IF X$<>" " THEN LSET H$=X$
2390 PRINT "MESURES : "
2400 FOR K=1 TO NB
2410 PRINT "NIVEAU : ";K;TAB(20)CVI(M$(K));TAB(30);
2420 X=0:INPUT X:IF X<>0 THEN RSET M$(K)=MKI$(X)
2430 NEXT K
2440 PUT #1,ARANG
2450 GOTO 2320
2460 RETURN
2470 '-----LECTURE FICHER
2500 '
2510 '
2520 PRINT:PRINT"LECTURE DU FICHER ";NOMS
2530 GET #1,1:FF=CVI(CPT$)
2540 FOR I=2 TO FF
2550 GET #1,I
2560 PRINT I;" "":DA$,H$
2570 FOR K=1 TO NB
2580 PRINT CVI(H$(K));
2590 NEXT K
2600 PRINT
2610 NEXT I
2620 RETURN
2630 '-----IMPRESSION
2700 '
2710 '
2720 PRINT:PRINT"IMPRESSION DU TABLEAU DES MESURES ":PRINT:PRINT
2730 LPRINT NOMS
2740 LPRINT "-----"
2750 FOR K=1 TO NB
2760 LPRINT TAB((K-1)*7+31)USING"##\ \";P+(K-1)*DIS,"cm";
2770 NEXT K
2780 LPRINT:LPRINT
2790 GET #1,1:FF=CVI(CPT$)
2800 FOR I=2 TO FF
2810 GET #1,I
2820 LPRINT I;TAB(5)*" ";TAB(8)DA$;TAB(20)H$;
2830 FOR K=1 TO NB
2840 LPRINT TAB((K-1)*7+30) USING"####";CVI(M$(K));
2850 NEXT K
2860 LPRINT
2870 NEXT I
2880 RETURN
2890 '-----INITIALISATION COMPTEUR ENREGISTREMENT 1
4000 '
4010 INPUT "INITIALISATION DU FICHER (O/N) ";RE$
4020 IF RE$="O" THEN LSET CPT$=MKI$(1):PUT #1,1:RETURN
4030 '-----MAJDRATION COMPTEUR
4100 '
4110 GET #1,1:LSET CPT$=MKI$(ARANG):PUT #1,1:RETURN
4120 '=====
```

```

10 ++++++TRAITEMENTS
10
20 NAL=100:ETYP=6
30 RANDOMIZE
40 PRINT:PRINT
50 INPUT'DONNEZ LE No DE L'ENREGISTREMENT DE REFERENCE ";NO:NO=NO+1
60 PRINT:INPUT'No DE L'ENREGISTREMENT A TRAITER ";NO2:NO2=NO2+1
70      calcul des deformations relatives
30 GET#1,NO
30   FOR J=1 TO NB
30     REF(J)=CVI(MS(J))
40   NEXT J
20 GET #1,NO2
30   FOR J=1 TO NB
40     T(1,J)=CVI(MS(J))-REF(J)
50   NEXT J
50   FOR J=1 TO NB
70     M=0:S2=0
30     FOR I=2 TO NAL+1
30       GOSUB 5000
40       T(I,J)=T(1,J)+X*ETYP
40       GOSUB 5000
50       T(I,J)=T(I,J)+X*ETYP
60       M=M+T(I,J):S2=S2+T(I,J)^2
40     NEXT I
50     MOY(J)=M/NAL
50     VAR(J)=S2/NAL-MOY(J)^2
70     E(J)=SOR(S2/NAL-MOY(J)^2)
80   NEXT J
90      impression des deformations relatives
00 LPRINT "REPTATION ";NOMS; " : DEFORMATIONS RELATIVES (microdeformations)"
10 GET #1,NO
20 LPRINT:LPRINT " - la deformation de reference est celle de la ";DAs
30 LPRINT" - ";NAL;" tirages pour chaque niveau ont ete effectuees dans une serie"
40 LPRINT" de nombres pseudoaleatoires de moyenne nulle et d'ecart type ";ETYP
50 LPRINT" pour simuler des erreurs aleatoires."
60 LPRINT
70 FOR K=1 TO NB:LPRINT TAB((K*7+31)USING"##\ \";P+(K-1)*DIS,"cm";
80 NEXT K
90 LPRINT:LPRINT
00 GET #1,NO2
10 LPRINT DAs;
20   FOR K=1 TO NB:LPRINT TAB((K-1)*7+30)USING"#####";T(1,K);:NEXT K
30   LPRINT:LPRINT"moyenne :";
40   FOR K=1 TO NB:LPRINT TAB((K-1)*7+30)USING"#####";MOY(J);:NEXT J
50   LPRINT:LPRINT"ecart type :";
60   FOR K=1 TO NB:LPRINT TAB((K-1)*7+30)USING"###.###";E(J);:NEXT J
70 LPRINT:LPRINT
80      calcul des deplacements relatifs
90      (avec Runge-Kutta et Simpson)
10 EP=.3
20   FOR L=1 TO NAL+1
30
40     FOR J=1 TO NB
50       COUR(L,J)=T(L,J)/(EP*1000)
60       COUR(L,J)=COUR(L,J)/1000
70     NEXT J
80
90     Runge-Kutta : approx des derivees
00     APPROX(L,NB2)=0:COUR(L,NB2)=0
10     FOR J=NB2-1 TO 2 STEP-1
20       Z1=(APPROX(L,J+1))^2
30       Z1=(1+Z1)^(3/2)
40       K1=50*(COUR(L,J+1)*Z1)
50       Z2=(APPROX(L,J+1)+K1)^2
60       Z2=(1+Z2)^(3/2)
70       K2=50*(COUR(L,J)*Z2)
80       APPROX(L,J)=APPROX(L,J+1)+((K1+K2)/2)
90     NEXT J
00     APPROX(L,1)=APPROX(L,2)
100      derivee d'un point fictif en surface
100      integration par Simpson

```

```
3710 T(L,NB2)=0:T(L,NB2-1)=0
3720 FOR J=NB2-2 TO 1 STEP-1
3730 DEP=APPROX(L,J+2)+(4*APPROX(L,J+1))+APPROX(L,J)
3740 T(L,J)=(50/3)*DEP+T(L,J+2)
3750 NEXT J
3760 X=(T(L,1)-T(L,2))/5 ' calcul du deplacement jusqu'en surface
3770 T(L,1)=T(L,2)+X*P
3780 NEXT L
3790 FOR J=1 TO NB
3800 M=0:E2=0
3810 FOR L=2 TO NAL+1
3820 M=M+T(L,J):E2=E2+T(L,J)^2
3830 NEXT L
3840 MOY(J)=M/NAL:PRINT MOY(J)
3850 VAR(J)=E2/NAL-MOY(J)^2
3860 E(J)=SQRT(E2/NAL-MOY(J)^2):PRINT E(J)
3870 NEXT J
3880 ' impression des deplacements relatifs
3890 LPRINT:LPRINT "REPTATION ";NOMS;" : DEPLACEMENTS RELATIFS (millimetres)"
3900 LPRINT:LPRINT
3910 LPRINT TAB(15)"Surf";
3920 FOR K=1 TO NB:LPRINT TAB(K*6+16)USING"###\ \";P+(K-1)*5,"cm";:NEXT K
3930 LPRINT:LPRINT
3940 GET #1,NO2
3950 LPRINT DA$;
3960 FOR K=1 TO NB2-1:LPRINT TAB((K-1)*6+14)USING"###.#";T(1,K);:NEXT K
3970 LPRINT:LPRINT"moyenne :";
3980 FOR K=1 TO NB2-1:LPRINT TAB((K-1)*6+14)USING"###.#";MOY(K);:NEXT K
3990 LPRINT:LPRINT"ecart type :";
4000 FOR K=1 TO NB2-1:LPRINT ;TAB((K-1)*6+14)USING"###.#";E(K);:NEXT K
4010 RETURN
4020 '
5000 '-----GAUSS
5010 '
5020 SOM=0
5030 FOR KP=1 TO 12
5040 R(KP)=RND
5050 SOM=SOM+R(KP)
5060 NEXT KP
5070 X=SOM-6
5080 RETURN
5090 '

```

Classes d'écart à la moyenne (m/m)	S C H I L D 1			S C H I L D 2			S C H I L D 3			3 C A P T E U R S		
	NB	F	CUM	NB	F	CUM	NB	F	CUM	NB	F	CUM
<-22	3	0.5	0.5	1	0.2	0.2	1	0.2	0.2	5	0.2	0.3
[-22 , -13[	26	4.4	4.8	9	1.6	1.7	4	0.9	1.1	39	2.3	2.7
[-13 , -4[	143	23.8	28.7	76	12.6	14.3	26	5.7	6.9	245	14.8	17.5
[-4 , 5[	262	43.7	72.3	451	75.1	89.5	392	87.1	94.0	1105	67.0	84.5
[5 , 14[	128	21.3	93.7	50	8.3	97.8	25	5.5	99.6	203	12.3	96.8
[14 , 23[	23	3.8	97.5	7	1.1	99.0	2	0.4	100.0	32	2.0	98.7
> 23	15	2.5	100.0	6	1.0	100.0				21	1.2	100.0
Ecart-type	8.97			5.82			3.57			4.72		

Classes d'écart à la moyenne (m/m)	S C H I L D 1			S C H I L D 2			S C H I L D 3			3 C A P T E U R S		
	NB	F	CUM	NB	F	CUM	NB	F	CUM	NB	F	CUM
<-13	2	0.3	0.3							2	0.1	0.1
[-13 , -4[	61	10.1	10.5	51	8.5	8.5	51	10.2	10.2	163	9.6	9.7
[-4 , 5[	491	81.8	92.3	513	85.5	94.0	401	79.7	90.4	1405	82.7	92.4
[5 , 14[	46	7.6	100.0	36	6.1	100.0	48	9.6	100.0	130	7.6	100.0
> 14												
Ecart-type	3.52			3.16			3.54			3.44		

Effectif des écarts par rapport à la moyenne observés sur 50 séries de mesure effectuées par capteur, tous niveaux confondus a) sans déconnexion entre les séries, b) avec déconnexion - reconnexion entre les séries.

ESSAI 1 : Les points de mesures sont répartis tous les 50 mm.
La longueur totale est de 550 mm.
La forme est celle d'un arc de cercle.

DEFORMATIONS RELATIVES SIMULEES (m/m)

10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

VALEURS REELLES DES DEPLACEMENTS CALCULEES POUR DES POINTS CORRESPONDANTS AUX POINTS DE MESURES SITUES SUR UN ARC DE CERCLE DE RAYON DE COURBURE EQUIVALENT (mm)

5.04	4.17	3.38	2.67	2.04	1.50	1.04	0.67	0.38	0.17	0.04	0.00
10.08	8.33	6.75	5.33	4.08	3.00	2.08	1.33	0.75	0.33	0.08	0.00
15.13	12.50	10.13	8.00	6.13	4.50	3.13	2.00	1.13	0.50	0.13	0.00
20.17	16.67	13.50	10.67	8.17	6.00	4.17	2.67	1.50	0.67	0.17	0.00
25.21	20.83	16.88	13.33	10.21	7.50	5.21	3.33	1.88	0.83	0.21	0.00

DEPLACEMENTS CALCULES (mm)

5.04	4.17	3.38	2.67	2.04	1.50	1.04	0.67	0.38	0.17	0.04	0.00
10.09	8.34	6.75	5.33	4.08	3.00	2.08	1.33	0.75	0.33	0.08	0.00
15.14	12.51	10.13	8.00	6.13	4.50	3.13	2.00	1.13	0.50	0.13	0.00
20.19	16.69	13.51	10.67	8.17	6.00	4.17	2.67	1.50	0.67	0.17	0.00
25.26	20.87	16.90	13.35	10.22	7.50	5.21	3.33	1.88	0.83	0.21	0.00

ESSAI 2 : Les points de mesures sont répartis tous les 50 mm
La longueur totale est de 600 mm
La forme est celle de deux arcs de cercle identiques alternativement convexe et concave.

DEFORMATIONS RELATIVES SIMULEES (m/m)

-10	-10	-10	-10	-10	-10	0	10	10	10	10	10	10
-20	-20	-20	-20	-20	-20	0	20	20	20	20	20	20
-30	-30	-30	-30	-30	-30	0	30	30	30	30	30	30
-40	-40	-40	-40	-40	-40	0	40	40	40	40	40	40
-50	-50	-50	-50	-50	-50	0	50	50	50	50	50	50

VALEURS REELLES DES DEPLACEMENTS CALCULES POUR DES POINTS CORRESPONDANTS AUX POINTS DE MESURES SITUES SUR UN ARC DE CERCLE DE RAYON DE COURBURE EQUIVALENT (mm)

3.00	2.96	2.83	2.63	2.33	1.96	1.50	1.04	0.67	0.38	0.17	0.04	0.00
6.00	5.92	5.67	5.25	4.67	3.92	3.00	2.08	1.33	0.75	0.33	0.08	0.00
9.00	8.88	8.50	7.88	7.00	5.88	4.50	3.13	2.00	1.13	0.50	0.13	0.00
12.00	11.83	11.33	10.50	9.33	7.83	6.00	4.17	2.67	1.50	0.67	0.17	0.00
15.00	14.79	14.17	13.13	11.67	9.79	7.50	5.21	3.33	1.88	0.83	0.21	0.00

DEPLACEMENTS CALCULES (mm)

2.97	2.90	2.81	2.57	2.31	1.90	1.49	1.01	0.67	0.34	0.17	0.01	0.00
5.94	5.80	5.61	5.13	4.61	3.80	2.97	2.02	1.33	0.69	0.33	0.02	0.00
8.92	8.70	8.42	7.70	6.92	5.70	4.46	3.03	2.00	1.03	0.50	0.03	0.00
11.89	11.60	11.23	10.27	9.23	7.60	5.95	4.04	2.67	1.38	0.67	0.04	0.00
14.87	14.51	14.04	12.84	11.54	9.50	7.44	5.05	3.33	1.72	0.83	0.05	0.00

Simulation de courbes simples : déplacements calculés par formules trigonométriques et reconstitués par le modèle de dépouillement.

Annexe 5.1

Z (cm)	F O R M E 2					F O R M E 3				
	Y réel (mm)	Y calculés à partir des mesures (mm)				Y réel (mm)	Y calculés à partir des mesures (mm)			
		SCHILD1	SCHILD2	SCHILD3 (CAEN2)	CAEN1		SCHILD1	SCHILD2	SCHILD3 (CAEN2)	CAEN1
0	12.0	11.3	13.3	9.6	9.0	37.0	37.7	33.1	36.5	31.8
1	11.2					35.5				
2	10.0				7.0	33.5				27.7
3	9.0	7.4				31.5	30.3			
4	8.0		8.1			29.0		23.5		
5	7.2					27.0				
6	6.0					25.0				
7	5.3				3.0	23.5				18.1
8	4.6	2.8		3.4		21.5	18.9		19.7	
9	4.0		3.1			20.0		12.5		
10	3.5					17.7				
11	2.7					16.0				
12	2.0				0.8	14.5				9.6
13	1.7	0.8		1.4		12.5	9.0		10.4	
14	1.3		1.1			10.8		4.5		
15	1.0					9.5				
16	0.7					8.0				
17	0.5				0.2	6.5				3.8
18	0.5	0.2		1.2		5.8	2.2		4.0	
19	0.2		0.8			5.0		1.0		
20	0.2					4.2				
21	0.0					3.3				
22					0.1	2.6				1.2
23		0.2		1.3		2.2	0.1		1.2	
24			0.8			1.7		0.9		
25						1.2				
26						0.8				
27					0.1	0.3				0.5
28		0.3		1.1		0.2	0.1		0.2	
29			0.6			0.0		0.7		
30										
31										
32					0.0		0.3		0.0	0.2
33		0.3		0.9				0.3		
34			0.2							

Y : "déplacement" par rapport à la forme plate

Z : distance comptée à partir de l'extrémité supérieure (cm)

Vérification des capteurs : forme réelle des maquettes en bois et reconstitution à l'aide de capteurs.

Annexe 5.2

F O R M E 2

F O R M E 3

	Niveau	PROF. (cm)	Déformations			Déplacements			Déformations			Déplacements		
			MES	MOY	ECT	MES	MOY	ECT	MES	MOY	ECT	MES	MOY	ECT
CAPTEUR SCHILD1	1	3	231	231	8.94	7.5	7.4	0.9	201	201	8.94	30.3	30.2	1.0
	2	8	287	286	8.91	2.8	2.8	0.8	192	191	8.91	18.9	18.9	0.8
	3	13	356	356	9.21	0.8	0.8	0.6	110	110	9.21	9.0	9.0	0.6
	4	18	162	163	9.05	0.2	0.2	0.5	338	339	9.05	2.2	2.2	0.5
	5	23	60	60	8.54	0.2	0.2	0.4	692	692	8.54	0.1	0.1	0.4
	6	28	-5	-5	9.62	0.3	0.3	0.3	220	220	9.62	0.1	0.1	0.3
	7	33	-10	-10	9.06	0.3	0.3	0.2	-21	-21	9.06	0.3	0.3	0.2
	8	38	1	1	9.68	0.2	0.2	0.1	-37	-37	9.68	0.2	0.2	0.1
	9	43	-26	-25	8.83	0.0	0.0	0.0	-17	-16	8.83	0.0	0.0	0.0
	10	48	29	28	8.08	0.0	0.0	0.0	30	29	8.08	0.0	0.0	0.0
CAPTEUR SCHILD2	1	4	289	289	8.94	8.1	8.2	1.1	58	58	8.94	23.5	23.5	1.1
	2	9	211	210	8.91	3.1	3.2	1.0	122	121	8.91	12.5	12.5	0.9
	3	14	423	423	9.21	1.1	1.1	0.8	329	329	9.21	4.5	4.5	0.8
	4	19	202	203	9.05	0.8	0.8	0.6	589	590	9.06	1.0	1.0	0.6
	5	24	17	17	8.54	0.8	0.8	0.5	477	477	8.54	0.9	0.8	0.5
	6	29	-40	-40	9.62	0.6	0.6	0.4	-103	-103	9.62	0.7	0.7	0.4
	7	34	-14	-14	9.06	0.2	0.3	0.3	-40	-40	9.06	0.3	0.3	0.3
	8	39	21	21	9.68	0.1	0.1	0.2	42	42	9.68	0.1	0.1	0.2
	9	44	18	19	8.83	0.0	0.0	0.1	20	21	8.83	0.0	0.0	0.1
	10	49	7	6	8.08	0.0	0.0	0.0	4	3	8.08	0.0	0.0	0.0
	11	54	-2	-1	8.76	0.0	0.0	0.0						
CAPTEUR SCHILD3 (CAEN2)	1	8	233	233	8.94	3.4	3.4	0.9	182	182	8.94	19.7	19.8	0.6
	2	13	372	372	8.91	1.4	1.4	0.8	155	154	8.91	10.4	10.4	0.4
	3	18	222	222	9.21	1.2	1.2	0.6	334	334	9.21	4.0	4.0	0.3
	4	23	15	16	9.05	1.3	1.3	0.5	512	513	9.05	1.2	1.2	0.2
	5	28	-57	-57	8.54	1.1	1.1	0.4	176	176	8.54	0.2	0.2	0.1
	6	33	19	19	9.62	1.0	1.0	0.3	99	99	9.62	0.0	0.0	0.0
	7	38	-7	-7	9.06	0.8	0.7	0.2	7	7	9.06	0.0	0.0	0.0
	8	43	-35	-35	9.68	0.4	0.3	0.1						
	9	48	18	19	8.83	0.1	0.1	0.0						
	10	53	39	38	8.08	0.0	0.0	0.0						
CAPTEUR CAEN1	1	2	14	14	8.94	7.0	7.0	0.6	21	21	8.94	27.7	27.7	0.6
	2	7	228	227	8.91	3.0	3.0	0.5	116	115	8.91	18.1	18.1	0.5
	3	12	392	392	9.21	0.8	0.8	0.4	200	200	9.21	9.6	9.6	0.4
	4	17	367	368	9.05	0.2	0.2	0.3	494	495	9.05	3.8	3.7	0.3
	5	22	62	62	8.54	0.1	0.1	0.2	805	805	8.54	1.3	1.3	0.2
	6	27	4	4	9.62	0.1	0.1	0.2	302	302	9.62	0.5	0.5	0.2
	7	32	-2	-2	9.06	0.0	0.0	0.1	51	51	9.06	0.2	0.2	0.1
	8	37	-1	-1	9.68	0.0	0.0	0.0	35	35	9.68	0.1	0.0	0.0
	9	42	2	3	8.83	0.0	0.0	0.0	18	19	8.83	0.0	0.0	0.0
	10	47	4	3	8.08	0.0	0.0	0.0	7	6	8.08	0.0	0.0	0.0

MES : à partir de mesures

MOY : moyenne de 100 valeurs générées en ajoutant une erreur aléatoire à la mesure

ECT : écart-type

Influence des erreurs de mesure aléatoires sur la reconstitution des formes des maquettes en bois avec chaque capteur

REPTATION CAEN1 : DEFORMATIONS RELATIVES (microdeformations)

- la deformation de reference est celle du : 14-03-84 ,18h *

			1cm	6cm	11cm	16cm	21cm	26cm	31cm	36cm	41cm	46cm
41 *	15-03-84	08h30	-49	333	1	1	2	-12	6	0	8	0
42 *	15-03-84	10h	-52	347	1	0	2	-12	4	0	11	2
43 *	15-03-84	12h	-53	363	1	2	2	-14	5	0	12	1
44 *	15-03-84	15h	-53	372	-1	0	0	-10	7	0	14	4
45 *	15-03-84	18h	-58	350	-5	2	10	-13	10	0	14	0
46 *	16-03-84	09h	-67	191	-46	5	10	-21	15	0	23	1
47 *	16-03-84	12h	-66	167	-25	7	10	-18	13	0	26	-1
48 *	16-03-84	15h	-56	161	16	8	11	-23	17	0	26	-2
49 *	16-03-84	16h30	-59	150	50	9	18	-22	11	0	29	-1
50 *	16-03-84	18h	-63	146	81	12	18	-24	21	0	32	2
51 *	17-03-84	10h	-63	143	284	14	26	-28	21	0	39	-4
52 *	17-03-84	11h30	-63	143	285	16	31	-31	12	0	40	-4
53 *	17-03-84	13h45	-63	141	283	11	28	-29	26	0	41	-5
54 *	17-03-84	18h45	-60	142	269	10	32	-28	30	0	46	-2
55 *	19-03-84	09h	-49	209	187	92	76	-48	37	0	68	-4
56 *	19-03-84	12h	-39	192	196	52	84	-48	40	0	62	-6
57 *	19-03-84	14h30	-33	201	207	38	102	-47	47	0	74	0

REPTATION CAEN1 : DEPLACEMENTS RELATIFS (millimetres)

la reference est le 14-03-84 ,18h *

			Surf	1cm	6cm	11cm	16cm	21cm	26cm	31cm	36cm	41cm	46cm
41 *	15-03-84	08h30	1.27	0.83	0.20	0.22	0.15	0.18	0.10	0.07	0.01	0.00	0.00
42 *	15-03-84	10h	1.44	0.98	0.32	0.32	0.25	0.26	0.17	0.11	0.04	0.00	0.00
43 *	15-03-84	12h	1.50	1.01	0.31	0.32	0.23	0.26	0.17	0.11	0.03	0.00	0.00
44 *	15-03-84	15h	1.79	1.29	0.56	0.53	0.42	0.38	0.25	0.16	0.06	0.00	0.00
45 *	15-03-84	18h	1.76	1.29	0.55	0.52	0.33	0.32	0.18	0.12	0.02	0.00	0.00
46 *	16-03-84	09h	1.30	1.07	0.79	0.80	0.54	0.53	0.31	0.20	0.05	0.00	0.00
47 *	16-03-84	12h	1.49	1.27	0.87	0.83	0.55	0.54	0.31	0.21	0.04	0.00	0.00
48 *	16-03-84	15h	1.83	1.60	0.92	0.83	0.53	0.54	0.30	0.20	0.03	0.00	0.00
49 *	16-03-84	16h30	2.26	2.01	1.08	0.90	0.58	0.57	0.34	0.23	0.04	0.00	0.00
50 *	16-03-84	18h	3.05	2.77	1.55	1.24	0.83	0.76	0.45	0.29	0.07	0.00	0.00
51 *	17-03-84	10h	4.98	4.57	1.92	1.28	0.79	0.76	0.42	0.29	0.03	0.00	0.00
52 *	17-03-84	11h30	4.82	4.41	1.78	1.16	0.69	0.70	0.41	0.29	0.03	0.00	0.00
53 *	17-03-84	13h45	5.13	4.72	2.03	1.40	0.86	0.82	0.43	0.29	0.03	0.00	0.00
54 *	17-03-84	18h45	5.53	5.11	2.42	1.75	1.11	1.01	0.55	0.36	0.06	0.00	0.00
55 *	19-03-84	09h	7.41	6.83	3.89	2.71	1.52	1.40	0.78	0.53	0.08	0.00	0.00
56 *	19-03-84	12h	6.84	6.33	3.46	2.54	1.38	1.27	0.68	0.46	0.05	0.00	0.00
57 *	19-03-84	14h30	8.07	7.53	4.35	3.32	1.93	1.67	0.94	0.62	0.12	0.00	0.00

REPTATION CAEN2 : DEFORMATIONS RELATIVES (microdeformations)

- la deformation de reference est celle du : 04-06-84 ,10h *

		8cm	13cm	18cm	23cm	28cm	33cm	38cm	43cm	48cm	
30 *	04-06-84	12h	54	14	1	14	12	4	15	13	5
31 *	04-06-84	14h	56	15	3	12	14	-1	21	18	2
32 *	04-06-84	16h	-144	20	11	14	19	-4	24	28	4
33 *	04-06-84	18h	-267	24	18	16	24	-6	27	37	5
34 *	05-06-84	08h30	-348	340	55	26	44	-38	50	46	-5
35 *	05-06-84	10h	-346	378	-1	16	55	-40	48	42	-6
36 *	05-06-84	12h	-355	450	-5	26	52	-44	51	37	-5
37 *	05-06-84	13h45	-363	492	-8	16	53	-49	48	32	-10
38 *	05-06-84	17h50	-360	384	130	15	65	-42	47	36	14
39 *	06-06-84	08h30	-342	416	492	-22	71	-45	39	14	23
40 *	06-06-84	10h	-345	408	512	-28	68	-49	36	8	18
41 *	06-06-84	12h	-344	407	538	-27	69	-49	32	7	21
42 *	06-06-84	14h	-342	409	554	-24	75	-45	41	5	20
43 *	06-06-84	16h	-337	428	558	-15	80	-41	38	9	33
44 *	06-06-84	18h	-333	458	552	12	90	-31	42	17	50
45 *	07-06-84	08h30	-325	483	499	210	93	-36	24	39	46
46 *	07-06-84	10h	-322	485	508	221	99	-33	12	52	52
47 *	07-06-84	12h	-319	488	497	250	100	-28	6	64	50
48 *	07-06-84	14h	-316	475	507	273	101	-28	-2	82	44
49 *	07-06-84	16h	-314	476	506	291	111	-30	-17	99	26
50 *	07-06-84	18h	-312	473	509	311	105	-35	-16	98	17

REPTATION CAEN2 : DEPLACEMENTS RELATIFS (millimetres)

la reference est le 04-06-84 ,10h *

		8cm	13cm	18cm	23cm	28cm	33cm	38cm	43cm	48cm	
30 *	04-06-84	12h	2.26	1.71	1.20	0.79	0.47	0.21	0.06	0.01	0.00
31 *	04-06-84	14h	2.45	1.86	1.33	0.88	0.52	0.21	0.04	0.00	0.00
32 *	04-06-84	16h	3.33	2.52	1.81	1.23	0.76	0.33	0.07	0.01	0.00
33 *	04-06-84	18h	4.12	3.10	2.24	1.53	0.96	0.43	0.09	0.01	0.00
34 *	05-06-84	08h30	5.29	3.41	2.34	1.56	1.01	0.37	0.02	-0.01	0.00
35 *	05-06-84	10h	4.58	3.10	2.16	1.39	0.89	0.32	0.01	-0.01	0.00
36 *	05-06-84	12h	4.53	2.97	2.04	1.31	0.86	0.30	0.01	-0.01	0.00
37 *	05-06-84	13h45	3.59	2.21	1.50	0.93	0.62	0.17	-0.04	-0.01	0.00
38 *	05-06-84	17h50	6.67	4.11	2.82	1.89	1.28	0.60	0.17	0.02	0.00
39 *	06-06-84	08h30	8.27	3.59	2.21	1.49	1.07	0.55	0.21	0.03	0.00
40 *	06-06-84	10h	7.40	2.82	1.63	1.09	0.82	0.42	0.16	0.02	0.00
41 *	06-06-84	12h	7.62	2.86	1.63	1.10	0.84	0.45	0.18	0.03	0.00
42 *	06-06-84	14h	8.31	3.27	1.87	1.20	0.86	0.43	0.17	0.03	0.00
43 *	06-06-84	16h	9.61	4.25	2.59	1.73	1.23	0.68	0.29	0.05	0.00
44 *	06-06-84	18h	12.21	6.20	3.95	2.66	1.84	1.03	0.44	0.07	0.00
45 *	07-06-84	08h30	15.18	7.83	4.28	2.74	1.95	1.13	0.44	0.06	0.00
46 *	07-06-84	10h	16.20	8.55	4.78	3.10	2.22	1.32	0.51	0.07	0.00
47 *	07-06-84	12h	17.04	9.12	5.08	3.27	2.33	1.38	0.51	0.07	0.00
48 *	07-06-84	14h	17.74	9.53	5.27	3.39	2.41	1.41	0.48	0.06	0.00
49 *	07-06-84	16h	17.40	9.11	4.79	2.96	2.12	1.23	0.35	0.04	0.00
50 *	07-06-84	18h	16.90	8.59	4.30	2.60	1.88	1.08	0.28	0.02	0.00

Annexe 6.1

DESCRIPTION DU PROFIL PEDOLOGIQUE AU SITE DE SCHILDMATT

(d'après AMIET, 1980)

- A₀ +7-00 cm Litière : aiguilles de conifères, quelques feuilles de hêtre, nombreuses racines rougeâtres, quelques grains minéraux.
- A₁ 00-10 cm Moder noir (7.5 YR 4/2, à sec) légèrement fibreux. Nombreux grains de quartz blancs (2mm), quelques graviers de 1 à 2 cm. Nombreuses racines pourries dont certaines sont rougeâtres. Aspect gras au toucher. Limite inférieure nette. Densité apparente très faible, inférieure à 0.6 g/cm³, liée à la forte teneur en matière organique (20 à 40 %).
- A₁/B_h 10-18 cm Horizon humifère brun violacé (7.5 YR 5/3, à sec) passant progressivement au brun (7.5 YR 5/4). Texture sablo-limoneuse, structure polyédrique angulaire. Quelques grains de quartz et graviers altérés, quelques cailloux d'environ 10 cm. Nombreuses racines fines. Transition graduelle très ondulée. Densité apparente faible : 0.7 g/cm³. Teneur en matière organique forte, supérieure à 10 %.
- B_h 18-60 cm Horizon ocre-brun pâle (7.5 YR 6/4 à 7.5 YR 5/4 à sec). Texture sablo-limoneuse. Structure polyédrique subangulaire à agrégats très fins. Forte porosité, très nombreux cailloux d'une dizaine de centimètres et graviers. Racines de taille moyenne et grosse. Transition ondulée à peine perceptible. Densité apparente : 0.9 g/cm³.
- B_s 60-100cm Horizon ocre-brun pâle (7.5 YR 6/4 à 7.5 YR 6/6 à sec). Texture sablo-limoneuse. Structure grumeleuse à agrégats très fins. Nombreux cailloux et blocs subanguleux de 10 à 30 cm de long et graviers. Quelques racines de grosse taille. Densité apparente de 1.3 à 1.4 g/cm³.
- C > 100cm Arène granitique de couleur ocre-brun beige à poches sableuses. Densité apparente de 1.4 à 1.5 g/cm³.

	<.002	<.020	<.050	<.080	<.125	<.200	<.500	<1.00	<2.00	>2mm	% MO
SCHI 00- 05	7.6	13.2	13.8	2.6	3.2	5.8	18.3	22.3	13.3	25.9	20.7
SCHI 05- 10	10.8	15.0	12.7	3.5	3.6	6.0	17.6	21.4	9.5	38.6	13.4
SCHI 25- 29	1.8	9.1	13.9	5.7	6.8	10.9	24.0	18.2	9.8	26.5	13.9
SCHI 42- 47	2.1	11.3	14.4	5.2	5.9	8.8	22.3	20.6	9.6	33.1	12.5
SCHI 43- 48	1.8	10.4	10.6	6.8	7.5	10.8	22.2	17.5	12.5	29.6	12.6
SCHI 45- 50	2.5	13.4	11.8	6.3	6.3	9.6	20.8	18.9	10.4	31.2	12.7
SCHI 48- 53	1.6	10.2	12.1	6.5	6.8	10.5	23.7	19.0	9.9	28.0	11.4
SCHI 58- 63	1.5	9.2	15.6	7.4	7.4	10.5	22.5	16.7	9.4	39.1	5.6
SCHI 60- 65	1.8	9.8	9.1	6.4	6.9	9.7	24.6	22.7	9.1	27.6	6.2
SCHI 70- 75	1.3	8.0	12.6	7.9	8.4	10.5	21.5	19.6	10.3	20.9	3.9
SCHI 70- 75	1.2	10.8	12.8	7.4	7.9	10.6	21.8	18.7	8.9	27.7	4.4
SCHI 87- 92	1.6	9.3	12.4	8.9	9.3	10.8	20.9	18.4	8.7	33.1	3.4
SCHI 91- 96	1.7	9.0	11.0	7.5	7.8	10.6	22.5	19.1	10.9	31.3	3.3
SCHI 94- 99	1.6	7.1	10.5	7.8	8.4	10.6	21.4	20.9	11.6	27.4	3.2
SCHI 102-107	1.5	5.5	8.3	4.5	4.8	6.2	20.5	30.6	18.2	42.5	2.4
SCHI 110-115	1.1	5.4	6.5	6.8	7.4	11.1	26.7	22.1	13.0	34.3	2.5
SCHI 125-130	0.3	3.7	6.2	4.4	5.7	8.7	24.5	29.1	17.4	45.5	1.9

Annexe 6.2

LITIERE ET HORIZON ORGANIQUE A SCHILDMATT :

description des lames minces.

Un bloc a été prélevé dans la litière et les deux horizons de surface au site de Schildmatt en Mai 1984. Les lames minces ont été réalisées au Centre de Géomorphologie du C.N.R.S. à Caen et les descriptions nous ont été communiquées par B. VAN VLIET-LANOE.

Une section du bloc, taillée latéralement dans le sens de la pente, met en évidence des indentations inclinées vers l'aval au contact de la litière et du sol : celle-ci se déplacerait donc plus rapidement.

lame 1 : A₀ (litière)

- tiges de graminées, aiguilles de conifères, feuilles de hêtres et de graminées, bourgeons foliaires, nombreuses racines dont certaines sont mycorhizées, rougeâtres, riches en tanin (milieu froid et engorgement saisonnier),
- mycéliums et spores en abondance (liée à la date d'échantillonnage et au séchage lent),
- déjections d'oribotes dans les tissus racinaires,
- déjections floconneuses d'enchitréides et d'acariens, contenant toujours du minéral en profondeur,
- nombreux thécamoebiens,
- une diatomée

lame 2 : A₁ (moder noir)

horizon organo-minéral, avec des déjections d'enchitréides, des mycéliums et des racines mycorhizées dont il ne subsiste que le manchon mycélien noir. Spores et quelques thécamoebiens.

lame 3 : A₁ / B_h

horizon organo-minéral, avec encore des déjections de deux sortes d'enchitréides: déjections noires, floconneuses et déjections brunes. Nombreuses sclérotés brunes. Traces de revêtement organique sur des fragments minéraux.

Site	Prof	ρ (g/cm ³)	Ksat (cm/h)	θ à $\psi=0$ (%)	0.4 (%)	1.0 (%)	1.5 (%)	2.0 (%)	θ à pF	2.3 (%)	2.7 (%)	3.5 (%)	4.2 (%)
SCHI	00-05	0.573	212.10	70.5	67.1	66.5	52.9	43.0	34.9	32.7	28.1	18.8	17.0
SCHI	05-10	0.919	39.45	58.4	56.9	54.9	46.9	39.7	29.7	26.5	21.6	16.7	14.2
SCHI	25-29	0.762	72.40	64.5	62.0	60.2	50.7	35.7	25.6	23.2	20.4	16.6	10.3
SCHI	42-47	0.897	70.79	60.9	59.7	58.1	49.7	32.1	23.6	21.6	18.3	15.2	10.1
SCHI	43-48	0.908	75.41	58.6	57.4	56.0	47.8	32.0	23.9	21.8	18.8	15.6	9.7
SCHI	45-50	0.874	53.69	67.6	60.1	58.6	51.4	36.4	26.4	23.5	20.6	15.4	9.3
SCHI	48-53	0.853	120.93	63.9	62.9	56.3	47.5	34.0	25.5	22.6	19.9	15.9	11.5
SCHI	58-63	1.312	47.97	46.6	45.7	44.1	32.3	22.8	18.1	16.6	14.7	14.4	7.4
SCHI	60-65	1.134	36.72	53.2	52.6	51.3	43.7	28.7	21.1	18.7	16.5	14.1	7.4
SCHI	70-75	1.320	26.94	46.0	44.3	41.4	32.9	22.7	17.0	14.8	12.0	10.4	5.8
SCHI	70-75	1.310	39.00	45.8	44.6	43.0	33.7	22.2	16.8	15.0	12.6	11.0	6.0
SCHI	87-92	1.470	10.84	41.7	38.7	36.8	32.1	23.9	17.2	14.8	12.0	10.7	5.3
SCHI	91-96	1.459	4.06	42.9	40.2	36.5	31.7	24.0	17.6	14.7	11.5	9.2	4.8
SCHI	94-99	1.466	10.18	42.5	40.6	38.4	33.1	23.8	16.8	14.4	11.7	11.8	6.4
SCHI	102-107	1.510	27.29	41.4	37.9	34.2	27.0	16.2	11.5	9.8	8.2	8.9	4.7
SCHI	110-115	1.424	32.91	41.6	38.1	33.8	29.1	18.1	11.1	9.2	7.4	6.6	3.9
SCHI	125-130	1.564	33.15	37.5	34.6	31.0	25.8	15.5	9.0	7.6	6.4	5.8	3.2

Courbes de rétention hydrique : valeurs expérimentales.

Annexe 6.4

Prof (cm)	Horizon	LL (%)	LP (%)	IP (%)	MO (%)	(g/cm ³)
00-05	A ₁	<u>203</u>	<u>145</u>	<u>58</u>	<u>42.0</u>	0.58
05-13	A ₁ /B _h	87	55	32	9.2	0.73
13-35	B _h	74	54	20	11.1	0.87
35-60	B _h	69	42	27	6.6	1.03
60-90	B _s	50	35	15	3.7	1.25

(Les valeurs soulignées sont aberrantes : la porosité et le volume de cet échantillon sont très différents suivant qu'il est sec ou humide).

Limites d'Atterberg.

Prof. (cm)	2.5	7.5	15	22.5	30
------------	-----	-----	----	------	----

Profil n°

1			2.96	3.63	C
2	2.80	2.85	3.00	3.00	3.00
3	0.36	0.36	5.00	C	C
4	0.25	2.80	4.79	C	-
5	0.47	3.62	C	-	-
6	0.28	3.50	C	-	-
7	0.48	3.34	C	-	-
8	2.50	4.95	5.20	C	-
9	0.40	2.80	C	-	-
10	0.60	2.56	3.67	C	-
11	1.40	3.40	C	-	-
12	0.58	3.19	3.19	C	-
13	1.17	2.18	4.07	4.07	C
14	0.87	4.00	4.00	4.00	C
15	0.85	2.47	3.67	C	-
16	0.58	5.50	5.10	C	-
17	0.49	1.38	3.70	5.94	C
18	0.97	3.00	4.57	4.57	C
19	0.73	3.14	C	-	-
20	1.20	4.20	4.90	5.50	C

(C : à ce niveau, la pointe du pénétromètre a rencontré un caillou).

Résistance à la pénétration.

Caractéristiques mécaniques du sol mesurées au site de Schildmatt.

PRECIPITATIONS

Annexe 6.5

	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	Moy.	ECT.
Lac Vert (1044 m)	1505.2	1732.8	1802.5	1832.0	1833.3	2090.4	2028.0	1812.7	1459.8	1744.1	298.6
Geisberg (743 m)	801.9	1434.0	1281.5	1336.0	1281.0	1373.1	1464.8	1392.1	1125.9	1276.8	204.5

Précipitations annuelles (mm/an) au Lac Vert (1044 m) et au Geisberg (743 m) : 1976 - 84

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Moyenne arithmétique	139.2	113.3	98.6	85.5	95.5	81.9	100.0	76.2	74.8	104.3	127.7	161.5
Moyenne géométrique	132.9	89.1	81.1	65.4	84.9	71.2	86.8	67.7	63.9	87.0	98.8	135.0
Mg 10 + logP	183.1	207.0	164.8	140.4	138.5	129.1	156.8	116.1	117.2	163.5	263.7	265.5
Mg 10 - logP	96.5	38.3	39.9	30.4	52.0	39.2	48.1	39.5	34.9	46.3	37.0	68.7

Précipitations mensuelles corrigées (30j, mm/mois) au Geisberg (743 m) : 1976 - 84

TEMPERATURES

		JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNEE
Maxima	MOY	1.8	2.7	6.4	8.8	13.0	17.6	20.0	18.8	16.3	12.0	6.7	3.5	10.6
	ECT	1.9	2.7	1.8	1.3	1.9	1.9	2.6	1.3	1.7	1.4	2.0	1.7	0.7
Minima	MOY	-2.8	-2.4	0.6	2.0	6.1	10.2	12.4	11.7	9.6	6.1	1.5	-1.6	4.5
	ECT	2.0	2.0	1.7	0.9	1.2	1.5	2.0	1.1	1.3	1.3	1.6	1.6	0.5
Moyenne	MOY	-0.5	0.1	3.5	5.4	9.6	13.9	16.2	15.3	13.0	9.1	4.1	0.9	7.5
	ECT	1.9	2.3	1.7	1.1	1.5	1.7	2.3	1.2	1.5	1.4	1.8	1.6	0.6

MOY : Moyenne arithmétique ECT : Ecart-type

Températures moyennes (°C) au Geisberg (840 m) : 1976 - 84

ENNEIGEMENT

		Hauteurs (cm)							16 Janvier			16 Février			16 Mars			
		OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	NB	F	CUM	NB	F	CUM	NB	F	CUM	
01	MOY	0	0	6	14	16	25	5	17	34.7	34.7	16	32.7	32.7	33	46.9	46.9	
	ECT	0.0	1.6	10.9	18.8	22.7	31.1	15.1	] 0, 10]	6	12.2	46.9	2	4.1	36.7	4	8.2	55.1
06	MOY	0	0	8	18	22	24	7	] 10, 20]	8	16.3	63.3	11	22.5	59.2	2	4.1	59.2
	ECT	0.1	1.5	12.2	20.0	27.0	33.4	21.2	] 20, 30]	5	10.2	73.5	2	4.1	63.3	6	12.2	71.4
11	MOY	0	1	10	21	24	22	5	] 30, 40]	6	12.2	85.7	6	12.2	75.5	5	10.2	81.6
	ECT	0.9	3.7	12.2	26.9	28.2	31.3	20.5	] 40, 50]	2	4.1	89.8	1	2.0	77.6	5	10.2	91.8
16	MOY	0	2	11	21	34	20	4	] 50, 60]	1	2.0	99.8	3	6.1	83.7			
	ECT	0.4	5.7	16.8	25.8	50.6	29.6	15.6	] 60, 70]	1	2.0	93.9						
21	MOY	0	3	14	21	29	14	3	] 70, 80]	2	4.1	98.0	1	2.0	85.7	2	4.1	95.9
	ECT	0.5	8.4	19.1	22.3	33.3	22.2	10.2	] 80, 90]	2	4.1	89.8	1	2.0	89.8	1	2.0	98.0
26	MOY	1	5	11	20	26	9	0	] 90,100]	1	2.0	91.7						
	ECT	3.0	9.6	17.7	22.1	30.3	17.1	1.9	] 100,110]	1	2.0	93.7						
									] 110,120]	1	2.0	95.9						
									] 120,130]	1	2.0	98.0						
									] 130,140]									
									] 140,150]						1	2.0	100.0	
									> 150						1	2.0	100.0	

MOY : Moyenne arithmétique
ECT : Ecart type

Moyenne et écart type des hauteurs de neige relevés le premier jour de chaque pentade au Lac Noir (963 m) 1920/21 - 1969/70

NB : Effectif par classe F : Fréquence (%)
CUM : Fréquence cumulée (%)

Fréquence des hauteurs de neige relevées les 16 de chaque mois de janvier, février et mars au cours des 49 hivers (1920/21 - 1069/70) au Lac Noir (963 m)

Données climatiques utilisées pour les figures dans le texte.

NOV 84 DÉC 84 JAN 85 FEV 85 MAR 85 AVR 85 MAI 85 JUN 85 JUL 85

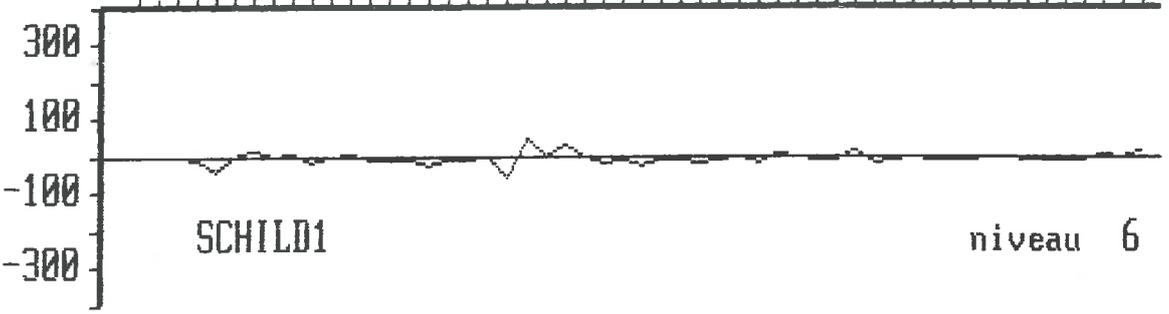
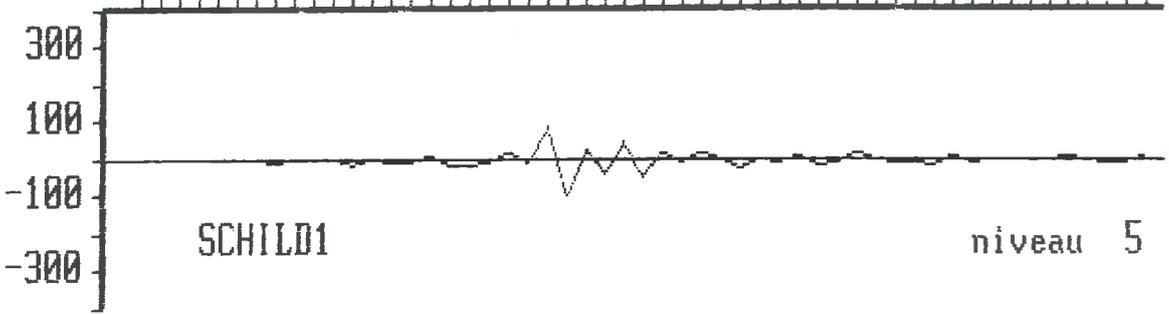
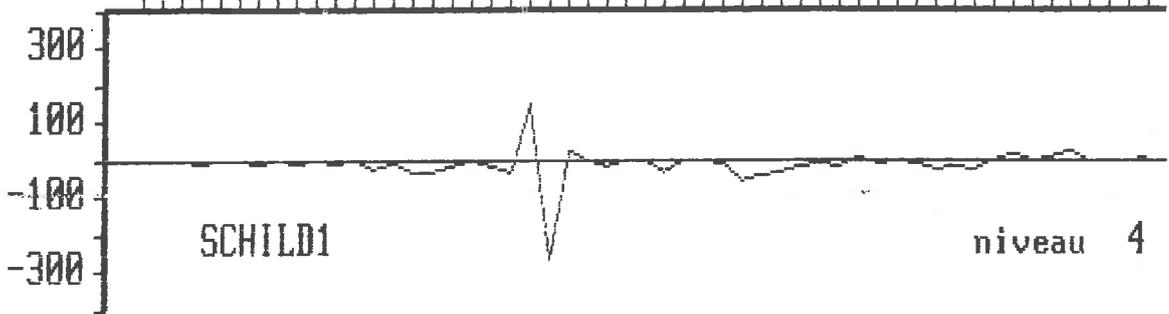
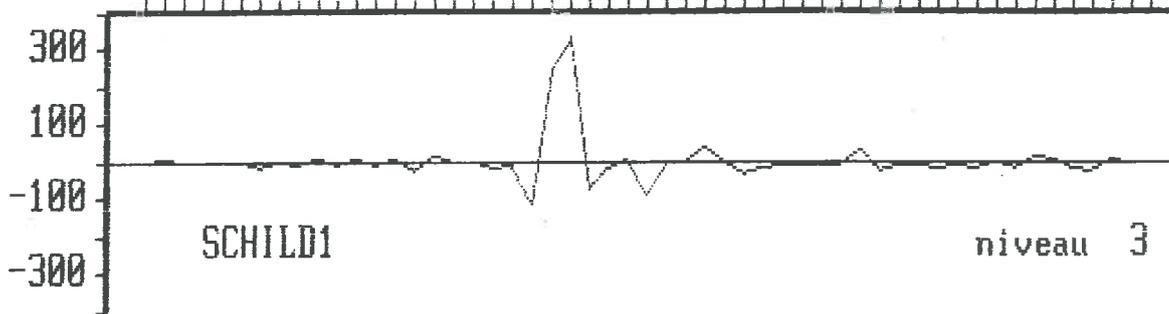
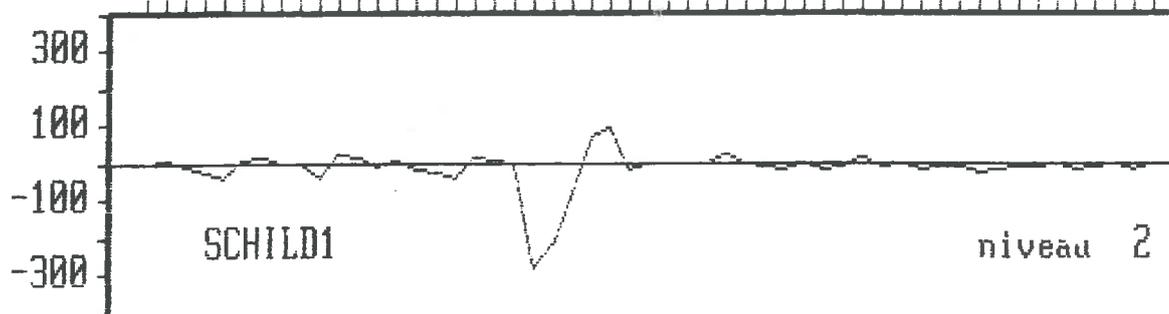
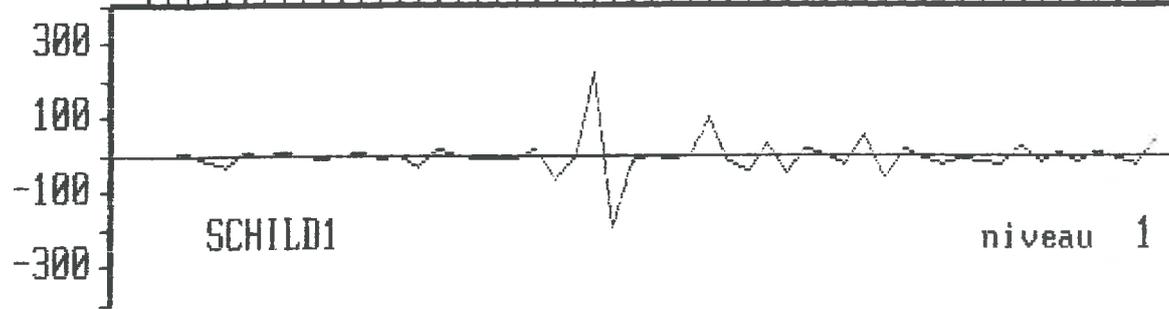
	NOV 84	DÉC 84	JAN 85	FEV 85	MAR 85	AVR 85	MAI 85	JUN 85	JUL 85
Geisberg (743 m)	112.7	41.0	91.4	45.4	61.9	138.3	125.0	108.9	53.4
Schildmatt ferme (885 m)	165.7							157.4	67.1

	NOV 84	DÉC 84	JAN 85	FEV 85	MAR 85	AVR 85	MAI 85	JUN 85	JUL 85
Geisberg (840 m) MAX	10.3	4.0	-3.2	+2.4					
MIN	5.0	-0.8	-8.5	-3.8					
MOY	7.7	1.6	-5.9	-0.7					

	NOV 84	DÉC 84	JAN 85	FEV 85	MAR 85	AVR 85	MAI 85	JUN 85	JUL 85
Moyenne des hauteurs maxima de neige (cm) au site de Schildmatt (950 m)	0	4	32	5	20	12	0	0	0
Enneigement									
Nombre approximatif de jours avec de la neige au sol.	0	7	30	13	16	2	0	0	0

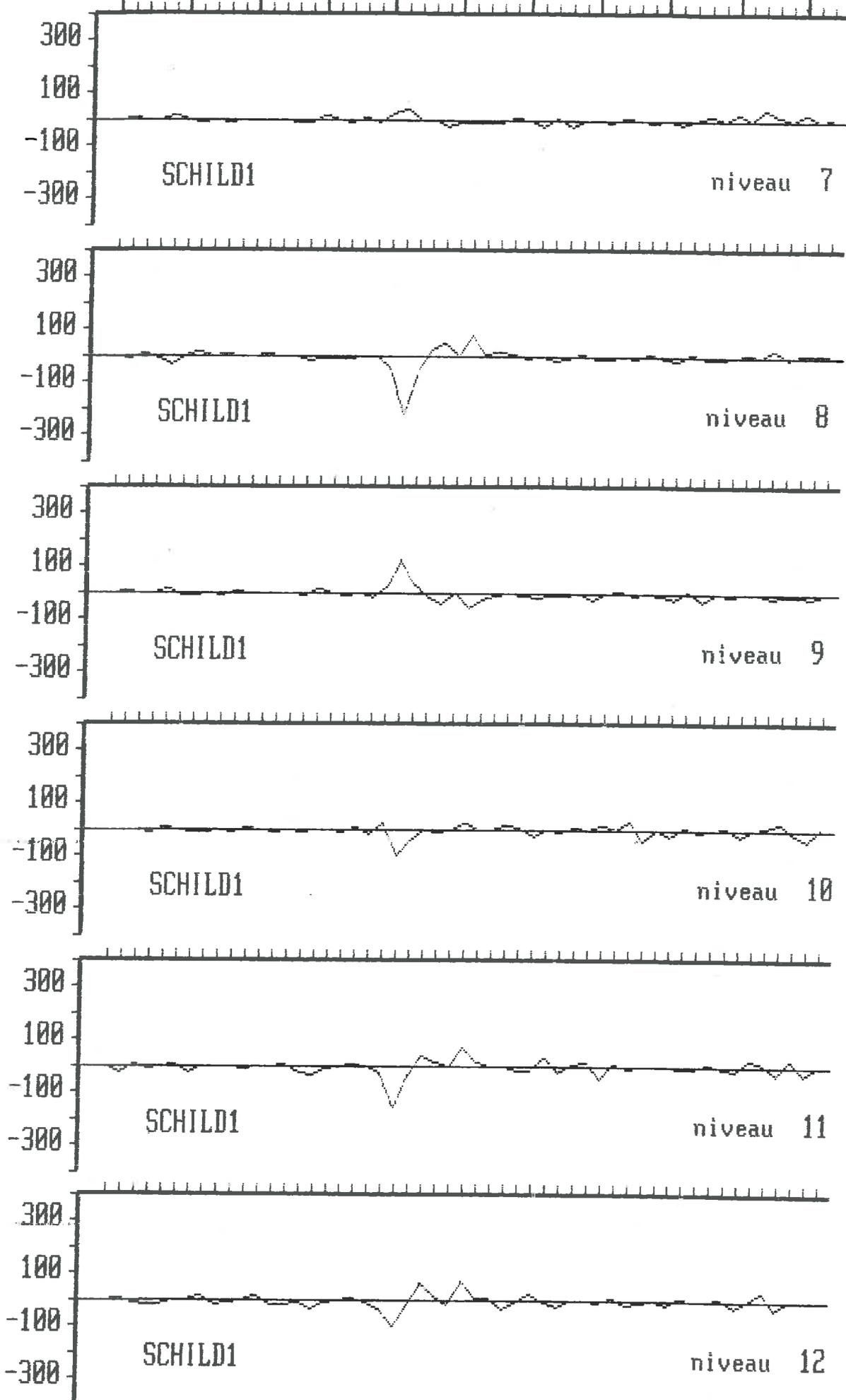
Précipitations, températures et enneigement de Novembre 1984 à Juillet 1985

12/11 24/11 24/12 28/01 11/02 4/03 1/04 3/05 10/05 8/06 14/07

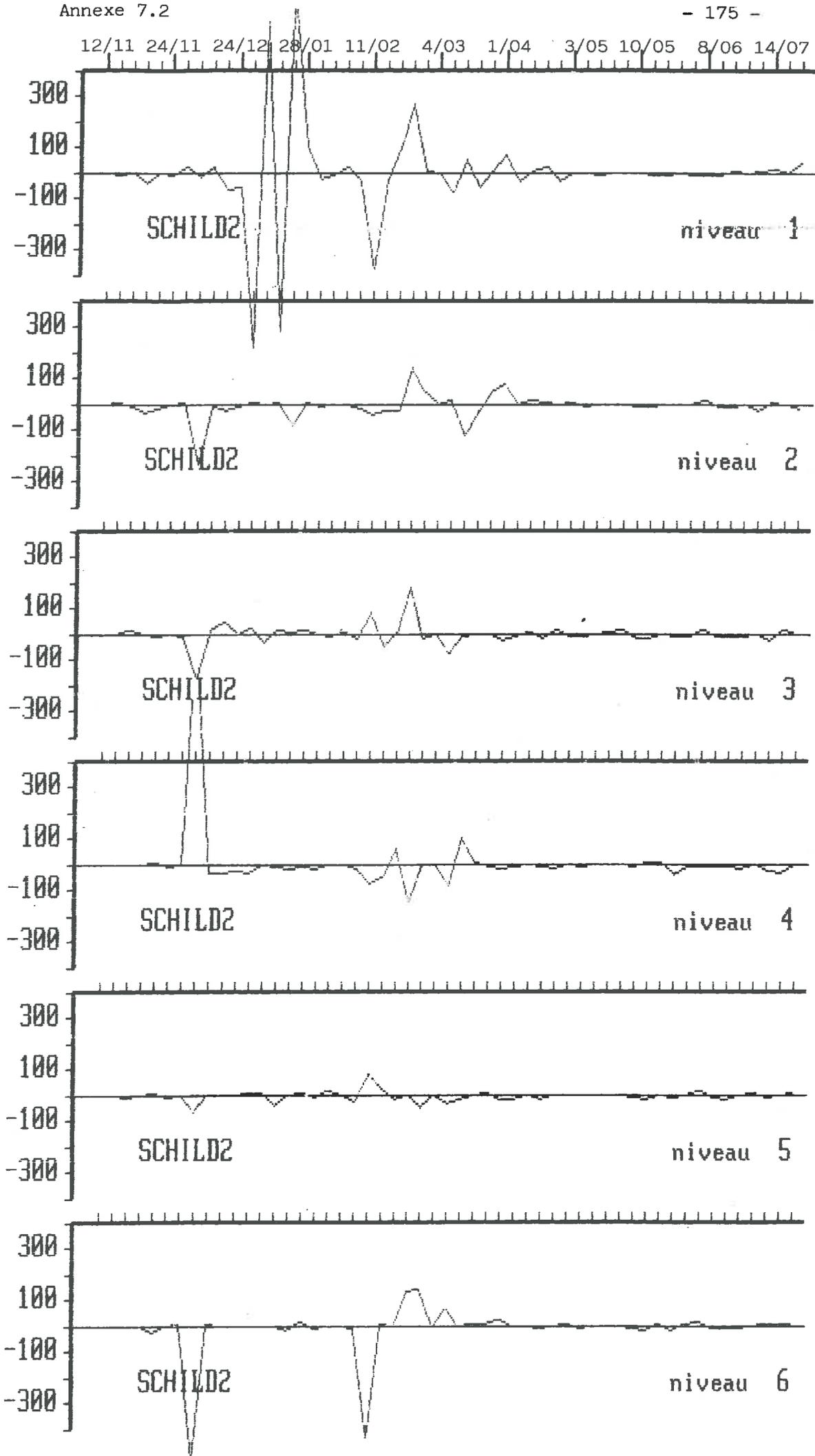


Evolution des déformations relatives à chaque niveau d'une mesure à l'autre.

12/11 24/11 24/12 28/01 11/02 4/03 1/04 3/05 10/05 8/06 14/07

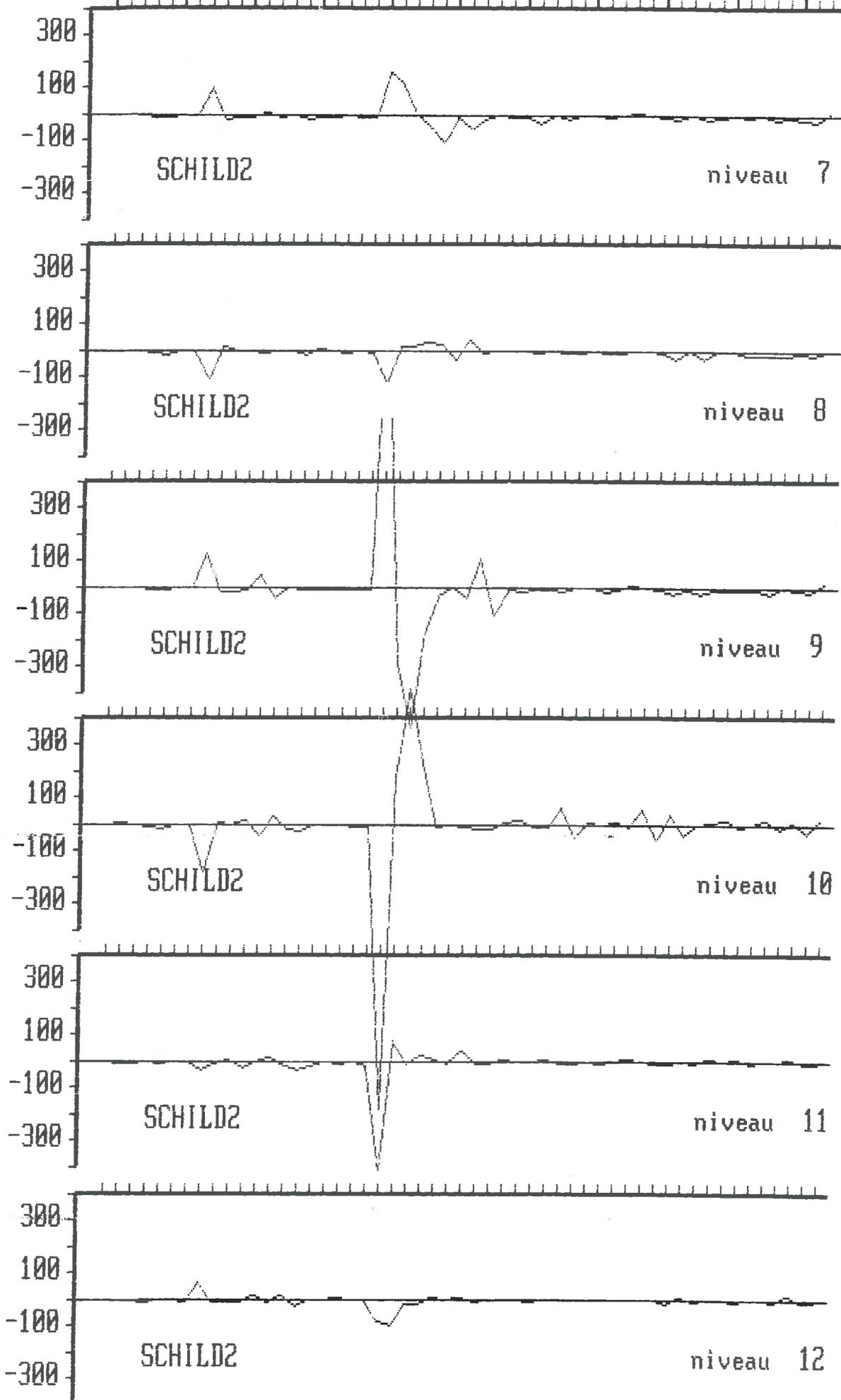


Evolution des déformations relatives à chaque niveau d'une mesure à l'autre.



Evolution des déformations relatives à chaque niveau d'une mesure à l'autre.

12/11 24/11 24/12 28/01 11/02 4/03 1/04 3/05 10/05 8/06 14/07



Evolution des déformations relatives à chaque niveau d'une mesure à l'autre.

Prof. (cm)	Janvier - Juillet		gel - dégel du sol		dégel du sol		fonte de la neige	
	MOY	ECT	MOY	ECT	MOY	ECT	MOY	ECT
SCHILD1								
surf.								
2			11.8	1.85	1.0	0.75		
7			11.2	1.76	0.8	0.68		
12			10.4	1.53	0.3	0.51		
17			9.4	1.30	0.2	0.35		
22			8.2	1.08	0.1	0.22		
27			6.9	0.87	0.1	0.10		
32			5.5	0.68	0.0	0.02		
37			4.1	0.50				
42			3.2	0.35				
47			2.0	0.21				
52			0.8	0.10				
			0.1	0.02				
SCHILD2								
surf.			14.7	1.42	1.9	0.59		
3			12.6	1.31	1.4	0.51		
8			10.3	1.14	1.0	0.38		
13			9.0	0.97	0.7	0.27		
18			7.0	0.81	0.3	0.16		
23			5.1	0.65	0.0	0.07		
28			4.4	0.51	0.0	0.01		
33			3.5	0.38				
38			2.4	0.26				
43			0.6	0.16				
48			0.0	0.07				
53			0.0	0.01				
SCHILD3								
surf.			10.2	0.96	2.9	0.44	2.8	0.96
2			9.1	0.90	2.5	0.41	1.9	0.90
7			6.0	0.75	1.8	0.33	1.4	0.51
12			3.3	0.61	1.0	0.27	0.8	0.38
17			2.0	0.47	0.8	0.21	0.6	0.27
22			0.8	0.35	0.2	0.15	0.3	0.16
27			-0.3	0.24	-0.4	0.11	0.1	0.07
32			-0.3	0.15	-0.3	0.06	0.0	0.01
37			0.1	0.07	0.0	0.03	0.1	0.07
42			0.0	0.01	0.0	0.00	0.0	0.01

Valeurs des déplacements calculés aux différentes profondeurs mesurées au site de Schildmatt.

Date	1 (L = 25 cm)				2 (L = 15 cm)				3 (L = 20 cm)				4 (L = 20 cm)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
16/11/83	29.5	34.5	37.5	32.5	31.5	36.0	35.5	31.0	19.5	36.5	44.5	34.5	24.0	38.0	43.0	30.0
18/12/83	29.5	34.0	37.5	33.0	32.0	35.5	35.0	31.5	19.0	37.0	45.0	34.0	22.5	38.0	45.0	32.0
17/05/84	29.5	32.6	37.3	33.7	30.2	35.9	36.0	30.9	17.0	39.5	47.7	34.9	22.5	38.6	45.0	31.4
24/06/84	29.5	32.7	37.3	33.7	30.2	35.9	36.2	30.9	17.0	39.5	47.7	34.9	22.5	38.6	45.0	31.4
16/07/84	30.0	33.6	37.0	33.2	30.4	35.7	36.2	30.6	16.9	39.7	48.0	34.4	22.3	38.1	45.2	31.5
30/07/84	30.0	33.6	37.0	33.2	30.4	35.7	36.2	30.6	17.2	39.6	48.0	34.7	22.5	38.3	45.0	31.9
06/08/84	29.9	33.5	37.0	33.4	30.1	35.8	36.2	30.7	17.2	39.7	47.8	34.6	22.4	38.5	45.0	31.5
12/09/84	30.4	33.9	36.2	33.4	30.2	36.0	36.3	30.4	17.0	39.6	47.7	34.4	22.3	38.5	45.0	31.4
24/11/84	30.5	33.6	36.2	33.3	30.0	35.7	36.0	30.3	17.1	39.3	48.0	34.2	22.5	39.0	45.0	30.8
01/03/85	28.0	33.1	38.3	32.1	29.0	35.7	37.3	31.3	15.2	40.5	50.5	34.7	17.9	40.0	49.3	32.6
04/03/85	28.0	33.5	38.5	33.0	29.4	36.0	37.2	31.0	15.4	40.8	50.0	34.7	18.1	40.1	48.7	32.7
06/04/85	28.7	32.8	37.7	33.1	30.4	35.9	36.7	31.1	15.3	41.2	50.7	34.0	20.3	40.0	47.0	30.4
22/04/85	28.8	33.4	37.6	33.1	30.0	35.4	36.5	31.0	15.4	40.9	50.4	34.8	20.4	39.6	46.9	30.8
26/07/85	29.4	33.3	32.3	33.9	30.2	35.7	36.8	30.9	15.7	41.0	50.7	34.5	21.2	39.3	46.5	31.2

L : longueur du cylindre en PVC.

Mesures effectuées avec les tubes d'Anderson.

Annexe 7.5

SCHILD1

		2cm	7cm	12cm	17cm	22cm	27cm	32cm	37cm	42cm	47cm	52cm	57cm	
1 *	12-11-84	11h25	-1215	-826	-1066	-1313	-1821	-1727	-1812	-1147	-871	-638	-1231	-752
2 *	15-11-84	12h	-1208	-811	-1056	-1307	-1817	-1720	-1798	-1150	-863	-633	-1249	-738
3 *	15-11-84	16h05	-1200	-814	-1053	-1305	-1816	-1717	-1795	-1140	-861	-632	-1241	-741
4 *	19-11-84	13h55	-1211	-834	-1053	-1309	-1812	-1720	-1794	-1145	-860	-635	-1245	-752
5 *	24-11-84	11h05	-1239	-867	-1050	-1304	-1807	-1758	-1775	-1177	-838	-623	-1245	-765
6 *	24-11-84	15h25	-1225	-855	-1045	-1302	-1805	-1752	-1775	-1171	-840	-623	-1234	-759
7 *	30-11-84	16h15	-1223	-837	-1056	-1305	-1805	-1733	-1779	-1152	-846	-625	-1251	-754
8 *	03-12-84	10h05	-1213	-832	-1050	-1298	-1810	-1726	-1774	-1148	-843	-627	-1244	-737
9 *	10-12-84	10h55	-1208	-831	-1052	-1300	-1804	-1718	-1778	-1138	-844	-625	-1242	-747
10 *	17-12-84	11h30	-1215	-868	-1041	-1296	-1801	-1731	-1774	-1138	-833	-630	-1237	-752
11 *	24-12-84	12h35	-1209	-839	-1047	-1301	-1799	-1725	-1769	-1137	-830	-617	-1244	-747
12 *	01-01-85	14h	-1198	-817	-1032	-1296	-1808	-1717	-1762	-1127	-827	-617	-1238	-729
13 *	07-01-85	13h40	-1206	-818	-1039	-1319	-1803	-1719	-1760	-1122	-827	-624	-1236	-738
14 *	14-01-85	12h20	-1202	-807	-1025	-1320	-1810	-1724	-1766	-1120	-823	-618	-1227	-748
15 *	21-01-85	11h55	-1233	-822	-1047	-1345	-1814	-1727	-1774	-1130	-831	-625	-1249	-755
16 *	28-01-85	12h10	-1211	-846	-1028	-1371	-1800	-1746	-1756	-1133	-813	-620	-1277	-752
17 *	30-01-85	17h45	-1204	-885	-1024	-1384	-1815	-1753	-1754	-1136	-810	-616	-1284	-787
18 *	31-01-85	14h45	-1209	-867	-1021	-1379	-1825	-1756	-1755	-1143	-811	-623	-1284	-787
19 *	03-02-85	12h05	-1210	-854	-1036	-1390	-1831	-1753	-1746	-1138	-804	-614	-1276	-775
20 *	09-02-85	09h25	-1216	-850	-1044	-1419	-1813	-1806	-1754	-1136	-818	-626	-1275	-783
21 *	11-02-85	11h40	-1200	-1128	-1153	-1261	-1819	-1755	-1729	-1184	-788	-599	-1297	-815
22 *	18-02-85	11h05	-1258	-1344	-898	-1519	-1728	-1755	-1685	-1398	-655	-688	-1449	-911
23 *	25-02-85	11h05	-1264	-1416	-557	-1489	-1824	-1719	-1683	-1447	-621	-726	-1478	-933
24 *	01-03-85	10h	-1039	-1344	-625	-1486	-1799	-1714	-1676	-1416	-637	-726	-1436	-864
25 *	04-03-85	10h45	-1231	-1244	-639	-1502	-1835	-1725	-1697	-1365	-676	-728	-1417	-844
26 *	04-03-85	14h20	-1241	-1260	-630	-1501	-1785	-1728	-1698	-1364	-676	-726	-1414	-854
27 *	11-03-85	10h50	-1234	-1258	-715	-1496	-1828	-1749	-1701	-1281	-728	-697	-1335	-778
28 *	18-03-85	10h50	-1241	-1258	-709	-1527	-1810	-1757	-1707	-1268	-751	-693	-1314	-768
29 *	25-03-85	10h50	-1240	-1254	-709	-1526	-1812	-1760	-1708	-1250	-755	-688	-1309	-755
30 *	27-03-85	11h10	-1131	-1247	-665	-1525	-1792	-1771	-1699	-1241	-753	-670	-1307	-781
31 *	01-04-85	17h05	-1144	-1223	-662	-1532	-1791	-1772	-1698	-1248	-757	-662	-1319	-789
32 *	06-04-85	10h05	-1184	-1220	-693	-1587	-1808	-1765	-1721	-1244	-769	-681	-1334	-759
33 *	14-04-85	16h40	-1146	-1224	-705	-1625	-1803	-1777	-1709	-1254	-770	-674	-1300	-761
34 *	22-04-85	10h35	-1188	-1235	-706	-1655	-1810	-1766	-1730	-1256	-775	-677	-1322	-779
35 *	29-04-85	10h45	-1170	-1232	-711	-1666	-1801	-1763	-1723	-1243	-769	-667	-1311	-776
36 *	03-05-85	12h30	-1168	-1245	-717	-1667	-1810	-1771	-1716	-1244	-786	-664	-1288	-775
37 *	06-05-85	15h30	-1188	-1252	-725	-1676	-1815	-1774	-1722	-1245	-783	-648	-1329	-777
38 *	07-05-85	18h50	-1132	-1233	-690	-1664	-1797	-1757	-1711	-1242	-773	-647	-1319	-766
39 *	09-05-85	10h30	-1182	-1235	-711	-1670	-1796	-1768	-1708	-1249	-776	-609	-1326	-777
40 *	09-05-85	19h45	-1165	-1228	-714	-1669	-1797	-1769	-1713	-1235	-772	-642	-1325	-778
41 *	10-05-85	10h20	-1173	-1239	-715	-1675	-1800	-1768	-1712	-1240	-775	-642	-1324	-775
42 *	13-05-85	11h05	-1195	-1244	-725	-1694	-1809	-1774	-1722	-1250	-793	-664	-1323	-784
43 *	19-05-85	18h05	-1197	-1251	-730	-1704	-1801	-1775	-1715	-1236	-785	-653	-1324	-771
44 *	31-05-85	10h45	-1206	-1273	-745	-1724	-1809	-1780	-1695	-1240	-812	-655	-1330	-764
45 *	02-06-85	20h	-1226	-1282	-738	-1720	-1809	-1776	-1693	-1242	-806	-650	-1322	-760
46 *	08-06-85	17h15	-1197	-1284	-752	-1698	-1805	-1770	-1665	-1235	-810	-641	-1330	-747
47 *	09-06-85	11h40	-1207	-1289	-734	-1697	-1802	-1771	-1658	-1225	-808	-659	-1339	-767
48 *	17-06-85	11h25	-1199	-1289	-726	-1684	-1796	-1773	-1617	-1218	-804	-658	-1315	-765
49 *	02-07-85	10h40	-1209	-1303	-741	-1659	-1787	-1775	-1595	-1191	-813	-648	-1303	-729
50 *	07-07-85	11h45	-1200	-1309	-760	-1655	-1786	-1780	-1588	-1196	-818	-620	-1332	-760
51 *	14-07-85	17h55	-1208	-1302	-750	-1651	-1787	-1770	-1564	-1181	-821	-631	-1308	-753
52 *	26-07-85	18h25	-1226	-1314	-749	-1644	-1794	-1764	-1559	-1168	-835	-668	-1339	-753
53 *	29-07-85	19h	-1186	-1308	-745	-1633	-1786	-1748	-1551	-1158	-831	-659	-1335	-753

Valeurs brutes des mesures effectuées au site de Schildmatt.

SCHILD2

		3cm	8cm	13cm	18cm	23cm	28cm	33cm	38cm	43cm	48cm	53cm	58cm	
1	• 12-11-84	11h30	1002	-408	-1496	-1841	-1223	-2031	-384	-1523	-1313	-1862	-1281	-3545
2	• 15-11-84	12h05	1000	-398	-1489	-1836	-1218	-2026	-379	-1517	-1310	-1849	-1285	-3541
3	• 15-11-84	16h05	1000	-399	-1469	-1832	-1219	-2023	-377	-1515	-1304	-1848	-1286	-3538
4	• 19-11-84	14h	965	-425	-1469	-1831	-1214	-2023	-378	-1517	-1306	-1856	-1281	-3539
5	• 24-11-84	11h15	968	-440	-1473	-1820	-1202	-2040	-384	-1529	-1307	-1867	-1284	-3537
6	• 24-11-84	15h20	960	-437	-1472	-1823	-1208	-2038	-382	-1525	-1307	-1866	-1283	-3535
7	• 30-11-84	16h20	991	-424	-1479	-1821	-1207	-2029	-381	-1523	-1306	-1859	-1281	-3537
8	• 03-12-84	10h10	975	-655	-1647	-922	-1268	-2541	-272	-1620	-1168	-2035	-1307	-3473
9	• 10-12-84	11h	1000	-663	-1628	-952	-1264	-2530	-287	-1603	-1177	-2022	-1308	-3479
10	• 17-12-84	11h30	937	-687	-1577	-981	-1260	-2523	-288	-1600	-1186	-2021	-1297	-3487
11	• 24-12-84	12h40	886	-694	-1575	-1003	-1259	-2520	-293	-1597	-1191	-2000	-1315	-3490
12	• 01-01-85	14h05	213	-679	-1551	-1034	-1247	-2518	-280	-1604	-1143	-2037	-1308	-3470
13	• 07-01-85	12h45	886	-675	-1562	-1033	-1235	-2517	-286	-1603	-1176	-2005	-1292	-3478
14	• 14-01-85	12h30	195	-665	-1564	-1041	-1271	-2516	-284	-1597	-1170	-2014	-1303	-3458
15	• 21-01-85	12h	861	-740	-1556	-1056	-1269	-2531	-294	-1609	-1175	-2037	-1334	-3481
16	• 28-01-85	12h15	977	-727	-1536	-1061	-1260	-2515	-298	-1601	-1178	-2031	-1347	-3475
17	• 30-01-85	17h50	954	-733	-1529	-1071	-1268	-2523	-299	-1600	-1183	-2030	-1341	-3471
18	• 31-01-85	14h50	952	-729	-1535	-1067	-1250	-2518	-296	-1602	-1184	-2029	-1347	-3460
19	• 03-02-85	12h10	977	-725	-1524	-1064	-1249	-2518	-297	-1600	-1185	-2030	-1343	-3453
20	• 09-02-85	09h30	950	-737	-1540	-1080	-1269	-2524	-304	-1606	-1187	-2031	-1355	-3450
21	• 11-02-85	11h45	574	-775	-1446	-1147	-1189	-2951	-137	-1720	-115	-3103	-1758	-3523
22	• 18-02-85	11h10	553	-799	-1492	-1189	-1158	-2941	-22	-1703	-395	-2914	-1673	-3613
23	• 25-02-85	11h10	663	-818	-1484	-1122	-1173	-2937	-16	-1687	-916	-2390	-1678	-3627
24	• 01-03-85	10h05	938	-669	-1294	-1263	-1172	-2795	-62	-1655	-1084	-2143	-1652	-3640
25	• 04-03-85	10h50	947	-618	-1307	-1263	-1219	-2651	-163	-1626	-1110	-2144	-1637	-3631
26	• 04-03-85	14h25	952	-615	-1303	-1259	-1217	-2647	-165	-1651	-1108	-2138	-1643	-3630
27	• 11-03-85	10h55	885	-595	-1373	-1333	-1248	-2569	-219	-1610	-1144	-2143	-1600	-3620
28	• 18-03-85	10h55	947	-713	-1377	-1223	-1257	-2564	-228	-1617	-1029	-2153	-1603	-3624
29	• 25-03-85	11h	894	-735	-1377	-1212	-1253	-2554	-222	-1610	-1129	-2162	-1606	-3620
30	• 27-03-85	11h15	903	-685	-1372	-1214	-1244	-2545	-230	-1606	-1137	-2152	-1597	-3620
31	• 01-04-85	17h10	977	-603	-1390	-1227	-1255	-2518	-233	-1606	-1147	-2132	-1595	-3617
32	• 06-04-85	10h10	947	-597	-1393	-1233	-1267	-2517	-261	-1607	-1152	-2140	-1591	-3624
33	• 14-04-85	16h45	956	-575	-1381	-1227	-1260	-2513	-261	-1606	-1155	-2143	-1582	-3622
34	• 22-04-85	10h40	987	-561	-1394	-1234	-1274	-2515	-274	-1612	-1165	-2074	-1584	-3621
35	• 29-04-85	10h50	962	-554	-1377	-1250	-1268	-2512	-271	-1620	-1163	-2121	-1585	-3617
36	• 03-05-85	12h35	967	-545	-1378	-1243	-1267	-2503	-268	-1618	-1163	-2108	-1579	-3617
37	• 06-05-85	15h45	972	-551	-1384	-1249	-1266	-2507	-275	-1624	-1173	-2106	-1582	-3617
38	• 07-05-85	12h15	968	-550	-1382	-1245	-1266	-2507	-274	-1626	-1176	-2095	-1581	-3617
39	• 09-05-85	10h35	974	-545	-1374	-1238	-1266	-2500	-266	-1621	-1166	-2100	-1571	-3612
40	• 09-05-85	19h50	974	-544	-1358	-1233	-1265	-2496	-264	-1619	-1164	-2041	-1569	-3611
41	• 10-05-85	10h25	981	-545	-1374	-1240	-1268	-2503	-267	-1620	-1170	-2095	-1572	-3605
42	• 13-05-85	11h10	977	-548	-1385	-1231	-1279	-2513	-280	-1648	-1188	-2048	-1574	-3619
43	• 19-05-85	18h10	976	-544	-1380	-1219	-1276	-2503	-277	-1642	-1192	-2086	-1568	-3609
44	• 31-05-85	10h50	976	-543	-1385	-1256	-1282	-2512	-291	-1669	-1215	-2081	-1572	-3611
45	• 02-06-85	20h05	973	-542	-1390	-1263	-1276	-2503	-292	-1668	-1219	-2067	-1563	-3607
46	• 08-06-85	17h50	970	-522	-1370	-1269	-1256	-2486	-290	-1666	-1221	-2050	-1559	-3604
47	• 09-06-85	11h45	963	-530	-1374	-1273	-1264	-2493	-298	-1675	-1224	-2054	-1544	-3609
48	• 17-06-85	11h30	975	-536	-1375	-1277	-1275	-2494	-297	-1686	-1229	-2049	-1549	-3606
49	• 02-07-85	10h45	979	-536	-1379	-1288	-1274	-2498	-309	-1698	-1248	-2027	-1542	-3603
50	• 07-07-85	11h50	993	-553	-1373	-1287	-1262	-2497	-312	-1712	-1248	-2042	-1542	-3609
51	• 14-07-85	18h	1011	-544	-1391	-1304	-1269	-2482	-321	-1716	-1252	-2033	-1534	-3592
52	• 26-07-85	18h30	1016	-544	-1375	-1334	-1269	-2473	-339	-1729	-1265	-2061	-1537	-3594
53	• 29-07-85	19h05	1063	-554	-1369	-1327	-1261	-2460	-330	-1724	-1246	-2042	-1543	-3595

Valeurs brutes des mesures effectuées au site de Schildmatt.

SCHILD3

			2cm	7cm	12cm	17cm	22cm	27cm	32cm	37cm	42cm	47cm	
1	*	12-11-84	11h35	-1130	-960	3	-767	-921	-933	-764	-1596	-106	-1344
2	*	15-11-84	12h10	-1108	-964	-1	-749	-912	-935	-752	-1594	-98	-1344
3	*	15-11-84	16h	-1101	-961	3	-744	-909	-934	-750	-1590	-95	-1341
4	*	19-11-84	14h05	-1063	-956	28	-776	-910	-935	-773	-1595	-108	-1341
5	*	24-11-84	11h20	-1028	-864	75	-886	-876	-886	-828	-1600	-109	-1312
6	*	24-11-84	15h15	-1030	-879	69	-871	-879	-889	-825	-1597	-108	-1316
7	*	30-11-84	16h25	-1065	-924	55	-821	-895	-917	-804	-1592	-110	-1332
8	*	03-12-84	10h15	-1031	-931	47	-807	-903	-918	-796	-1591	-112	-1327
9	*	10-12-84	11h05	-1047	-943	38	-786	-895	-923	-782	-1594	-124	-1331
10	*	17-12-84	11h35	-946	-872	65	-825	-850	-914	-794	-1590	-118	-1329
11	*	24-12-84	12h45	-960	-911	41	-818	-876	-912	-811	-1591	-115	-1328
12	*	01-01-85	14h10	-863	-816	229	-1224	-680	-711	-952	-1644	-106	-1335
13	*	07-01-85	13h50	-917	-909	203	-1215	-679	-717	-951	-1644	-100	-1337
14	*	14-01-85	12h35	-834	-978	215	-1209	-682	-720	-942	-1643	-95	-1342
15	*	21-01-85	12h05	-867	-909	195	-1206	-699	-734	-947	-1653	-136	-1356
16	*	28-01-85	12h20	-942	-853	164	-1215	-695	-712	-947	-1647	-107	-1347
17	*	30-01-85	17h55	-953	-830	158	-1216	-706	-718	-942	-1661	-110	-1356
18	*	31-01-85	14h55	-977	-841	165	-1211	-712	-718	-943	-1656	-115	-1347
19	*	03-02-85	12h15	-1021	-852	199	-1198	-704	-712	-932	-1642	-110	-1333
20	*	09-02-85	9h35	-1038	-860	167	-1205	-722	-730	-939	-1654	-111	-1359
21	*	11-02-85	11h50	-1042	-818	259	-1152	-758	-718	-876	-1656	-130	-1321
22	*	18-02-85	11h15	-905	-1245	247	-1048	-774	-737	-753	-1638	-216	-1322
23	*	25-02-85	11h20	-968	-1200	74	-941	-765	-766	-720	-1612	-246	-1314
24	*	01-03-85	10h10	-994	-997	216	-965	-744	-762	-738	-1605	-233	-1325
25	*	04-03-85	10h55	-995	-975	205	-967	-745	-762	-737	-1610	-216	-1330
26	*	04-03-85	14h30	-996	-978	211	-987	-749	-759	-758	-1618	-217	-1328
27	*	11-03-85	11h	-998	-1027	213	-1029	-768	-749	-789	-1636	-198	-1330
28	*	18-03-85	11h	-926	-956	130	-1018	-757	-748	-792	-1635	-193	-1332
29	*	25-03-85	11h05	-938	-825	86	-1034	-752	-744	-793	-1651	-173	-1331
30	*	27-03-85	11h20	-994	-750	142	-1054	-749	-724	-789	-1651	-180	-1302
31	*	01-04-85	17h15	-957	-737	148	-1055	-741	-716	-792	-1651	-174	-1317
32	*	06-04-85	10h15	-1058	-734	140	-1063	-744	-719	-813	-1653	-187	-1327
33	*	14-01-85	16h50	-1024	-720	130	-1071	-773	-716	-815	-1628	-178	-1319
34	*	22-04-85	10h45	-176	-714	117	-1067	-772	-730	-808	-1643	-167	-1332
35	*	29-04-85	10h50	-979	-733	120	-1073	-756	-736	-811	-1664	-162	-1326
36	*	03-05-85	12h40	-1058	-748	122	-1074	-769	-724	-817	-1632	-187	-1311
37	*	06-05-85	16h	-1067	-746	118	-1082	-764	-734	-819	-1641	-197	-1324
38	*	07-05-85	17h45	-1069	-738	133	-1067	-753	-725	-807	-1633	-173	-1321
39	*	09-05-85	10h40	-1039	-750	132	-1067	-754	-708	-806	-1623	-168	-1319
40	*	09-05-85	19h55	-998	-745	130	-1061	-748	-702	-803	-1619	-162	-1316
41	*	10-05-85	10h30	-1036	-746	126	-1066	-753	-711	-808	-1622	-167	-1319
42	*	13-05-85	11h15	-1065	-753	117	-1079	-766	-727	-812	-1638	-172	-1331
43	*	19-05-85	18h15	-1045	-762	137	-1063	-764	-713	-809	-1627	-171	-1320
44	*	31-05-85	10h55	-1059	-773	128	-1069	-776	-724	-812	-1636	-168	-1328
45	*	02-06-85	20h15	-1073	-782	109	-1070	-777	-738	-816	-1647	-167	-1319
46	*	08-06-85	17h30	-1047	-771	114	-1061	-775	-743	-806	-1645	-162	-1327
47	*	09-06-85	11h50	-1081	-766	123	-1059	-768	-741	-807	-1640	-159	-1322
48	*	17-06-85	11h35	-1063	-773	103	-1059	-785	-727	-813	-1639	-159	-1315
49	*	02-07-85	10h50	-1078	-777	93	-1055	-795	-734	-802	-1645	-156	-1319
50	*	07-07-85	11h55	-1054	-786	58	-1060	-796	-734	-793	-1650	-158	-1320
51	*	14-07-85	18h05	-1098	-777	53	-1063	-810	-744	-792	-1658	-146	-1321
52	*	26-07-85	18h35	-1112	-782	38	-1060	-798	-761	-784	-1678	-144	-1341
53	*	29-07-85	19h10	-1026	-791	32	-1043	-796	-751	-778	-1671	-132	-1333

Valeurs brutes des mesures effectuées au site de Schildmatt.

Annexe 7.6

3.0 cm 7.0 cm 9.0 cm 13.0 cm 17.0 cm 23.0 cm 30.0 cm 40.0 cm 50.0 cm 60.0 cm 70.0 cm

TENSIONS HYDRIQUES (cm H₂O)

21-01-85	47.4	105.1	101.9	100.4	98.9	92.9	96.0	88.5	82.3	74.8	68.6
28-01-85	49.9	68.6	65.3	62.6	69.9	66.5	22.9	19.2	21.8	21.9	20.7
30-01-85	5.8	18.2	22.5	21.0	20.8	21.1	22.9	26.8	43.2	43.3	39.6
03-02-85	12.1	28.3	25.0	24.8	30.9	28.7	33.0	28.0	28.1	25.7	23.2
09-02-85	22.2	37.1	36.4	43.7	53.6	53.9	63.2	55.8	57.1	52.1	47.2
04-03-85	38.6	52.2	47.7	37.4	64.9	76.5	73.3	73.4	78.5	71.0	78.7
18-03-85	62.5	63.6	61.6	53.8	56.1	56.4	73.3	67.1	76.0	69.8	68.6
25-03-85	33.5	43.4	41.4	38.7	46.0	48.8	72.1	67.1	73.5	68.5	68.6
27-03-85	34.8	25.8	22.5	17.2	13.2	7.2	16.6	12.9	21.8	24.4	43.4
01-04-85	42.4	38.4		24.8	20.8		29.2	25.5	34.4	34.5	37.1
06-04-85	97.8	78.7	79.2	75.2	67.4	65.2	67.0	59.5	54.6	47.1	53.5
14-04-85	29.8	22.0	20.0	18.5	14.5	21.1	26.7	21.7	21.8	21.9	37.1
22-04-85	95.3	78.7	77.9	73.9	71.2	66.5	69.5	60.8	55.8	49.6	52.2
22-07-85	223.8	231.1	259.4	313.3	135.5	230.3	140.1	132.6		124.0	
29-07-85	188.5	193.3	511.4	242.8	300.5	292.0	160.3	160.3		277.7	

CHARGE HYDRAULIQUE (cm H₂O)

21-01-85	50.4	112.1	110.9	113.4	115.9	115.9	126.0	128.5	132.3	134.8	138.6
28-01-85	52.9	75.6	74.3	75.6	86.9	89.5	52.9	59.2	71.8	81.9	90.7
30-01-85	8.8	25.2	31.5	34.0	37.8	44.1	52.9	66.8	93.2	103.3	109.6
03-02-85	15.1	35.3	34.0	37.8	47.9	51.7	63.0	68.0	78.1	85.7	93.2
09-02-85	25.2	44.1	45.4	56.7	70.6	76.9	93.2	95.8	107.1	112.1	117.2
04-03-85	41.6	59.2	56.7	50.4	81.9	99.5	103.3	113.4	128.5	131.0	148.7
18-03-85	65.5	70.6	70.6	66.8	73.1	79.4	103.3	107.1	126.0	129.8	138.6
25-03-85	36.5	50.4	50.4	51.7	63.0	71.8	102.1	107.1	123.5	128.5	138.6
27-03-85	37.8	32.8	31.5	30.2	30.2	30.2	46.6	52.9	71.8	84.4	113.4
01-04-85	45.4	45.4		37.8	37.8		59.2	65.5	84.4	94.5	107.1
06-04-85	100.8	85.7	88.2	88.2	84.4	88.2	97.0	99.5	104.6	107.1	123.5
14-04-85	32.8	29.0	29.0	31.5	31.5	44.1	56.7	61.7	71.8	81.9	107.1
22-04-85	98.3	85.7	86.9	86.9	88.2	89.5	99.5	100.8	105.8	109.6	122.2
22-07-85	226.8	238.1	268.4	326.3	152.5	253.3	170.1	172.6		184.0	
29-07-85	191.5	200.3	520.4	255.8	317.5	315.0	190.3	200.3		337.7	

TENEUR EN EAU (cm³/cm³)

21-01-85	42.7	36.6	30.7	30.8	30.9	28.3	28.0	25.3	27.9	19.7	19.7
28-01-85	42.3	39.7	33.8	34.1	33.3	31.0	42.0	41.0	38.6	27.0	27.7
30-01-85	61.3	51.3	42.4	43.0	43.0	43.0	42.0	36.9	32.6	22.5	23.0
03-02-85	55.1	47.2	41.5	41.6	39.7	39.4	37.9	36.4	36.3	25.9	26.8
09-02-85	49.4	44.8	38.4	36.9	35.3	32.9	31.4	29.1	30.5	21.5	21.9
04-03-85	44.5	41.9	36.2	38.1	33.8	29.8	30.2	26.8	28.2	19.9	18.9
18-03-85	40.4	40.3	34.2	35.3	34.9	32.5	30.2	27.5	28.5	20.0	19.7
25-03-85	45.7	43.4	37.3	37.9	36.5	33.8	30.3	27.5	28.7	20.1	19.7
27-03-85	45.4	48.1	42.4	44.6	46.8	54.9	45.8	45.9	38.6	26.2	22.4
01-04-85	43.6	44.5		41.6	43.0		39.2	37.5	34.5	23.9	23.4
06-04-85	37.1	38.7	32.4	32.8	33.6	31.2	30.9	28.6	30.8	22.0	21.1
14-04-85	46.8	49.5	43.4	44.0	46.1	43.0	40.2	39.5	38.6	27.0	23.4
22-04-85	37.3	38.7	32.5	32.9	33.2	31.0	30.6	28.4	30.6	21.7	21.2
22-07-85	31.8	31.6	25.4	24.5	28.9	22.6	25.4	22.7		17.6	
29-07-85	32.8	32.6	22.4	25.7	24.7	21.4	24.6	21.6		15.1	

STOCKS D'EAU (lamme d'eau équivalente en mm)

5.0 cm 8.0 cm 11.0 cm 15.0 cm 20.0 cm 26.5 cm 35.0 cm 45.0 cm 55.0 cm 65.0 cm

21-05-85	21.3	30.5	39.7	52.1	67.5	85.9	109.7	135.0	163.0	182.6	
28-01-85	21.1	31.2	41.3	55.0	71.6	91.7	127.4	168.4	207.1	234.1	
30-01-85	30.7	43.9	56.6	73.8	95.3	123.3	158.9	195.9	228.5	251.0	
03-02-85	27.5	39.7	52.1	68.7	88.6	114.2	146.4	182.8	219.0	244.9	
09-02-85	26.7	36.2	47.7	62.4	80.1	101.5	128.2	157.3	187.8	209.2	
04-03-85	22.2	32.9	43.7	59.0	75.9	95.3	120.9	147.7	175.9	195.8	
18-03-85	20.2	30.4	40.7	54.8	72.3	93.4	119.0	146.5	175.0	194.9	
25-03-85	22.8	33.9	45.1	60.3	78.5	100.5	126.2	153.7	182.4	202.5	
27-03-85	22.7	35.0	47.8	65.6	89.0	124.7	163.6	209.6	248.2	274.4	
01-04-85	21.8	33.2		61.6	83.1		144.4	181.9	216.4	240.2	
06-04-85	18.5	28.3	38.0	51.1	67.9	88.2	114.4	143.0	173.8	195.8	
14-04-85	23.4	36.2	49.2	66.8	89.8	117.7	151.9	191.4	230.0	257.0	
22-04-85	18.6	28.4	38.1	51.3	67.9	88.0	114.0	142.4	173.0	194.8	
22-07-85	15.9	23.7	31.3	41.1	55.5	70.2	91.8	114.5		157.4	
29-07-85	16.4	24.5	31.2	41.5	53.8	67.7	88.6	110.2		147.9	

Conditions hydriques au sol au site de Schildmatt.

RESUME

La reptation est généralement définie comme un mouvement lent des formations superficielles et du sol vers l'aval. Elle est liée aux gonflements et rétractions sous l'effet d'alternances de gel et de dégel, d'humidification et de dessiccation et aux perturbations d'origine biogéniques.

La mesure de déplacements aussi faibles (quelques millimètres par an) nécessite des instruments précis. Un capteur à jauges d'extensométrie a été mis au point : il permet de connaître les déplacements à différentes profondeurs et de suivre l'évolution des profils. Après avoir vérifié le bon fonctionnement d'un prototype dans un modèle réduit de versant, trois capteurs ont été installés en un site forestier dans les Vosges. Celui-ci a été également équipé pour suivre les conditions microclimatiques du sol et de l'atmosphère.

Les déplacements mesurés de novembre 1984 à juillet 1985 se sont produits sur de très courtes périodes, lors de l'engel et du dégel du sol et à la fin d'une fonte de neige. La déformation du profil de sol est contrôlée par l'état hydrique et thermique et surtout par leur variation : état antérieur et évolution.

mots-clés : reptation, creep, mesures, conditions hydriques, conditions thermiques, capteur, extensométrie.