

TABLE DES MATIERES

	Page
1. MANDAT ET BUT DES RECHERCHES	1
2. STATIONS DE MESURES	3
2.1. Situation et données générales	3
2.2. Profil de la chaussée	3
2.3. Dispositifs de mesures	3
2.4. Caractéristiques géotechniques de la fondation et du sol d'infrastructure	5
3. METHODES ET PRECISION DES MESURES	8
4. RESULTATS DES MESURES	9
4.1. Mesures de température	9
4.2. Mesures de soulèvement	9
4.3. Mesures de la profondeur de pénétration du gel	9
5. RESULTATS DES CALCULS	10
5.1. Calcul de la profondeur de gel selon la norme SNV 670 148	10
5.2. Calcul de la profondeur de pénétration du gel avec le programme DITEMP	10
6. COMMENTAIRES	16
6.1. Valeurs comparées de la profondeur de pénétration du gel	16
6.2. Profondeur de pénétration du gel mesurée, indice de gel et soulèvement de la surface de roulement	17
7. CONCLUSIONS	27

1. MANDAT ET BUT DES RECHERCHES

Par lettres du 19 juillet 1969 et du 4 février 1971, le Département fédéral de l'Intérieur accordait au Laboratoire de géotechnique de l'EPFL (LEGEP) les crédits 14/69 et 4/71.

Ces recherches devaient permettre, par l'observation et la mesure de divers paramètres de sept profils de routes caractéristiques, d'atteindre les buts suivants:

- 1) Vérifier le comportement de routes soumises à l'effet du gel. Examiner en particulier, au sens de la norme SVN 640 328: "Mesures préventives contre le gel", quels sont les soulèvements et la déformation de la surface de roulement de routes dimensionnées selon les méthodes
 - remplacement total des sols gélifs
 - remplacement partiel des sols gélifs
- 2) Vérifier si les prévisions de la profondeur de pénétration de gel que l'on peut faire à l'aide de la norme SNV 670 148 sont correctes.
- 3) Comparer les valeurs mesurées pour la profondeur de pénétration du gel avec celles calculées à partir des équations différentielles régissant le transfert de la chaleur dans un sol par la technique des différences finies.

Deux profils ont été équipés en 1969, un sur la déviation de Château-d'Oex et l'autre sur la route des Mosses, à proximité de la Lécherette.

Cinq autres profils ont été équipés au cours de l'année 1970:

- ancienne route cantonale dans le village de Château d'Oex
- route cantonale Renens-Écublens
- route cantonale Bienne-Nidau (Portstrasse)
- autoroute Bienne-Lyss (à la sortie de Bienne)
- route cantonale dans le village de la Brévine

Dans le cadre de ce programme de recherches, les mesures et déterminations suivantes ont été effectuées pour chaque profil:

- 1) Caractéristiques géotechniques des graves de fondation et des sols d'infrastructure, des conditions hydrologiques et des épaisseurs des couches de la superstructure par sondages.
- 2) Profondeur de pénétration du gel au moyen de cryomètres à ampoules (Wybo).

- 3) Indice de gel par mesure des températures journalières, au moyen de thermographes enregistreurs.
- 4) Déformation du profil en travers de la surface de roulement au moyen du transverso-profilographe et par nivellement à partir de repères fixes.

Le présent rapport a pour but de donner et de commenter les résultats de toutes les mesures effectuées à partir de l'automne 1969 et jusqu'au printemps 1978 sur les sept profils d'essais.

2. STATIONS DE MESURES

2.1. Situation et données générales

La situation générale des sept profils étudiés est reportée sur le dessin GY09/1.

Pour chaque station de mesures, un plan de situation permet de localiser le profil de manière précise; il donne également l'emplacement des points fixes servant au nivellement et des stations météorologiques.

Le tableau 1 donne, pour chaque station de mesures, le numéro du dessin indiquant la situation, le type de route, l'altitude du profil étudié, le trafic pour les deux sens de circulation selon le recensement officiel de 1975. Il donne aussi le type du repère de nivellement, le nombre et la longueur des cryomètres à ampoules et le type de la station météorologique utilisée.

2.2. Profil de la chaussée

Dans chaque profil, un sondage peu profond a permis de déterminer les caractéristiques de la superstructure et du sol de fondation. Il a montré aussi que le niveau de l'eau souterraine est à plus de 2 m de profondeur au-dessous de la surface de roulement.

Le tableau 1 donne, pour chaque profil, le numéro du dessin où figurent le profil en travers de la chaussée avec les drainages ainsi que le type et l'épaisseur du revêtement, l'épaisseur de la fondation et des indications sur le niveau de l'eau.

2.3. Dispositifs de mesures

2.3.1. Repères de nivellement

Pour pouvoir mesurer avec précision les déformations de la surface de roulement, plus spécialement pendant la période de gel, il faut disposer de points fixes servant de repères de nivellement.

Pour les profils situés en dehors de toute habitation, des points fixes ont été posés de part et d'autre du profil étudié et sont constitués de la manière suivante: une tige en invar de 2 m de longueur est scellée dans un tube en éternit de 150 mm de diamètre sur les 50 cm inférieurs. Au-dessus du béton et jusqu'à la surface du sol, l'espace compris entre le tuyau en éternit et la tige est rempli d'un isolant thermique. La partie

Tableau 1

Profil	Situation Dessin No	Type de route	Altitude	Trafic véhic./jour	Repère de nivellement	Cryomètre Nb Prof.	Station météorologique
La Lécherette	GY09/2	principale	1385	1800	2 socles	5	installée
Château-d'Oex (cont)	GY09/3	principale	935	2200	2 socles	3	installée
Château-d'Oex (vill)	GY09/4	communale	935	1200	sur façade	1	installée
La Brévine	GY09/5	communale	1045	1000	sur façade	3	de l'O.F.F.M.
Biemme (autoroute)	GY09/6	autoroute	435	7700	2 socles	3	de l'O.F.F.M.
Biemme (Portstrasse)	GY09/7	principale	435	7700	sur façade	3	de l'O.F.F.M.
Ecublens	GY09/8	principale	400	5000	sur façade	3	installée

Profil	Profil et coupe Dessin No	Revêtement Type-épaisseur	Fondation épaisseur	Niveau de l'eau
La Lécherette	GY09/10	bitumineux	52	> 2.0 m
Château-d'Oex (cont)	GY09/11	bitumineux	60	> 2.0 m
Château-d'Oex (vill)	GY09/12	bitumineux	48	> 2.0 m
La Brévine	GY09/13	bitumineux	86	> 2.0 m
Biemme (autoroute)	GY09/14	béton	182	> 2.0 m
Biemme (Portstrasse)	GY09/15	bitumineux	130	> 2.0 m
Ecublens	GY09/16	bitumineux	38	> 2.0 m

supérieure du tube éternit est munie d'un couvercle, protégeant la tige en invar. Pour que le gonflement dû au gel du terrain entourant le tube éternit n'entraîne aucun déplacement du scellement, le tube est mis en place en deux longueurs de 1 m, indépendantes l'une de l'autre. Le schéma de ces points fixes est donné au dessin GY09/9.

Pour les profils situés au voisinage d'habitations, le point fixe est constitué par un repère scellé dans le mur d'une construction dont les fondations sont suffisamment profondes pour être indépendantes du gel.

Le type du repère de nivellement est donné dans le tableau 1.

2.3.2. Sondes de gel

La profondeur de pénétration du gel est mesurée, dans tous les profils, à l'aide de cryomètres à ampoules du type Wybo dont les caractéristiques sont décrites dans la norme SNV 670 350 "Profondeur du gel, méthodes et appareils de mesure". Leur nombre et leur longueur sont donnés, pour chaque profil, dans le tableau 1.

2.3.3. Stations météorologiques

Pour pouvoir déterminer l'indice de gel de chaque profil, il faut connaître la température de l'air moyenne journalière, calculée à partir des températures mesurées à 07.30 h, 13.30 h et 21.30 h. Ces mesures sont faites dans les stations météorologiques de l'Office fédéral de météorologie.

Trois de nos profils étant trop éloignés de ces stations, nous les avons équipés d'un thermographe enregistreur dont le relevé hebdomadaire est assuré soit par notre Institut, soit par des personnes habitant au voisinage.

Le tableau 1 donne, pour chaque profil, le type de station météorologique utilisée.

2.4. Caractéristiques géotechniques de la fondation et du sol d'infrastructure

Les caractéristiques géotechniques des différentes couches de la superstructure et du sol d'infrastructure ont été déterminées en laboratoire sur des échantillons intacts ou remaniés, prélevés dans les sondages. Les dessins GY09/10 à 16 donnent, en

plus du profil en travers de la chaussée, la coupe de sondage de chaque profil sur laquelle ont été reportées les caractéristiques du sol de la superstructure (teneur en eau naturelle et classification selon U.S.C.S.), et celles du sol d'infrastructure (poids volumique apparent, teneur en eau naturelle, perméabilité et classification selon U.S.C.S.).

Les courbes granulométriques ainsi que les limites de consistance des différents sols analysés sont données dans le rapport annexe (dessins GY09/101 à 124).

Le tableau 2 donne la nature et les caractéristiques des sols rencontrés par les sondages pour chaque profil.

D'une manière générale, les sols constituant la superstructure font partie de la classe de gélivité G_1 , sauf dans la partie supérieure pour la Lécherette et le tronçon d'autoroute à Bienne. Ce sont tous, à une exception près, des sols appartenant aux classes U.S.C.S. GM ou GP. Leur teneur en éléments plus petits que 0,02 mm est inférieure à 5,2% sauf à la Brévine où elle est de 8 à 11%. On peut donc dire que ces graves de fondation sont très peu gélives, sauf à la Brévine où ils doivent être considérés comme peu gélifs (G_2).

L'épaisseur de la superstructure est de 60 à 70 cm pour les profils situés dans les Alpes et à Ecublens, elle est de 90 cm à la Brévine. Pour les deux profils situés à Bienne, elle est de 140 et 200 cm, cette grande épaisseur est due à la mauvaise portance des sols naturels.

La teneur en eau naturelle des graves de fondation varie entre 2,3 et 5,2%, elle est généralement comprise entre 4,1 et 4,5%.

Les sols d'infrastructure sont très gélifs dans les Alpes et à Bienne, ils sont gélifs à la Brévine et très peu gélifs à Ecublens. La perméabilité des sols d'infrastructure est faible partout, sauf à Ecublens.

Tableau 2

Tronçon	Couche	Teneur en eau naturelle w [%]	Poids volumique apparent humide γ [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]	Perméabilité k [m/sec.]	Eléments < 0,02 mm [%]	Degré de gélivité	Classification
La Lécherette	Superstructure Infrastructure	4,0 et 4,3 45,3	- 18,54	- $2.0 \cdot 10^{-9}$	1 et 3,7 23,9	non gélif \rightarrow 0,35 $G_1 \rightarrow$ 0,60 G4	GW GM SM - ML
Château-d'Oex (déviation)	Superstructure Infrastructure	5,2 24,9	- 19,82	- $8.2 \cdot 10^{-10}$	5,1 43,4	G1 G4	GM MH
Château-d'Oex (village)	Superstructure Infrastructure	2,3 22,4	- 18,05	- $1.0 \cdot 10^{-8}$	5,2 45,7	G1 G4	GM MH
La Brévine	Superstructure Infrastructure	4,8 et 4,5 25,3	- 19,72	- $3.2 \cdot 10^{-9}$	8,6 et 11,3 39,1	$G_1 \rightarrow$ 0,40 G3	GM CL
Bienne (autoroute)	Superstructure Infrastructure	3,8 et 4,1 -	- -	- -	3,0 et 1,9 -	non gélif -	GP OH
Bienne (Portstrasse)	Superstructure Infrastructure	4,3 et 4,6 41,8	- 17,46	- $3.9 \cdot 10^{-9}$	3,7 et 2,1 83,9	$G_1 \rightarrow$ 0,70 non gélif G4	GP OH
Ecublens	Superstructure Infrastructure	4,1 5,8	- -	- -	3,8 5,2	G1 G1	GM GC

3. METHODES ET PRECISION DES MESURES

La déformation de la surface de roulement a été mesurée, pendant l'hiver 1969-1970, par nivellement de points espacés de 25 cm sur le profil en travers, avec rattachement aux points fixes (socles) sur les deux seuls profils équipés cet hiver-là: la Léchurette et le contournement de Château-d'Oex.

Dès 1970, l'achat d'un transverso-profilographe de 4 m de longueur a permis de diminuer le temps de mesure et d'obtenir l'image continue du profil en travers étudié. Le point de départ et celui d'arrivée de la roulette en contact avec la route sont rattachés par nivellement aux points fixes; un point intermédiaire est également nivelé comme contrôle. La précision de la mesure obtenue grâce à cet appareil est de l'ordre de 1 à 2 mm, les nivellements exécutés conjointement éliminent toute erreur possible.

La profondeur de pénétration du gel est mesurée à l'aide de cryomètres à ampoules dont la fiabilité a été prouvée depuis de très nombreuses années. Le relevé de ces cryomètres ne se fait qu'au printemps. Ces instruments permettent de déterminer la profondeur de pénétration du gel à 2 ou 3 cm près (hauteur d'une ampoule); cette précision est amplement suffisante.

L'indice de gel est calculé selon les indications données dans la norme SNV 640 316; il caractérise la durée et l'intensité du gel en un lieu particulier. Pour trois de nos tronçons (Bienne I, Bienne II et la Brévine), les mesures sont effectuées par les soins de l'Office fédéral de météorologie, tandis que pour les quatre autres stations, un thermographe enregistre en continu les températures de l'air dans les mêmes conditions que celles des stations météorologiques. Les thermographes enregistreurs sont accompagnés de thermomètres à maximum et minimum qui permettent de contrôler le bon fonctionnement des appareils enregistreurs; d'autre part, ceux-ci sont contrôlés fréquemment dans nos installations frigorifiques. Les mesures permettant le calcul de la température moyenne journalière et de l'indice de gel ont une précision de $\pm 0,2$ degré centigrade.

4. RESULTATS DES MESURES

4.1. Mesures de température

Les mesures de la température de l'air ont permis de calculer, pour chaque hiver, l'indice de gel correspondant. Les dessins GY09/125 à 164 donnant les indices de gel pour chaque station sont dans le rapport annexe. Sur ces dessins sont également indiqués les jours où les mesures de soulèvement de la chaussée ont été effectuées.

Les valeurs des indices de gel sont reportées sur les dessins GY09/17 à 30.

4.2. Mesures de soulèvement

Pour chaque station de mesure, le relevé du profil en travers de la surface de roulement a été effectué en automne, puis plusieurs fois pendant l'hiver et au printemps après le dégel.

Les dessins GY09/17 à 23 donnent, pour chaque station de mesure, les soulèvements maximum obtenus au cours des différents hivers, ainsi que l'indice de gel calculé pour les hivers correspondants.

Toutes les mesures sont reportées sur les dessins GY09/164 à 209 figurant dans le rapport annexe. Sur ces mêmes dessins sont également reportées les températures moyennes journalières.

A titre d'exemple, les dessins GY09/167 à 173 (année 1970/71) sont donnés à la fin de ce rapport.

4.3. Mesures de la profondeur de pénétration du gel

La profondeur de pénétration du gel a été mesurée à l'aide de sondes Wybo qui ont été relevées chaque printemps.

Les dessins GY09/24 à 30 donnent, pour chaque station, les profondeurs de pénétration du gel mesurées, la moyenne pour l'hiver considéré et l'indice de gel calculé pour le même hiver, ainsi que la coupe de la chaussée.

5. RESULTATS DES CALCULS

Des diverses méthodes qui permettent d'évaluer la profondeur de pénétration du gel à partir des données géotechniques du sol et des données de température, nous en avons retenu deux, à savoir:

- La solution par la formule de Berggren, améliorée par Aldrich et Painter, objet de la norme SNV 670 148 éditée par la VSS.
- La solution des équations différentielles régissant le transfert de la chaleur dans un sol par la technique des différences finies, solution traitée sur ordinateur VAX par le programme DITEMP mis au point par notre Laboratoire.

5.1. Calcul de la profondeur de gel selon la norme SNV 670 148

A partir d'une épaisseur de superstructure connue et d'un type de sol de fondation dont on a déterminé le poids volumique apparent sec γ_d et la teneur en eau naturelle w : la profondeur de pénétration du gel peut être déterminée selon la méthode décrite dans la norme en admettant:

- soit l'indice de gel mesuré pour une année définie
- soit l'indice de gel I_{G30} , qui est l'indice de gel moyen des trois hivers les plus froids d'une période de 30 ans et qui est défini en fonction de la région et de l'altitude du lieu; il faut ajouter que la norme donne deux valeurs (max et min) de l'indice I_{G30} selon l'exposition et le microclimat du lieu.

Les valeurs de la profondeur de pénétration du gel déterminées par les deux méthodes citées plus haut sont données dans les tableaux 3 à 7.

5.2. Calcul de la profondeur de pénétration du gel avec le programme DITEMP

5.2.1. Principes de calcul

En partant des hypothèses de base selon lesquelles:

- l'eau n'étant pas en mouvement, la majorité du transfert de chaleur se fait par conduction;
- le transfert de chaleur est unidimensionnel (ce qui est justifié à l'axe de la chaussée).

L'équation fondamentale de la transmission de la chaleur dans un milieu homogène se traduit par l'équation de Fourier (1.1):

$$q = - k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (1.1)$$

avec q = quantité de chaleur [cal/sec] s'écoulant par unité de surface dans la direction X sur laquelle règne un gradient de température

$$L = \frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ell}$$

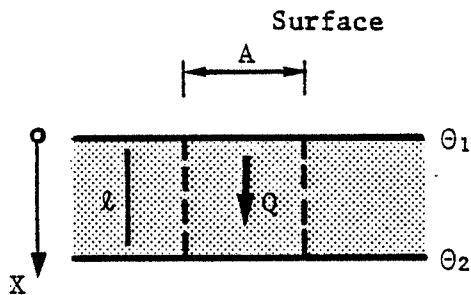


Fig. 1.1

k = coefficient de conductibilité thermique du milieu [cal/sec·cm·°C]

A l'équation (1.1) s'ajoute une équation de continuité qui exprime la conservation de l'énergie. Elle s'écrit:

$$C \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot \frac{\partial q}{\partial X} = 0 \quad (1.2)$$

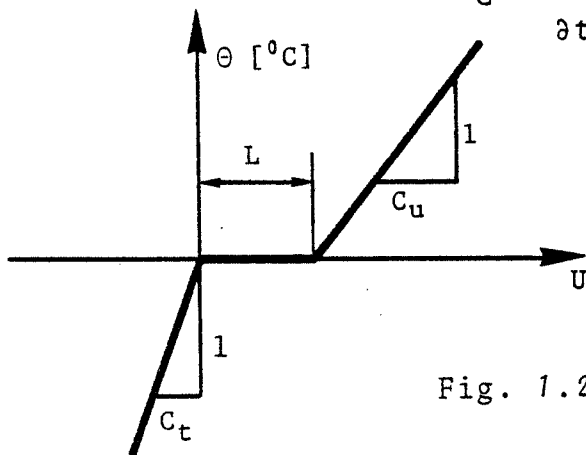


Fig. 1.2

avec c = chaleur volumique du sol gelé ou non gelé [cal/cm³·°C]

t = temps en sec

L = chaleur latente de fusion [cal/cm³]

U = énergie thermique volumique [cal/cm³]

Les équations (1.1) et (1.2) conduisent, en éliminant q , à:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \quad (1.3)$$

avec $a = \frac{k}{C}$ = diffusivité thermique du milieu gelé ou non gelé [cm²/sec]

L'équation (1.3) est l'équation différentielle de la diffusion unidimensionnelle de la température dans un sol homogène. Les équations (1.1) à (1.3) sont valables pour autant qu'il n'y ait pas de changement de phase (transformation de l'eau en glace, par exemple).

Quand la température atteint 0°C, des conditions physiques toutes différentes apparaissent, l'eau cédant de la chaleur au moment de sa congélation. C'est la chaleur latente de fusion L qui vaut 80 cal/cm³. L'énergie ainsi libérée amortit et retarde la variation de la température.

Pour calculer la pénétration du gel dans un sol humide, et pour tenir compte du changement de phase au front de gel, on introduit l'équation de continuité (1.4):

$$L \cdot \frac{\partial X}{\partial t} = k_f \cdot \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = k_u \cdot \frac{\partial \theta_u}{\partial X} \quad (1.4)$$

avec L = chaleur latente de fusion [80 cal/cm³]

∂X = tranche dans laquelle s'effectue le changement de phase

$\theta_f, k_f, \theta_u, k_u$

= respectivement température et conductibilité thermique du sol gelé ou non gelé

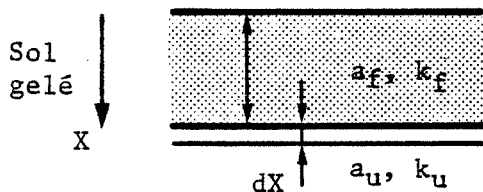


Fig. 1.3

Les équations (1.3) et (1.4) sont les équations différentielles de base qui sont résolues au moyen des techniques numériques des éléments finis ou des différences finies, techniques liées au développement des ordinateurs et objet du programme DITEMP, en admettant certaines conditions aux limites bien déterminées.

Parmi les différents facteurs intervenant dans la propagation du gel dans un sol, le modèle mathématique ne tient pas compte de la migration de l'eau sous l'effet du front de gel et traduit mal les phénomènes dus aux conditions climatiques qui influencent la température du revêtement (vent, ensoleillement, etc.)

Les paramètres géotechniques et géométriques sont introduits sur la base des sondages et des résultats des essais de laboratoire, en délimitant chaque couche caractéristique du sol sous le revêtement de la route.

Les autres paramètres, d'ordre thermiques, sont calculés sur la base de la teneur en eau et du poids volumique apparent sec de chaque couche, directement en ce qui concerne la chaleur volumique, la chaleur latente de congélation et la formation de glace, indirectement au moyen des abaques de Kersten pour la conductibilité thermique.

Un exposé détaillé de cette méthode de calcul comprenant les bases physiques et mathématiques du problème et une étude paramétrique de tous les facteurs intervenant dans le calcul a fait l'objet du rapport "Isolation thermique des chaussées", rédigé par notre Laboratoire en décembre 1978 pour le compte de la Commission fédérale de recherche en matière de route.

5.2.2. Etude paramétrique

Dans le cadre de l'étude qui nous concerne, nous avons appliqué le programme aux quatre stations où l'on a enregistré des profondeurs de gel non négligeables, à savoir:

La Lécherette

Château-d'Oex village

Château-d'Oex contournement

La Brévine

Au vu des premiers résultats des calculs qui présentaient des divergences importantes avec les valeurs mesurées, nous avons fait une étude paramétrique afin de définir certaines conditions aux limites qui ont une influence directe sur les valeurs de pénétration du gel. Cette étude a été exécutée pour le profil de la Lécherette et avec les mesures de l'hiver 1970-1971.

a. Température de l'air

Les températures de l'air moyennes journalières calculées à partir des valeurs enregistrées tous les hivers de 1970 à 1978 ont été introduites comme données climatiques. Un essai en introduisant les moyennes arithmétiques hebdomadaires donne pratiquement le même résultat quant à la profondeur maximum de pénétration du gel (voir dessins GY09/31 à 32). Un autre essai fait en introduisant les moyennes mensuelles donne une profondeur de pénétration du gel de 0,97 m au lieu de 1,09 m. Ce sont donc les températures moyennes journalières qui doivent être introduites.

b. Températures initiales au milieu de chaque couche

L'introduction des températures initiales au milieu de chaque couche par interpolation entre la température de l'air et la température constante en profondeur ou en admettant la température initiale constante et égale à la température en profondeur n'apporte aucun changement dans les résultats.

c. Valeur de la température et profondeur du point fixe

Le programme exige que toutes les courbes de températures calculées à chaque pas partent d'un point fixe à une profondeur déterminée.

Nous avons constaté qu'en faisant varier ce point fixe en profondeur, aussi bien qu'en valeur de température, la profondeur calculée de la pénétration du gel variait à son tour dans des proportions non négligeables.

Comme le montre le dessin GY09/31, pour une variation du point fixe de 1,50 à 11,80 m de profondeur, la profondeur calculée passe de 0,86 m à 1,87 m, en admettant $C = 0,8$ et en maintenant une température constante de 7° .

Pour une variation de température de 5 à 10° du point fixe situé à 2,30 m de profondeur, la profondeur calculée remonte de 1,28 m à 0,96 m en admettant $C = 0,8$ (voir dessin GY09/32).

d. Coefficient de correction air-revêtement

Un coefficient C est introduit dans le calcul pour tenir compte du fait que la température du revêtement n'est pas la même que celle de l'air.

Les températures à introduire dans le programme sont celles du revêtement, elles sont données par les formules suivantes:

$$T_{\text{revêt}} = T_{\text{air}} \times (2-C) \quad \text{pour } T_{\text{air}} \geq 0$$

$$T_{\text{revêt}} = T_{\text{air}} \times C \quad \text{pour } T_{\text{air}} \leq 0$$

En introduisant un facteur C variant de 0,4 à 0,9, la profondeur calculée passe de 0,86 m à 1,15 m comme le montre le dessin GY09/32. Ce calcul a été fait en maintenant le point fixe à 2,30 m de profondeur et la température à 7°C .

Pour la Léchurette, le calcul a été fait pour tous les hivers avec $C = 0,5$ et $C = 0,8$, les résultats sont donnés dans le tableau 3.

On trouve, dans la littérature, des recommandations pour le facteur C allant de 0,9 à 0,7, voire jusqu'à 0,5 pour la Suisse selon Ruckli (1943).

Cette étude paramétrique nous a conduits à introduire, dans le calcul, les valeurs suivantes:

- températures moyennes journalières
- profondeur du point fixe: 2,30 m
- température du point fixe: 7°
- coefficient de correction: $C = 0,5$

5.2.3. Résultats

Les tableaux 3 à 5 donnent, pour tous les profils situés en altitude et pour tous les hivers, la profondeur de pénétration du gel, mesurée et calculée par le programme DITEMP, ainsi que la profondeur déterminée (norme SNV 640 148).

Les tableaux 6 et 7 donnent, pour les trois profils de plaine, la profondeur mesurée et déterminée.

Tableau 3

La Lécherette Altitude: 1385 m

Hiver	Ig [°jour]	Valeurs mesurées		Valeurs déterminées selon Norme 670 148 avec:		Valeurs calculées selon programme DITEMP	
		Profondeurs mesurées X [m]	Profondeur moyenne X [m]	Ig année correes. X [m]	Ig30 X [m]	C = 0.5 m X [m]	C = 0.8 m X [m]
1970 - 71	659	0.62 à 0.01	0.82	1.30	Ig30 min. = 395 °jour	0.93	1.09
1971 - 72	413	0.40 à 0.59	0.48	1.05	X30 min. = 1.04 m	0.83	0.90
1972 - 73	623	0.70 à 0.99	0.88	1.25	Ig30 max. = 740 °jour	0.86	1.03
1973 - 74	302	0.37 à 0.85	0.55	0.90	X30 max. = 1.37 m	0.56	0.77
1974 - 75	393	0.32 à 0.86	0.60	1.03		0.46	0.70
1975 - 76	475	0.60 à 1.05	0.75	1.10		0.73	0.95
1976 - 77	405	0.94 à 1.17	1.05	1.05		0.73	0.98
1977 - 78	379	0.60 à 1.08	0.89	1.00		0.64	0.94

Tableau 4

Château-d'Oex Altitude: 935 m

Hiver	I _g [°jour]	Valeurs déterminées selon Norme 670 148 avec:		Contournement			Village	
		I _g année corres. X [m]	I _{g30} X [m]	Valeurs mesurées		Valeurs cal- culées selon progr. DITEMP C = 0.5 m X [m]	Profondeur mesurée X [m]	Valeurs cal- culées selon progr. DITEMP C = 0.5 m X [m]
				Profondeurs mesurées X [m]	Profondeur moyenne X [m]			
1970 - 71	318	0.96	X _{g30} min. = 240 °jour	0.83 à 1.10	0.96	0.81	0.82	0.80
1971 - 72	209	0.81	X ₃₀ min. = 0.87 m	0.21 à 0.44	0.36	0.44	0.43	0.46
1972 - 73	377	1.04	I _{g30} max. = 520 °jour	0.43 à 0.50	0.47	0.54	0.48	0.56
1973 - 74	99	0.65	X ₃₀ max. = 1.2 m	0.27 à 0.42	0.36	0.45	0.35	0.44
1974 - 75	30	0.30		0.20 à 0.32	0.24	0.24	0.16	0.25
1975 - 76	335	0.98		0.33 à 0.51	0.44	0.52	0.40	0.55
1976 - 77	285	0.93		0.54 à 0.63	0.59	0.58	0.60	0.60
1977 - 78	220	0.84		0.70 à 0.68	0.68	0.46	0.63	0.48

Tableau 5

La Brévine · Altitude: 1045 m

Hiver	I _g [°jour]	Valeurs mesurées		Valeurs déterminées selon Norme 670 148 avec:		Valeurs calculées selon programme DITEMP C = 0.5 m X [m]
		Profondeurs mesurées X [m]	Profondeur moyenne X [m]	I _g année corres. X [m]	I _{g30} X [m]	
1970 - 71	586	0.70 à 1.03	0.90	1.47	I _{g30} min. = 370 °jour	1.22
1971 - 72	446	0.48 à 0.58	0.54	1.30	X ₃₀ min. = 1.25 m	1.09
1972 - 73	827	0.85 à 1.00	0.92	1.70	I _{g30} max. = 670 °jour	1.18
1973 - 74	230	—	—	1.07	X ₃₀ max. = 1.60 m	0.82
1974 - 75	116	0.29 à 0.36	0.33	0.85		0.67
1975 - 76	445	0.46 à 0.62	0.53	1.30		1.03
1976 - 77	334	0.44 à 0.55	0.50	1.19		1.05
1977 - 78	440	0.43 à 0.58	0.50	1.28		0.97

Tableau 6

Bienne Altitude: 435 m

Hiver	I _g [°jour]	Valeurs déterminées selon Norme 670 148 avec:		Autoroute		Portstrasse	
		I _g année correes. X [m]	I _{g30} X [m]	Valeurs mesurées		Valeurs mesurées	
				Profondeurs mesurées X [m]	Profondeur moyenne X [m]	Profondeurs mesurées X [m]	Profondeur moyenne X [m]
1970 - 71	153	1.00		0.37 à 0.49	0.44	0.38 à 0.56	0.48
1971 - 72	24	0.30		0 à 0.10	0.03	0 à 0.07	0.02
1972 - 73	82	0.70		0 à 0.18	0.11	0 à 0.12	0.06
1973 - 74	33	0.40		—	—	—	—
1974 - 75	4	0		0	0	0	0
1975 - 76	52	0.52	I _{g30} min. = 135 °jour X ₃₀ min. = 0.90 m	0.13 à 0.33	0.20	0.09 à 0.35	0.61
1976 - 77	74	0.63	I _{g30} max. = 273 °jour X ₃₀ max. = 1.50 m	0 à 0.23	0.09	0 à 0.34	0.16
1977 - 78	28	0.30		0 à 0.05	0.02	0	0

Tableau 7

Ecublens Altitude: 400 m

Hiver	I _g [°jour]	Valeurs déterminées selon Norme 670 148 avec:		Valeurs mesurées	
		I _g année corres. X [m]	I _{g30} X [m]	Profondeurs mesurées X [m]	Profondeur moyenne X [m]
1970 -71	88	0.66	I _{g30} min. = 125 °jour	0.30 à 0.44	0.35
1971 -72	10	0	X ₃₀ min. = 0.70 m	0	0
1972 -73	28	25		0	0
1973 -74	20	18		0	0
1974 -75	0	0	I _{g30} max. = 250 °jour	0	0
1975 -76	22	20	X ₃₀ max. = 0.88 m	0.02	0.02
1976 -77	13	10		0.02	0.02
1977 -78	3	0		0	0

6. COMMENTAIRES

6.1. Valeurs comparées de la profondeur de pénétration du gel

6.1.1. Comparaison des valeurs mesurées avec les valeurs déterminées par la norme SNV 670 148

L'examen des tableaux 3 à 7 et des dessins GY09/24 à 30 permet de faire les remarques suivantes:

- La valeur mesurée (moyenne des 3 ou 5 sondes d'un profil en travers) est toujours, à deux exceptions près où elle est égale, inférieure à celle déterminée à l'aide de la norme, avec l'indice de gel de l'année considérée.

Le tableau suivant donne le rapport maximum, minimum et moyen de la valeur moyenne mesurée par rapport à la valeur déterminée pour les quatre profils en altitude et pour les sept hivers de mesures:

Profil	La Lécherette	Château-d'Oex contournement	Château-d'Oex village	La Brévine
$\frac{X \text{ mesurée}}{X \text{ déterminée}} [\%]$				
maximum	100	100	86	69
minimum	47	44	41	44
moyen	69	68	60	53

Le rapport moyen (pour ces quatre profils) peut être considéré comme égal à 60%.

- Pour un même profil, la profondeur maximum mesurée est généralement située au voisinage du centre de la chaussée.
- Pour les hivers les moins froids, la valeur mesurée est beaucoup plus éloignée de la valeur déterminée avec l'indice de gel de l'année, ceci est d'autant plus valable que le profil est à faible altitude.

6.1.2. Comparaison des valeurs mesurées avec celles calculées par la méthode du chapitre 5

L'examen des tableaux 3 à 5 permet de faire les remarques suivantes:

- Le tableau 3 (profil de la Lécherette) montre que les valeurs calculées avec le coefficient $C = 0,8$ sont, à une exception près (hiver 76-77) toujours supérieures aux valeurs mesurées, mais inférieures aux valeurs déterminées avec l'indice de gel de l'année.
- Ce même tableau montre que les valeurs calculées avec $C = 0,5$ sont situées dans la même proportion de part et d'autre des valeurs mesurées.
- Le tableau 4 (Château-d'Oex, contournement et village) montre que les valeurs calculées avec $C = 0,5$ sont très voisines des valeurs mesurées et nettement inférieures aux valeurs déterminées (à un hiver près).
- Le tableau 5 (La Brévine) montre que les valeurs calculées avec $C = 0,5$ sont nettement supérieures à celles mesurées; elles sont même, pour cinq hivers sur huit, plus du double. Les valeurs calculées restent cependant inférieures aux valeurs déterminées de 25% en moyenne.

6.2. Profondeur de pénétration du gel mesuré, indice de gel et soulèvement de la surface de roulement

Nous allons examiner les résultats de ces mesures pour chaque profil séparément.

La Lécherette (dessin GY09/17).

Le tableau suivant donne les valeurs moyennes du soulèvement pour les divers hivers considérés, ainsi que la profondeur de pénétration du gel mesurée et l'indice de gel calculé:

	Hiver								
	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78
I_g [°jour]	-	659	413	623	302	393	475	405	379
X mes. [cm]	90	82	49	87	54	60	76	106	89
Soulèvement moyen [cm]	3.5	2.9	2.9	3.0	-	1.1	1.6	1.9	2.5

La valeur maximum du soulèvement se situe toujours du côté ouest et la valeur moyenne au centre.

L'écart entre la valeur moyenne (centre) et les valeurs extrêmes est en moyenne de 0,5 cm.

L'épaisseur de la superstructure est de 60 cm pour les trois premiers hivers. Un renforcement de 12 cm a été posé sur ce tronçon au cours de l'été 1972. La grave de fondation est légèrement gélive dans sa partie inférieure.

On constate qu'à part trois hivers, le gel a pénétré dans le terrain naturel, qui est très gélif, d'une profondeur variant entre 4 et 30 cm.

Au cours de l'hiver 71-72, bien que le gel n'ait pas pénétré dans le terrain naturel, le soulèvement est du même ordre de grandeur que celui de l'hiver précédent pendant lequel le gel avait pénétré de 22 cm dans le terrain naturel. De même, durant l'hiver 75-76, le gel n'a pénétré que de 4 cm dans le terrain naturel alors qu'il a pénétré de 24 cm l'hiver suivant et les gonflements sont du même ordre de grandeur.

La surface de la chaussée se soulève d'une manière presque uniforme pendant l'hiver et retrouve pratiquement sa position initiale après le dégel.

L'augmentation de courbure de la surface de la chaussée pendant l'hiver varie entre 0,1 et 1,2 ‰ (en moyenne 0,6 ‰).

Le renforcement effectué en 1972 a été fait dans le cadre du service d'entretien des routes. Depuis cette date, aucune fissure ni déformation de la surface de la chaussée n'ont été observées.

Contournement de Château-d'Oex

Le tableau suivant donne les valeurs moyennes du soulèvement pour les différents hivers, ainsi que la profondeur de pénétration du gel mesurée et l'indice de gel calculé:

	Hiver								
	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78
I _g [°jour]	392	318	209	377	99	30	335	285	220
X mes. [cm]	105	96	36	47	36	24	44	59	68
Soulèvement moyen [cm]	2.4	1.3	0.65	1.1	—	0.5	0.9	0.8	0.6

La valeur maximum du soulèvement se situe toujours du côté sud de la chaussée et la valeur moyenne au centre.

L'écart entre la valeur moyenne et les valeurs extérieures varie entre 0,5 et 0,8 cm (en moyenne 0,6 cm).

L'épaisseur de la superstructure est de 70 cm et la grave de fondation est légèrement gélive (5,1% d'éléments plus petits que 0,02 mm).

Le gel n'a pénétré dans le sol d'infrastructure que durant les deux premiers hivers, de 35 cm le premier et de 26 cm le deuxième hiver. Le sol d'infrastructure est très gélif.

Pour les hivers où le gel ne pénètre que dans la fondation, les gonflements mesurés sont de l'ordre de 1% de l'épaisseur de la fondation.

La surface de la chaussée se soulève d'une manière uniforme, l'augmentation de courbure pendant l'hiver varie de 0,25 et 1,25 ‰ (en moyenne 0,7 ‰).

Aucune déformation ni fissure n'ont été observées sur ce profil depuis sa construction.

Traversée de Château-d'Oex

Les résultats des mesures sont les suivants:

	Hiver								
	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78
I _g [°jour]		318	209	377	99	30	335	285	220
X mes. [cm]		82	43	48	35	16	40	60	63
Soulèvement moyen [cm]		0.6	0.6	0.5	—	0.5	0.5	0.3	0.4

L'épaisseur de la superstructure est de 60 cm et la grave de fondation est légèrement gélive (5,2% d'éléments plus petits que 0,02 mm).

Le gel a pénétré dans l'infrastructure, qui est très gélive, de 22 cm durant l'hiver 70-71 et de 3 cm durant l'hiver 77-78; malgré cela, les gonflements sont restés très faibles, ils sont au maximum de 1% de l'épaisseur de la fondation.

La valeur maximum du soulèvement se situe du côté sud-est et son écart par rapport à la valeur moyenne (centre) est de 0,4 cm.

L'augmentation de courbure de la surface de la chaussée varie entre 0,25 et 1,1 ‰ (en moyenne 0,8 ‰).

Aucune déformation ni fissure n'ont été observées sur ce profil entre les années 1970 et 1979.

La Brévine

Les résultats des mesures sont les suivants:

	Hiver								
	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78
I _g [°jour]		586	446	827	230	116	445	334	440
X mes. [cm]		87	54	92	—	33	53	50	48
Soulèvement moyen [cm]		1.1	0.8	1.1	—	0.5	0.7	0.5	0.3

Le soulèvement de la surface est légèrement plus important du côté ouest, son écart par rapport à la valeur moyenne (centre) est 0,3 cm.

La superstructure dont l'épaisseur totale est de 90 cm est composée d'un revêtement (tapis bitumineux et gravier cassé) de 8 cm d'épaisseur puis d'une grave très peu gélive (8,6% d'éléments plus petits que 0,02 mm) jusqu'à 0,40 cm de profondeur et enfin d'une grave peu gélive (11,3% d'éléments plus petits que 0,02 mm).

Le sol d'infrastructure est un gravier argileux gélif sur une épaisseur de 30 cm puis un limon argileux gélif.

Le gel n'a pénétré dans le sol d'infrastructure gélif que durant l'hiver 72-73 de 2 cm seulement, provoquant un soulèvement de 1,1 cm. Les autres hivers, le gel a pénétré de 8 à 47 cm dans la grave peu gélive constituant la partie inférieure de la superstructure et les soulèvements varient entre 0,3 et 1,1 cm.

La surface de la chaussée n'a subi aucune dégradation (fissure, déformation) durant toutes les années d'observation.

Semi-autoroute Bienne

Les résultats des mesures sont les suivants:

	Hiver								
	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78
I _g [°jour]		153	24	82	33	4	52	74	28
X mes. [cm]		44	3	11	—	0	20	9	2
Soulèvement moyen [cm]		0.4	0.1	0.2	—	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1

L'épaisseur de la superstructure est de 200 cm et la grave de fondation est non gélive.

Le gel a pénétré dans la fondation de 24 cm l'hiver 70-71 et le soulèvement a été de 0,4 cm.

Portstrasse Bienne

Les résultats des mesures sont les suivants:

	Hiver								
	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78
I _g [°jour]		153	24	82	33	4	52	74	28
X mes. [cm]		48	2	6	—	0	21	16	0
Soulèvement moyen [cm]		0.4	0.8	0.3	—	0.2	0.3	0.2	0.2

La superstructure dont l'épaisseur totale est de 140 cm est composée de 10 cm de béton bitumineux, de 30 cm de gravier cassé puis de grave très légèrement gélive.

Le gel n'a pénétré dans la grave que durant l'hiver 70-71, en provoquant un gonflement de 0,40 cm.

Ecublens

Les résultats des mesures sont les suivants:

	Hiver								
	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78
I _g [°jour]		88	10	28	20	0	22	13	3
X mes. [cm]		35	0	0	0	0	2	2	0
Soulèvement moyen [cm]		0.6	0.3	0.3	—	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1

L'épaisseur de la superstructure est de 60 cm et la grave de fondation est très légèrement gélive. Le gel n'a pénétré qu'une fois dans la fondation de 13 cm et le soulèvement est de 0,6 cm.

Pour ces trois derniers profils, qui sont situés sur le plateau, les soulèvements sont beaucoup trop faibles pour que l'on puisse déterminer le maximum et calculer une augmentation de courbure de la surface de la chaussée.

Durant toute la période de mesures, aucune dégradation de la surface de roulement n'a été observée dans ces trois derniers profils.

7. CONCLUSIONS

Les trois buts à atteindre par cette recherche sont énoncés au chapitre 1.

Nous allons reprendre chacun de ces buts et tirer les conclusions des observations, mesures et calculs effectués au cours de ces neuf années.

7.1. Comportement des chaussées soumises au gel

Les conditions hydrologiques doivent être considérées comme favorables puisqu'aucun niveau d'eau n'a été observé jusqu'à 2 m de profondeur dans les sondages, et ceci pour tous les profils.

Il est fréquent que les gonflements mesurés pendant un hiver où la profondeur de pénétration du gel n'atteint pas l'infrastructure soient du même ordre de grandeur que ceux mesurés pendant un hiver au cours duquel le gel pénètre de 20 à 30 cm dans le sol d'infrastructure qui est très gélif. Cette même constatation a été faite sur les quatre profils situés à plus de 900 m d'altitude.

Pendant les hivers où le gel n'atteint pas l'infrastructure, les gonflements mesurés sont de l'ordre de 0,8 à 3% de la profondeur de pénétration du gel (en moyenne 1%), bien que les graves de fondation soient très peu gélives.

Dans tous les profils, la surface de la chaussée se soulève d'une manière presque uniforme pendant l'hiver et retrouve pratiquement sa position initiale après le dégel. L'augmentation de courbure de la surface de la chaussée pendant l'hiver est en moyenne de 0,7 ‰.

Malgré des gonflements de plusieurs centimètres mesurés pendant les neuf hivers au cours desquels la recherche a été poursuivie, aucune déformation ni fissure de la surface de roulement n'ont été observées. Cette absence de dégradation provient certainement du fait que la chaussée se soulève d'une manière uniforme, sans apporter d'augmentation de contraintes dans le revêtement. Ce soulèvement uniforme est possible du fait que la surface de la chaussée est entièrement dégagée de la neige et que le froid pénètre aussi bien sur les bords qu'au centre de la chaussée.

Toutes ces constatations permettent d'affirmer que les routes construites selon les méthodes:

- remplacement total des sols gélifs
- ou - remplacement partiel des sols gélifs

préconisées par la norme SNV 640 327 "Mesures préventives contre le gel" ont un comportement satisfaisant.

7.2. Prévisions de la profondeur de pénétration du gel

Les valeurs de la profondeur de pénétration du gel mesurées, au cours des neuf hivers sur les quatre profils situés en altitude, sont toujours inférieures ou égales à celles déterminées par la norme SNV 670 148.

Le rapport moyen entre les profondeurs mesurées et celles déterminées peut être considéré comme égal à 60%.

De ces considérations, il ressort que les valeurs déterminées à partir de l'indice de gel de l'air conduisent à une surestimation de la profondeur de pénétration du gel de l'ordre de 30 à 40%. En effet, l'indice de gel déterminé à partir des températures de l'air prises sous abri ne tient pas compte du microclimat (ensoleillement, vent, réverbération, etc.). Les températures mesurées quelques centimètres sous la surface de roulement permettraient de calculer un indice de gel qui correspondrait mieux à la réalité en tenant compte des conditions climatiques locales.

Les recherches en cours dans ce domaine permettront certainement de mieux définir l'influence des différents facteurs composant le microclimat sur la profondeur de pénétration du gel, en particulier la recherche No 21/78 "Effet du microclimat sur les superstructures".

7.3. Comparaison entre valeurs mesurées et calculées

Les valeurs calculées avec le programme DITEMP sont toujours inférieures à celles déterminées par la norme SNV 670 148 avec l'indice de gel de l'année; elles sont assez voisines des valeurs mesurées si on admet le coefficient de correction air - revêtement $C = 0,5$.

Ces valeurs ont été calculées en admettant que la profondeur du point fixe est située à 2,30 m. En augmentant cette profondeur, on surestimerait la profondeur de pénétration du gel d'une manière non négligeable.

Une des principales difficultés avec le programme DITEMP est justement la détermination de ce coefficient de correction C qui est admis constant pour toutes les températures au cours d'un même hiver. En introduisant un coefficient C , déterminé chaque jour en fonction des facteurs composant le microclimat, on obtiendrait des températures du revêtement plus proches de la réalité et probablement une valeur calculée de la profondeur de pénétration du gel voisine de celle mesurée.

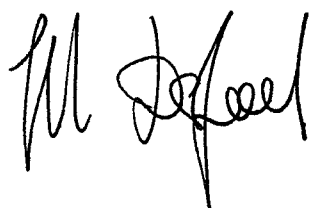
En attendant de pouvoir mieux définir ce coefficient C journalier, la profondeur de pénétration du gel calculée avec le programme DITEMP ($C = 0,5$) sera assez voisine de celle qui aurait

été mesurée dans la chaussée. Cette profondeur calculée sera moins défavorable que celle déterminée par la norme SNV 670 148 sur la seule base de l'indice de gel de l'air.

* * *

L'Ingénieur chargé de l'étude:

Le Professeur responsable:

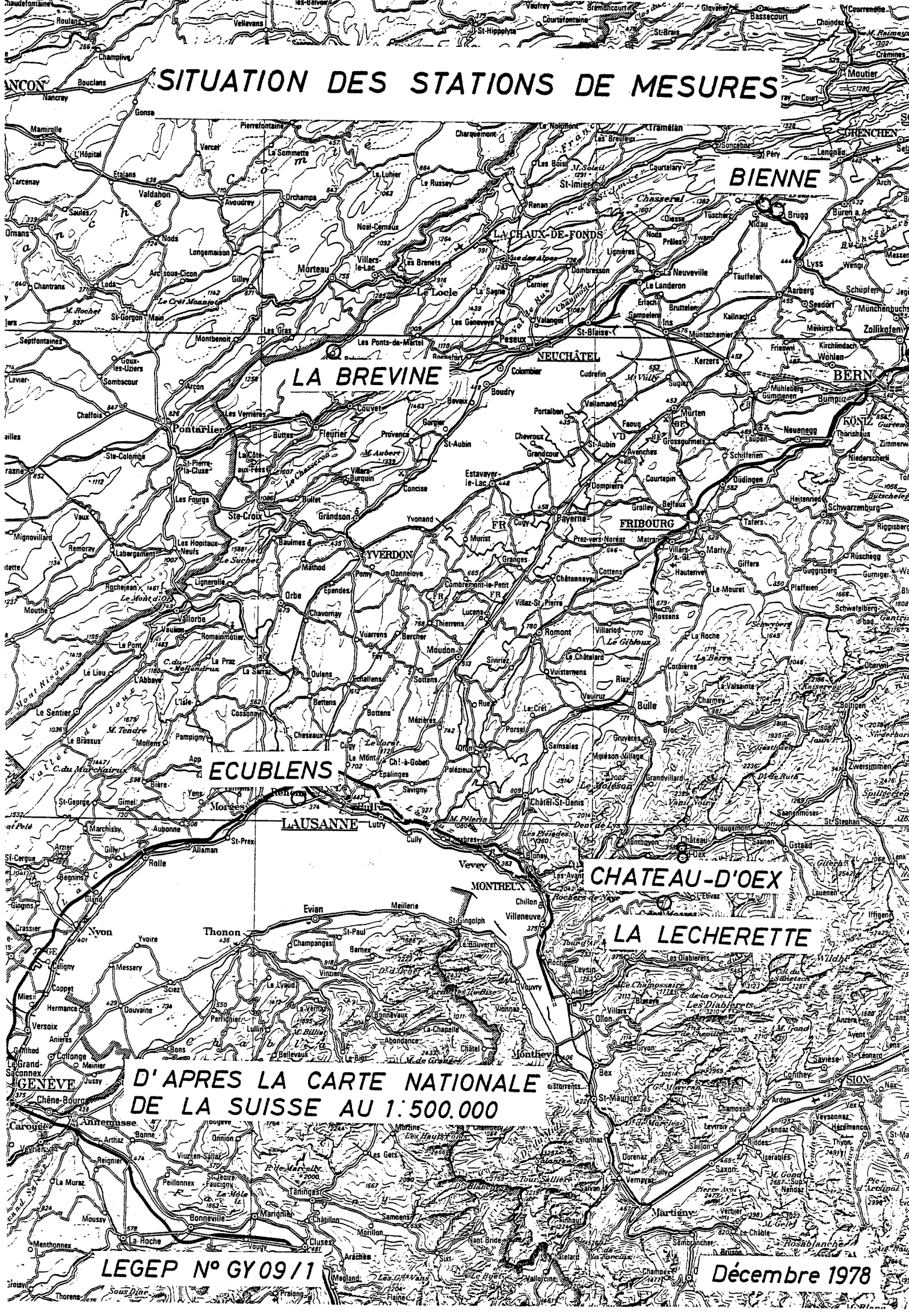


J.-M. Despond



E. Recordon

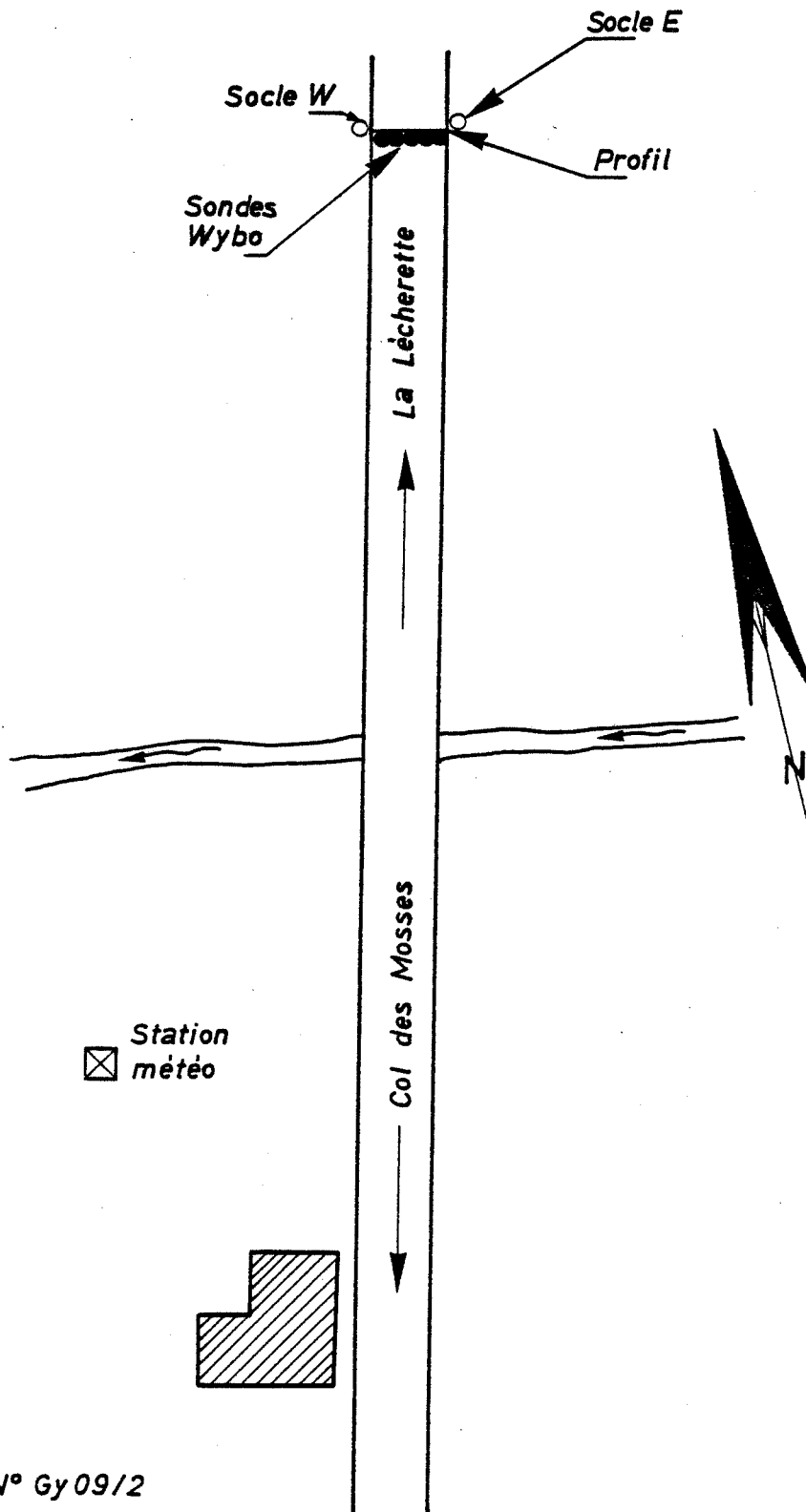
SITUATION DES STATIONS DE MESURES



D'APRES LA CARTE NATIONALE
DE LA SUISSE AU 1:500.000

PLAN DE SITUATION

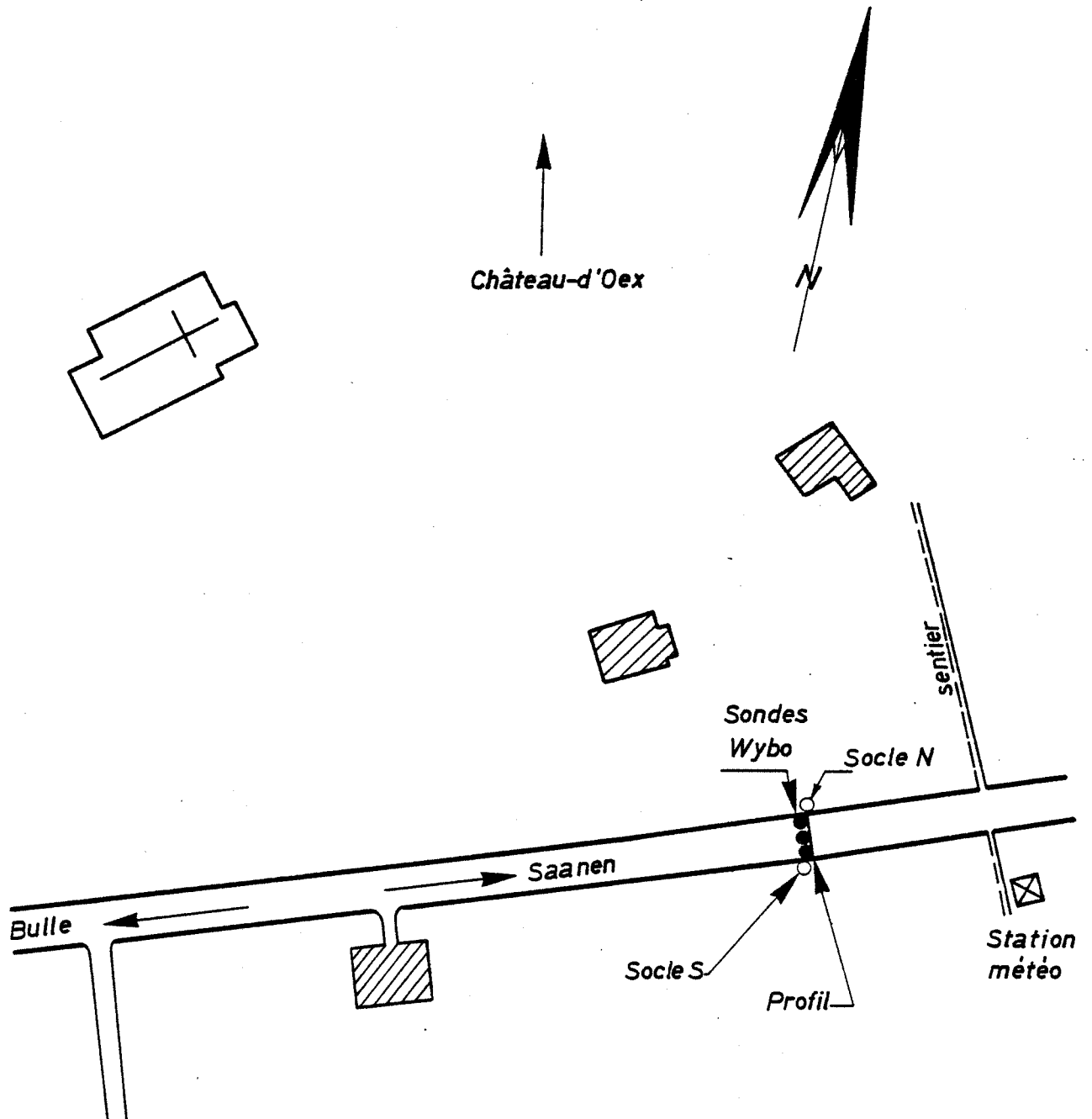
Echelle 1:500



ROUTE DE CONTOURNEMENT CHATEAU-D'OEX

PLAN DE SITUATION

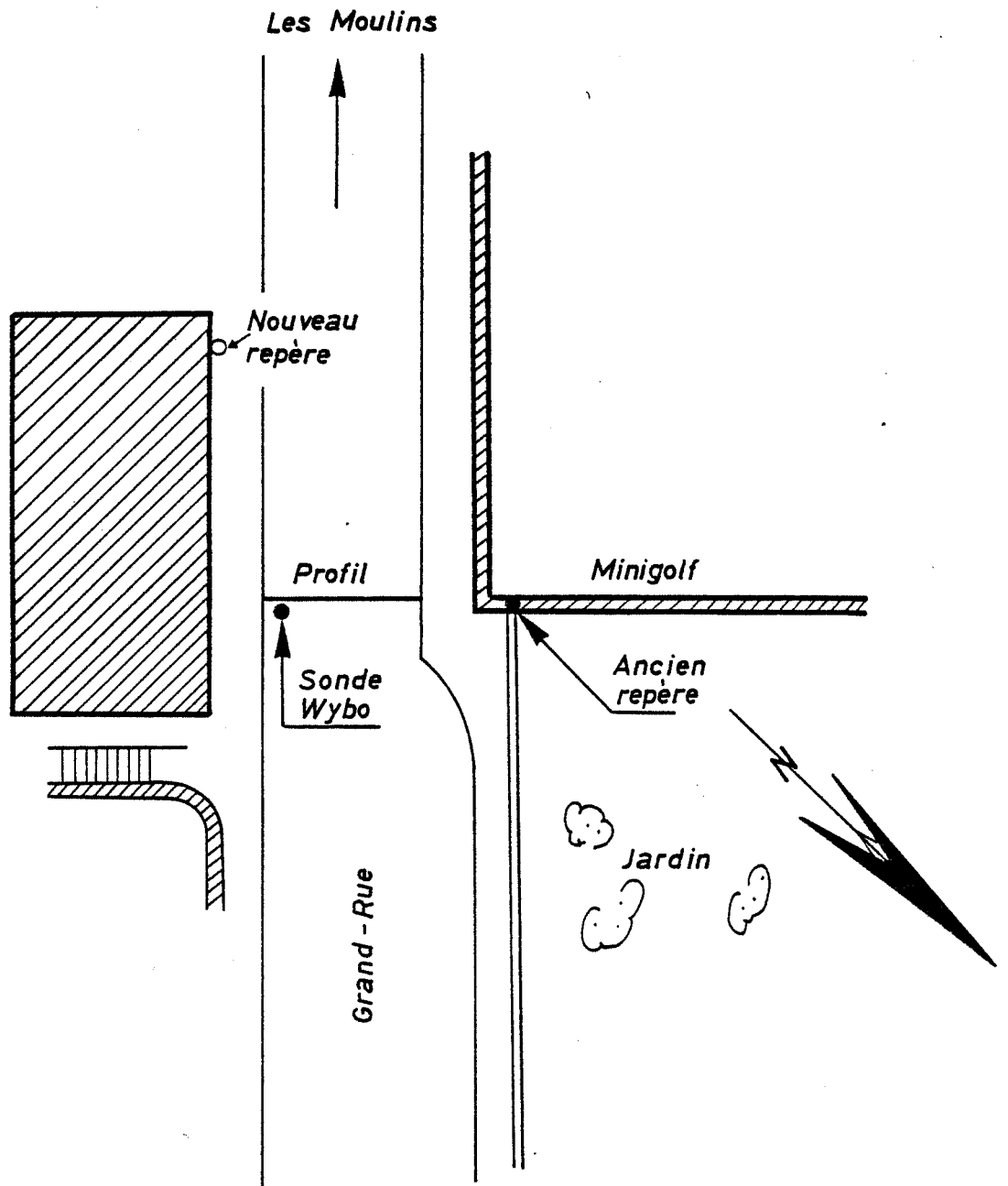
Echelle 1:1000



CHATEAU - D'OEX - VILLAGE

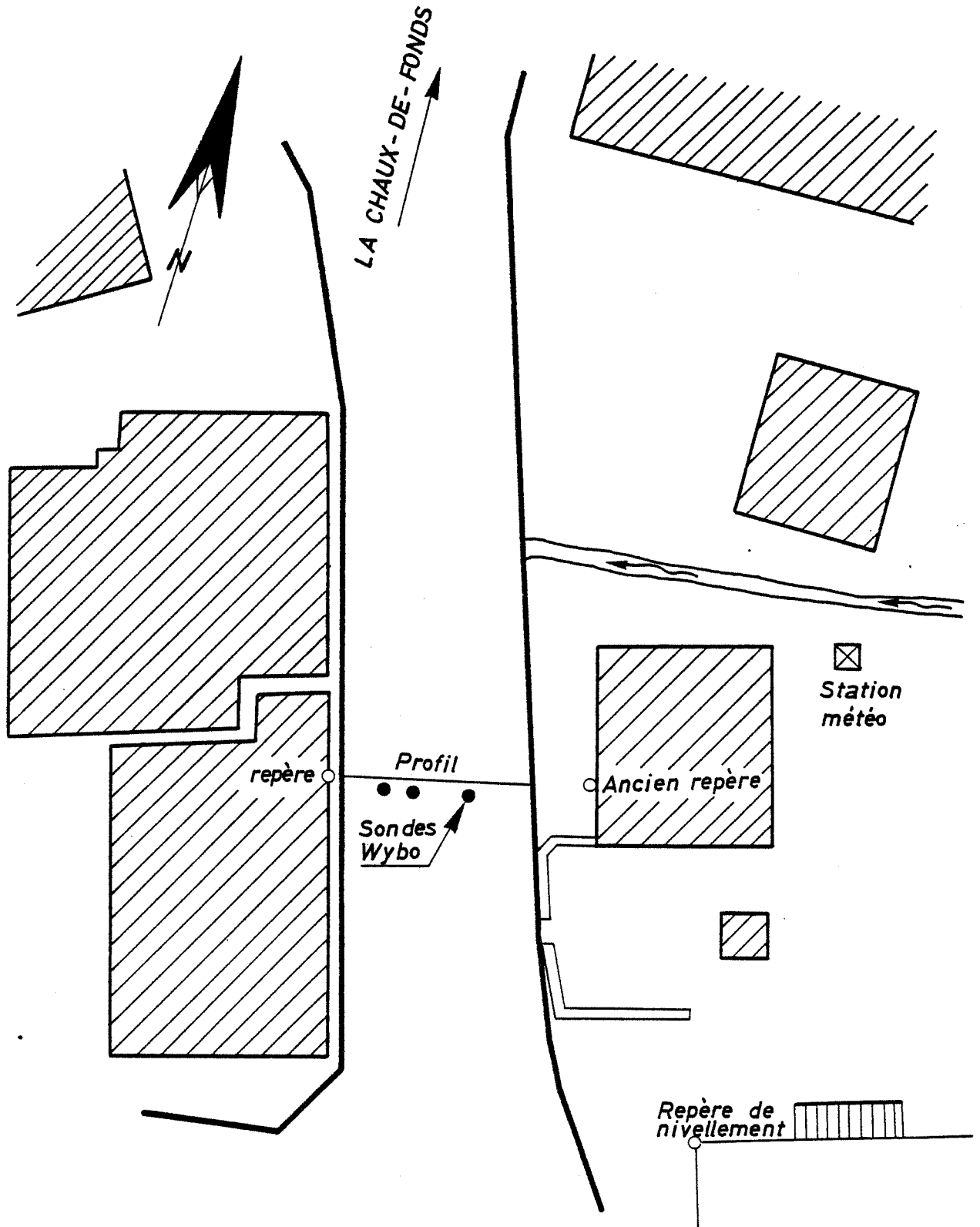
PLAN DE SITUATION

Echelle 1:250



PLAN DE SITUATION

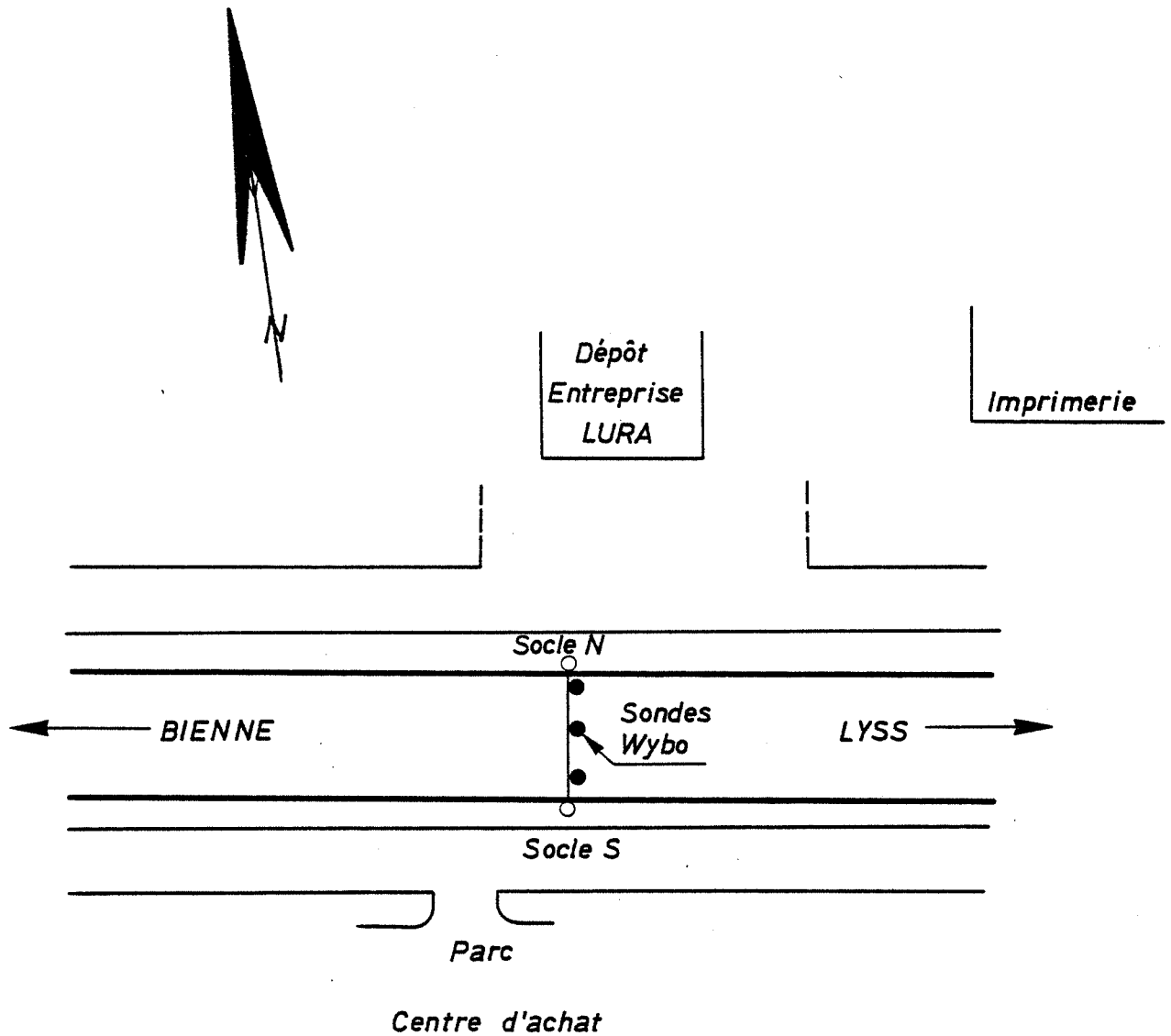
Echelle 1:250



BIENNE SEMI-AUTOROUTE

PLAN DE SITUATION

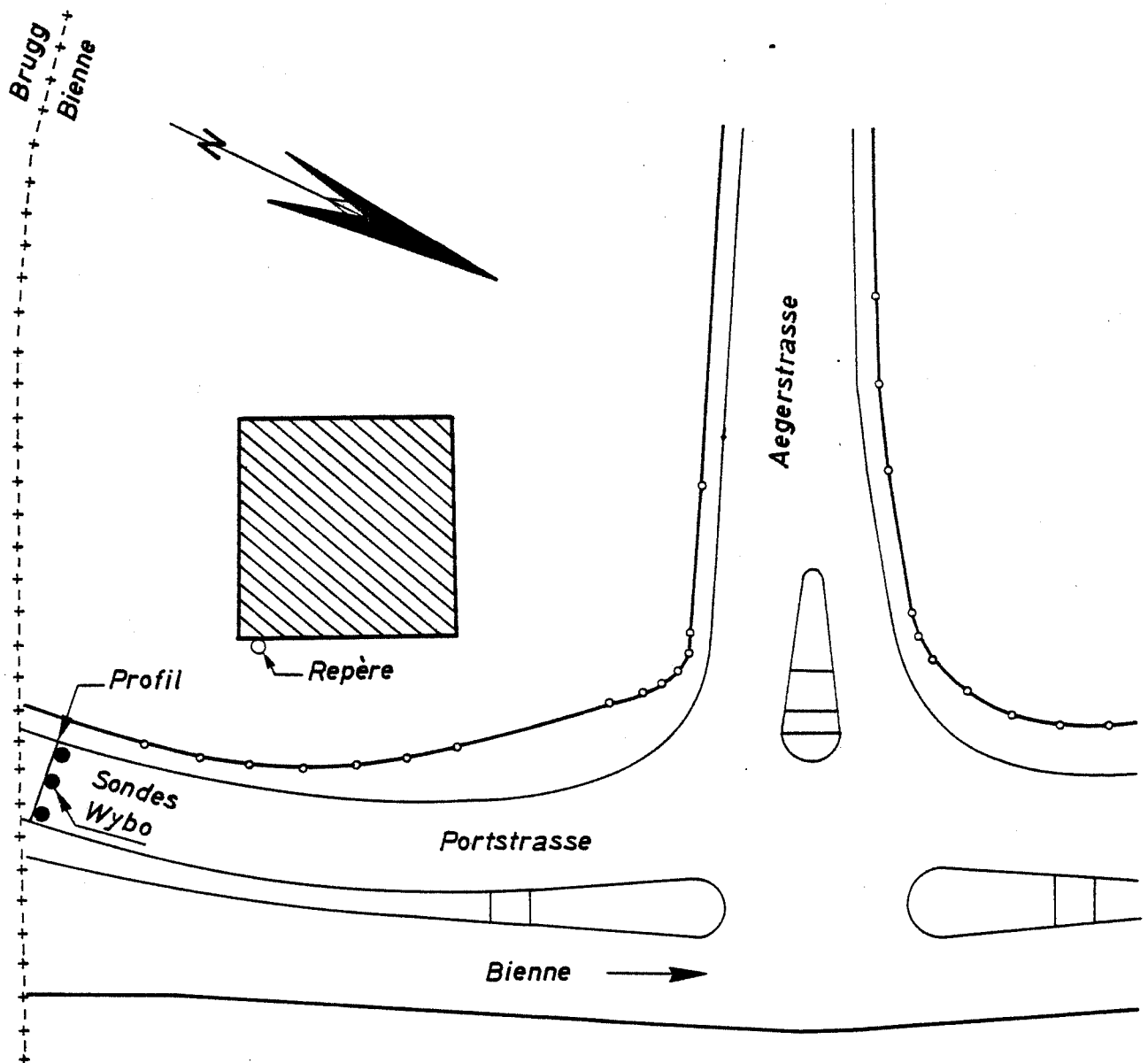
Echelle 1:500



PORTSTRASSE BIENNE

PLAN DE SITUATION

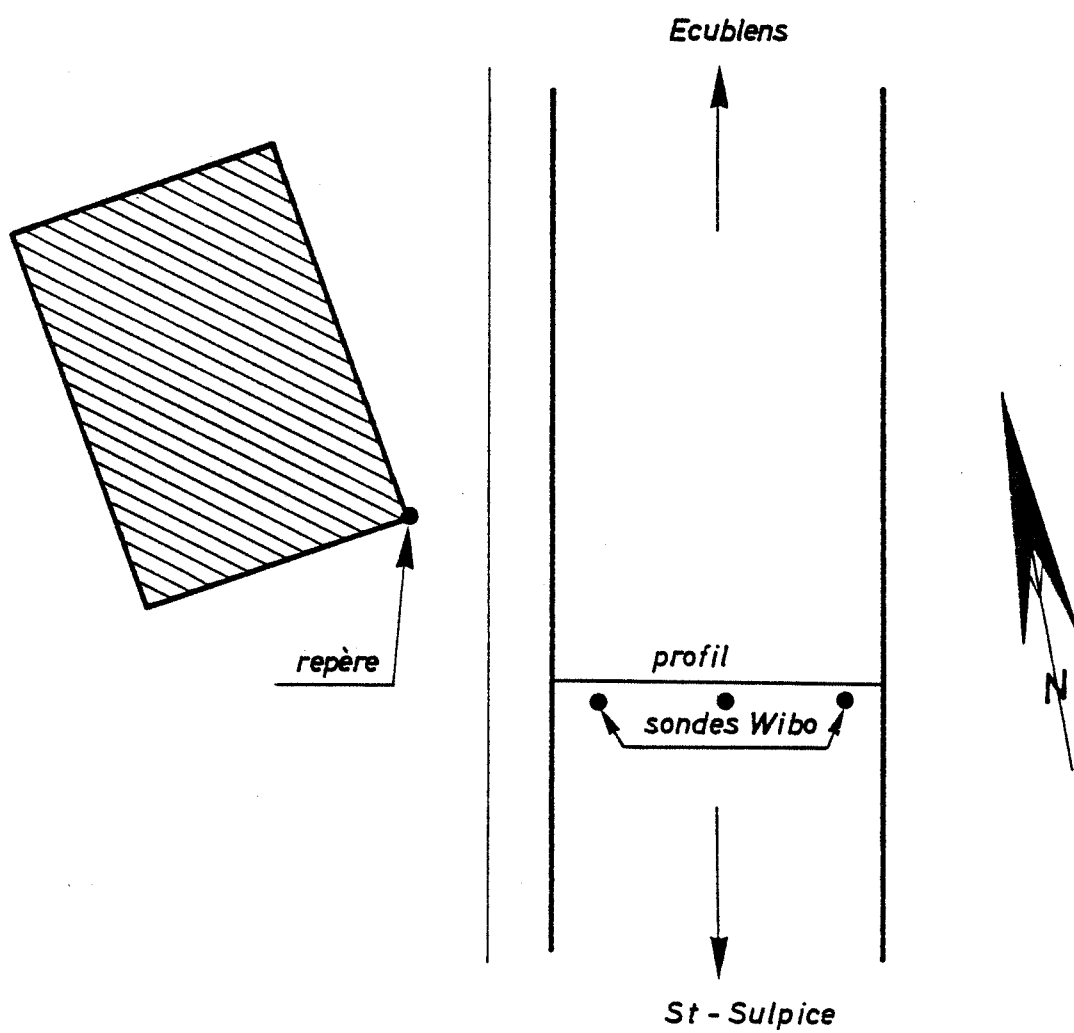
Echelle 1.500



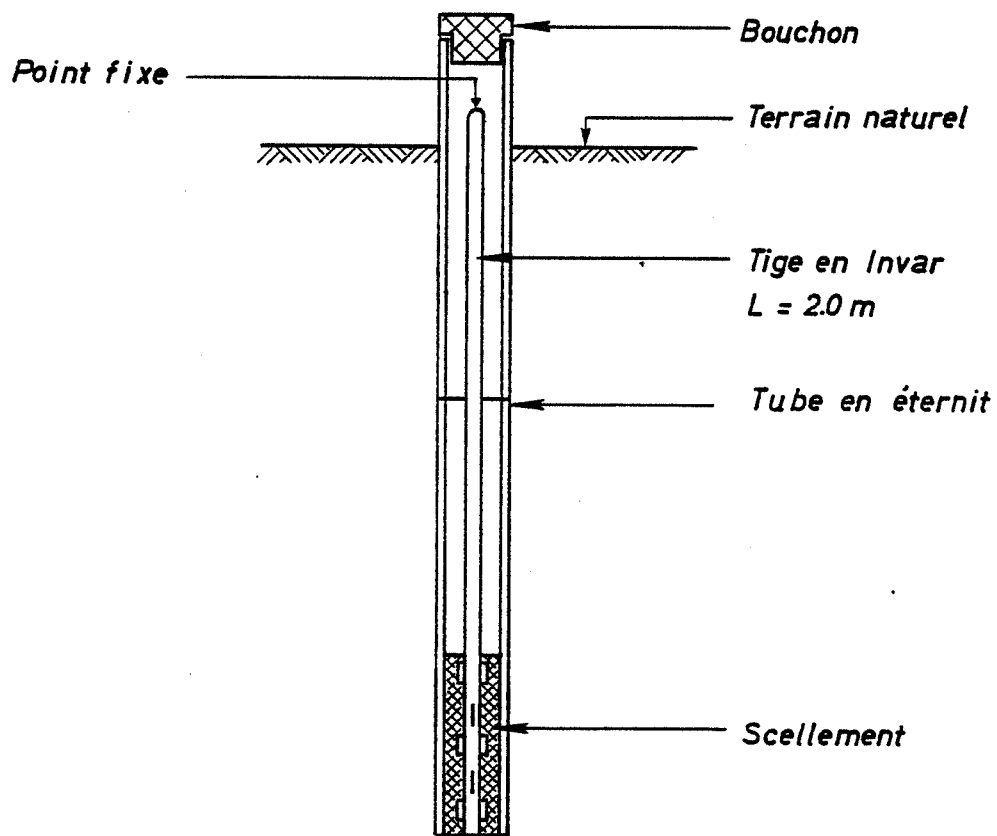
RC 82 ECUBLENS

PLAN DE SITUATION

Echelle 1:200



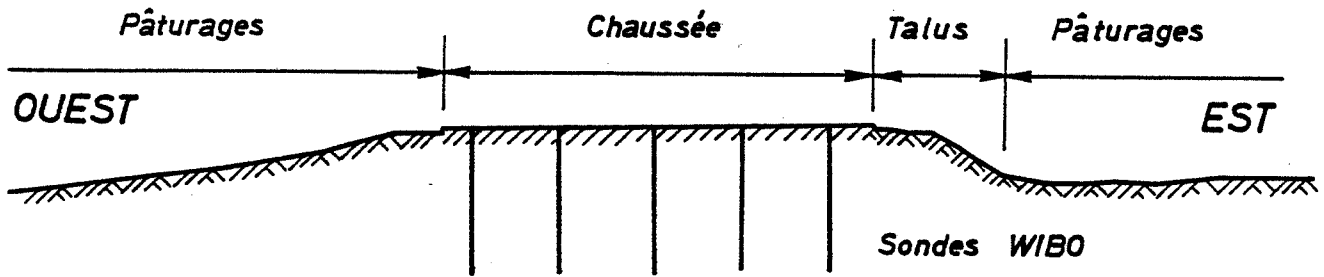
REPERE DE NIVELLEMENT



LA LECHERETTE

PROFIL EN TRAVERS

Echelle : 1:100



COUPE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Echelle : 1:20

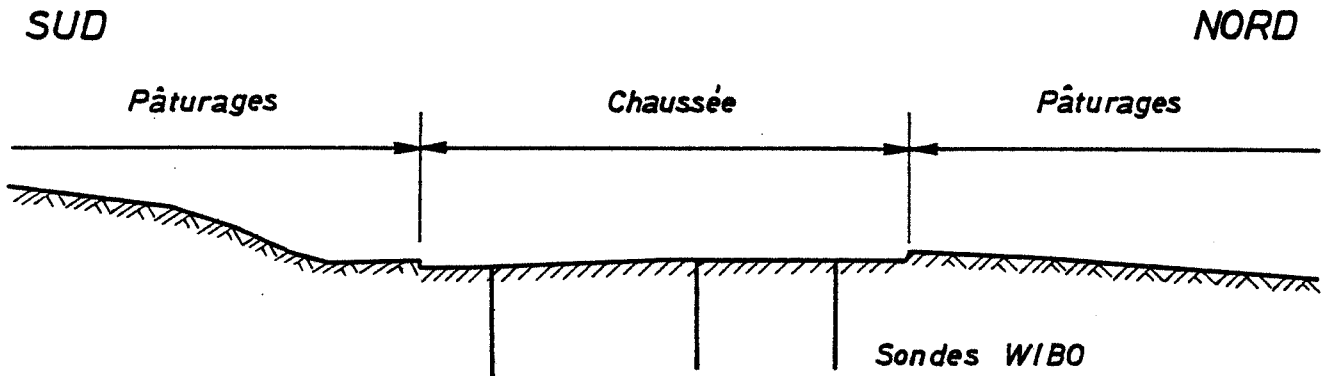
Nomenclature	Prof. (m)	Ech.	γ (kN·m ⁻³)	w (%)	k (m·s ⁻¹)	USCS
Tapis et enrobé bitumineux	0.08	1	-	4.0	-	GW
G - s gris	0.35	2	-	4.3	-	GM
G + s - l jaune	0.60	3	18.5	45.3	2.0·10 ⁻⁹	SMML
S + l - g brun	1.05	4	18.4	31.4	1.8·10 ⁻⁹	ML
L + s gris-brun	2.00	5	-	45.8	-	ML

(Pas d'eau)

CONTOURNEMENT DE CHATEAU D'OEX

PROFIL EN TRAVERS

Echelle : 1:100



COUPE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Echelle : 1:20

Nomenclature	Prof. (m)	Ech.	γ ($kN \cdot m^{-3}$)	w (%)	k ($m \cdot s^{-1}$)	USCS
Tapis	0.10	1	-	5.2	-	GM
G s - l gris - jaune	0.70	2	19.8	24.9	$8.2 \cdot 10^{-10}$	MH
G s - l - a beige + qq. blocs	1.20	3	-	34.7	-	GC-CL
	2.00					

(Pas d'eau)

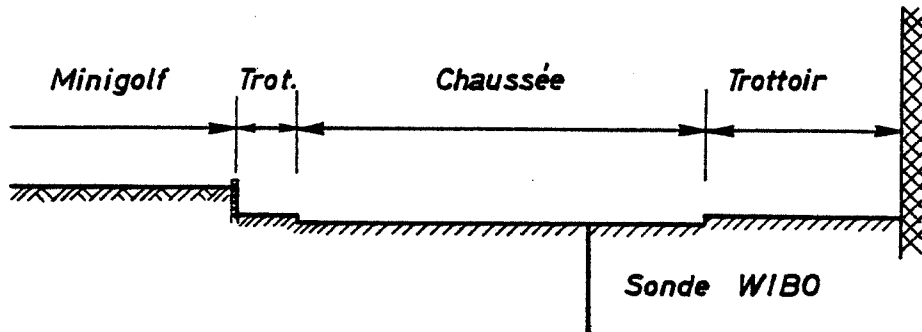
CHATEAU D'OEX - VILLAGE

PROFIL EN TRAVERS

N-OUEST

Echelle 1:100

S-EST



COUPE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Echelle : 1 : 20

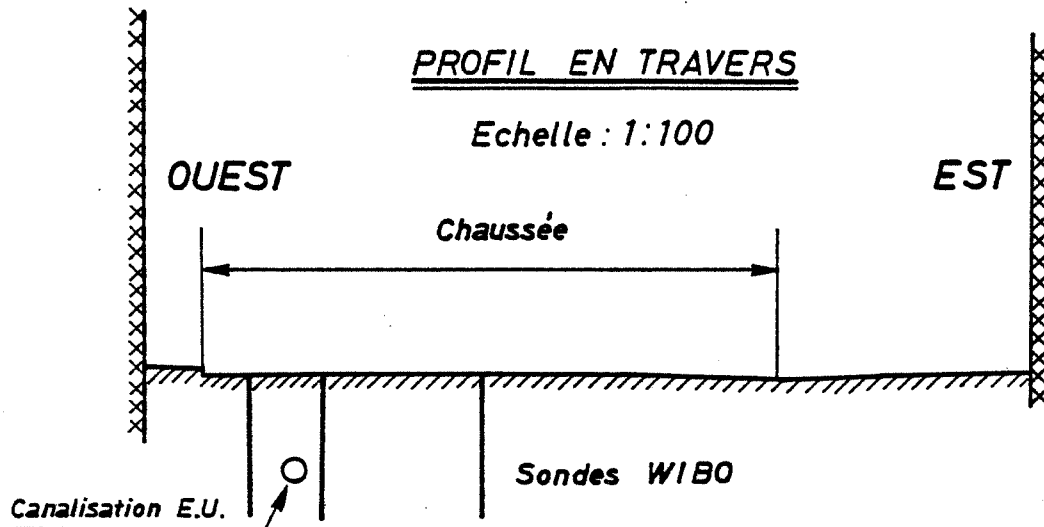
Nomenclature	Prof. (m)	Ech.	γ (kN·m ⁻³)	w (%)	k (m·s ⁻¹)	USCS
Tapis + enrobé bitumineux	0.12	1				
G-s-l gris	0.60	1	-	2.3	-	GM
L+a-s-g brun + qq. pierres et matières organiques	1.30	2	18.1	22.4	4·10 ⁻⁶	MH
Las-g brun	1.70	3	-	30.7	-	CL
Bloc	1.80					
Las-g brun	2.00					

(Pas d'eau)

LA BREVINE

PROFIL EN TRAVERS

Echelle : 1:100



COUPE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Echelle : 1:20

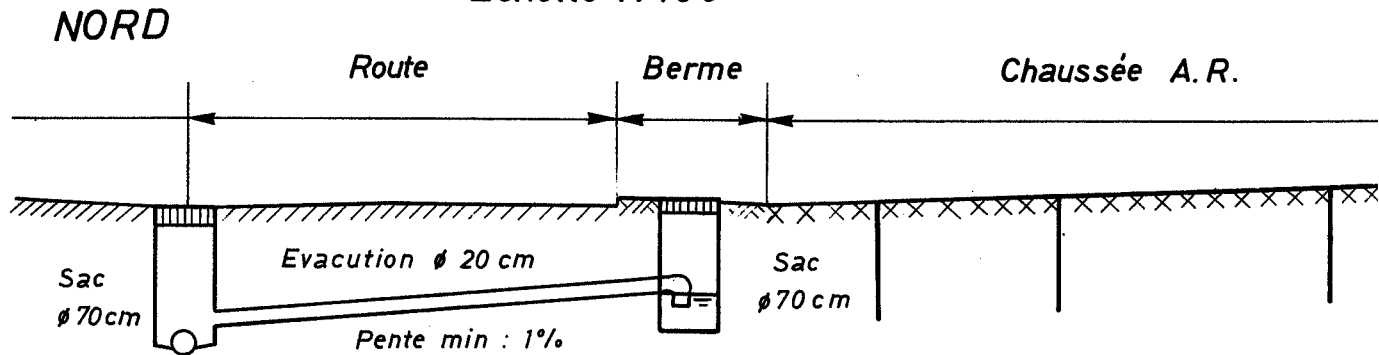
Nomenclature	Prof. (m)	Ech.	γ ($kN \cdot m^{-3}$)	w (%)	k ($m \cdot s^{-1}$)	USCS
Tapis bitumineux	0.04	1	-	4.8	-	(GM)
G concassé gris-jaune	0.08					
G-s-l gris-jaune	0.20	2	-	4.5	-	(GM)
G-s-l gris-brun + pierres et déchets briques	0.40					
G-s-l brun + pierres		3				
	0.90	4	-	19.9	-	GC-CL
G s l brun	1.20					
L a - s g brun-foncé		5	19.7	25.3	$3.2 \cdot 10^{-9}$	CL
L a - s g brun-foncé + MO	1.80					
	2.00					

(Pas d'eau)

AUTOROUTE BIENNE-LYSS

PROFIL EN TRAVERS

Echelle 1:100



COUPE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

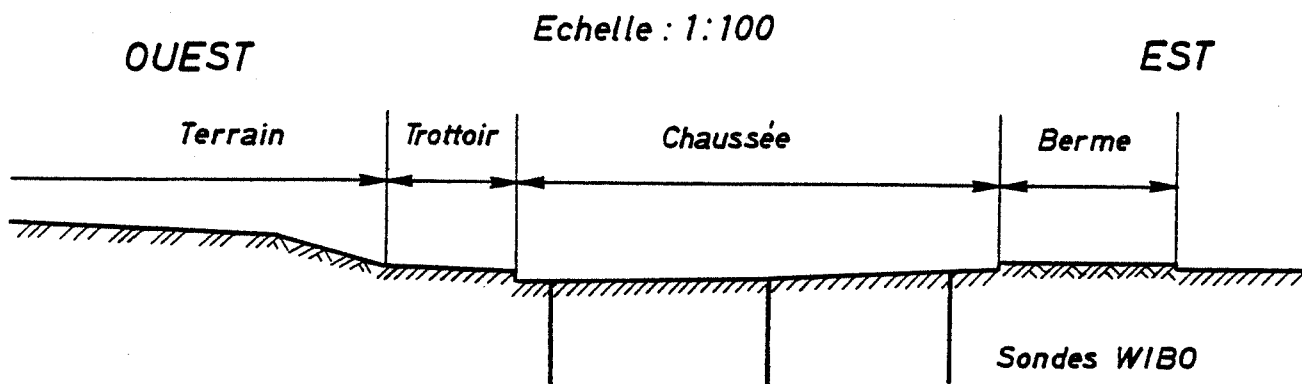
Echelle 1:20

Nomenclature	Prof. (m)	Ech.	γ (kN·m ⁻³)	w (%)	k (m·s ⁻¹)	USCS
Béton de ciment	0.18					
Gravier sableux peu limoneux gris		1	—	3.8	—	GP
		2	—	4.1	—	GP
	2.00					
Al + déch.org. gris - bleu	2.20					

(Pas d'eau)

PORTSTRASSE-BIENNE

PROFIL EN TRAVERS



COUPE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

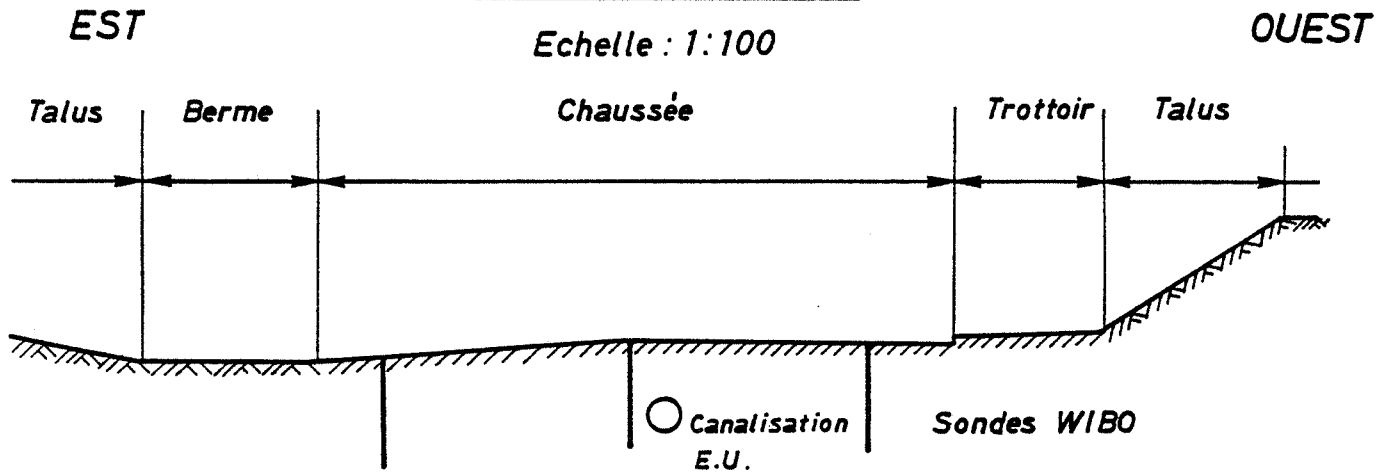
Echelle : 1:20

Nomenclature	Prof. (m)	Ech.	γ ($kN \cdot m^{-3}$)	w (%)	k ($m \cdot s^{-1}$)	USCS
Béton bitumineux	0.10					
G cassé beige avec pénétration	0.40	1				
G s-l gris		2	-	4.3	-	GP
		3	-	4.6	-	GP
Remblai	1.40 1.45		17.5	41.8	$3.4 \cdot 10^{-9}$	OH
A l gris-bleu + déchets organiques	2.00					

(Pas d'eau)

RC 82 ECUBLENS

PROFIL EN TRAVERS



COUPE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

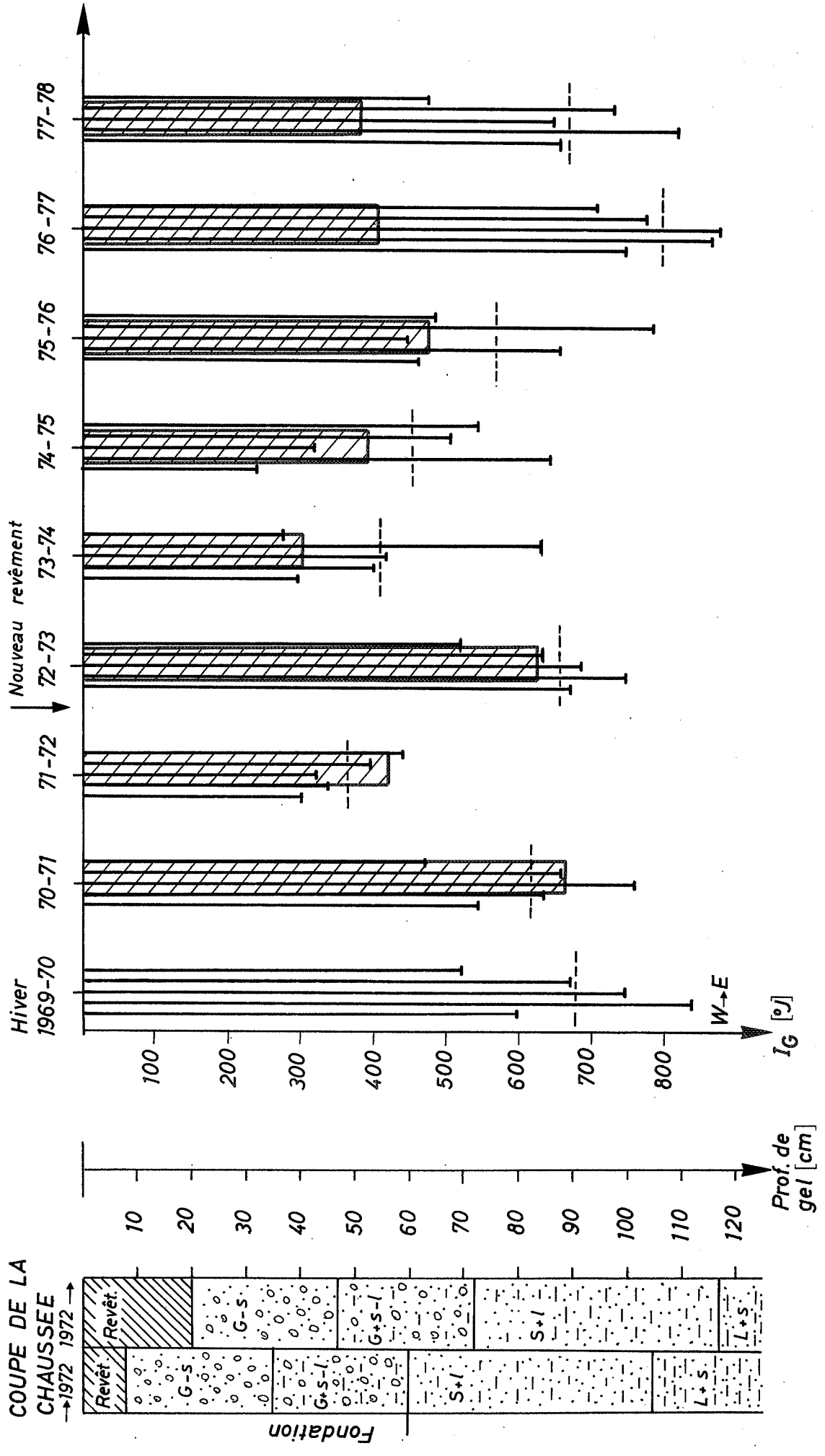
Echelle : 1:20

Nomenclature	Prof. (m)	Ech.	γ ($kN \cdot m^{-3}$)	w (%)	k ($m \cdot s^{-1}$)	USCS
Tapis bitumineux	0.03					
Enrobé bitumineux	0.22	1				
G s-l beige + pierres	0.60	1	-	4.1	-	GM
G s-l beige	1.50	2	-	5.8	-	GC
G+s-l brun-beige	2.00	3	-	6.5	-	GM

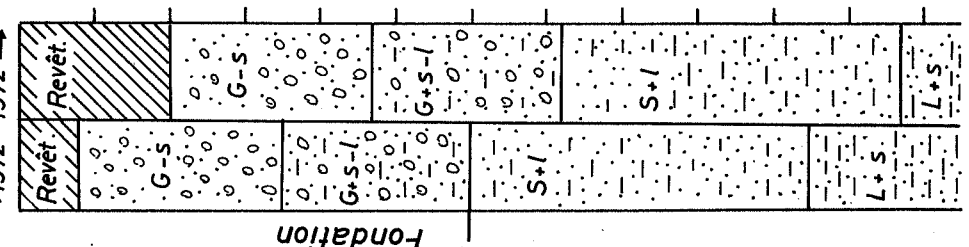
(Pas d'eau)

PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL DANS LA CHAUSSEE

LA LECHERETTE

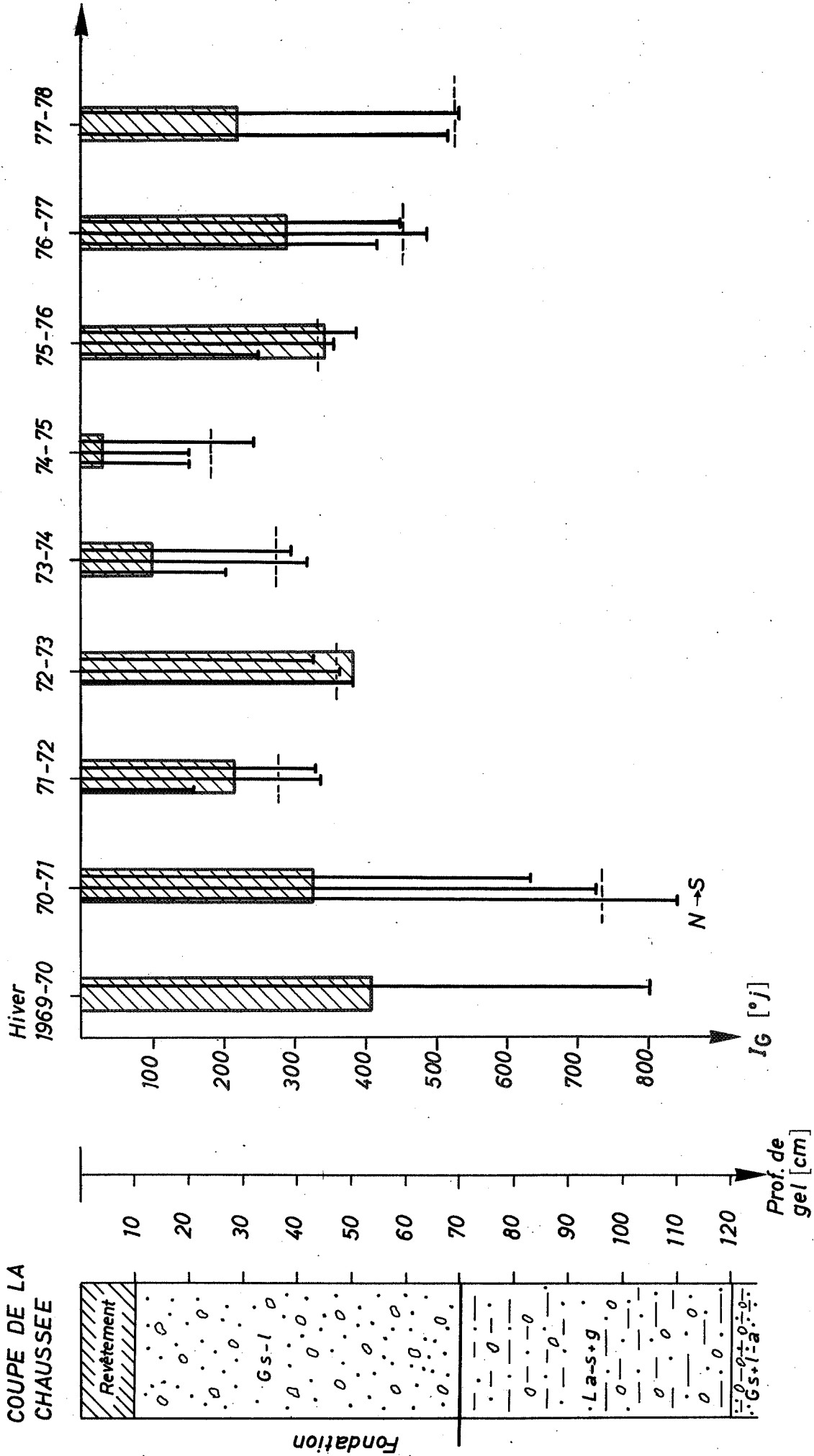


COUPE DE LA CHAUSSEE → 1972

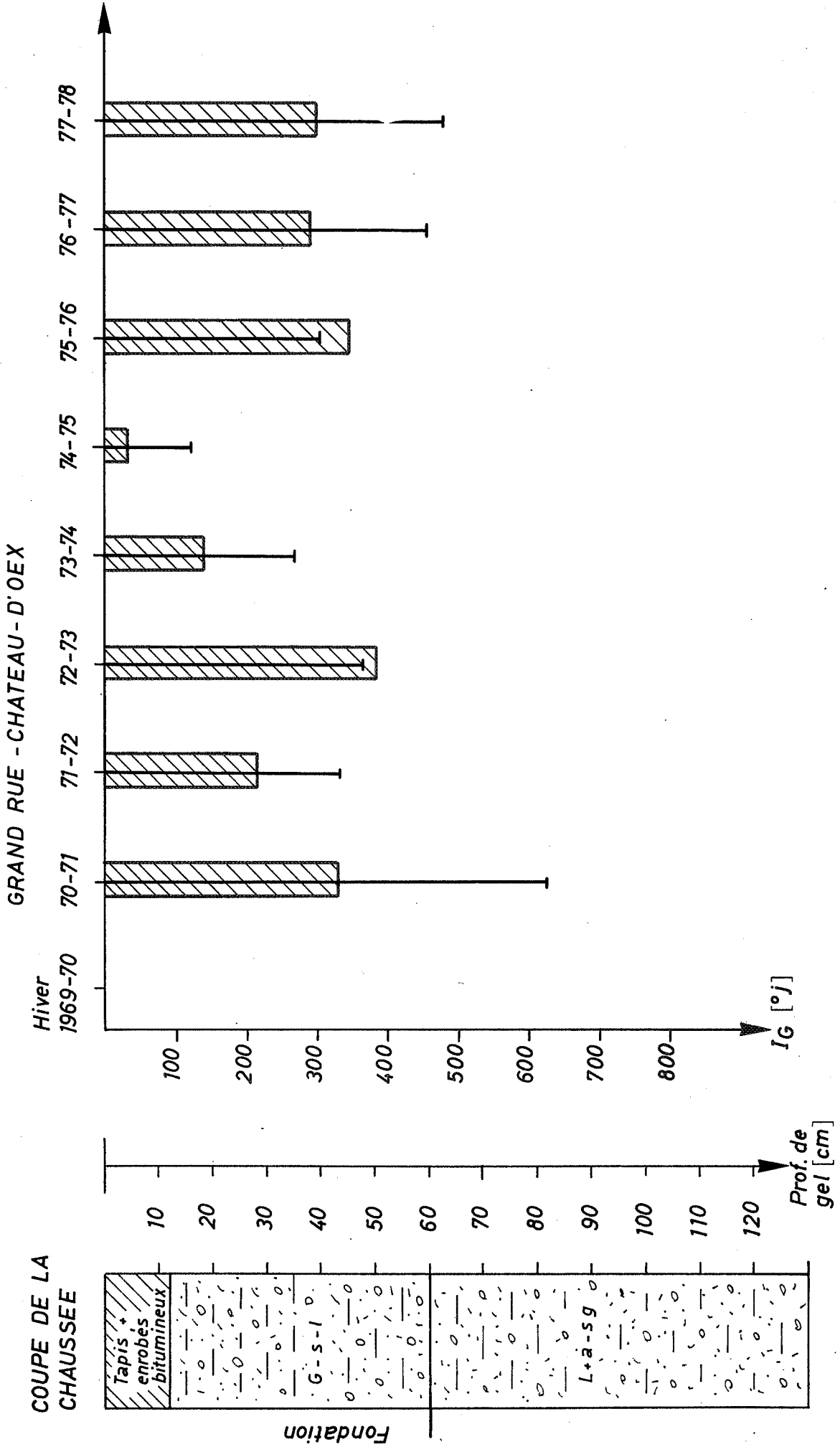


PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL DANS LA CHAUSSEE

CONTOURNEMENT DE CHATEAU-D'OEX

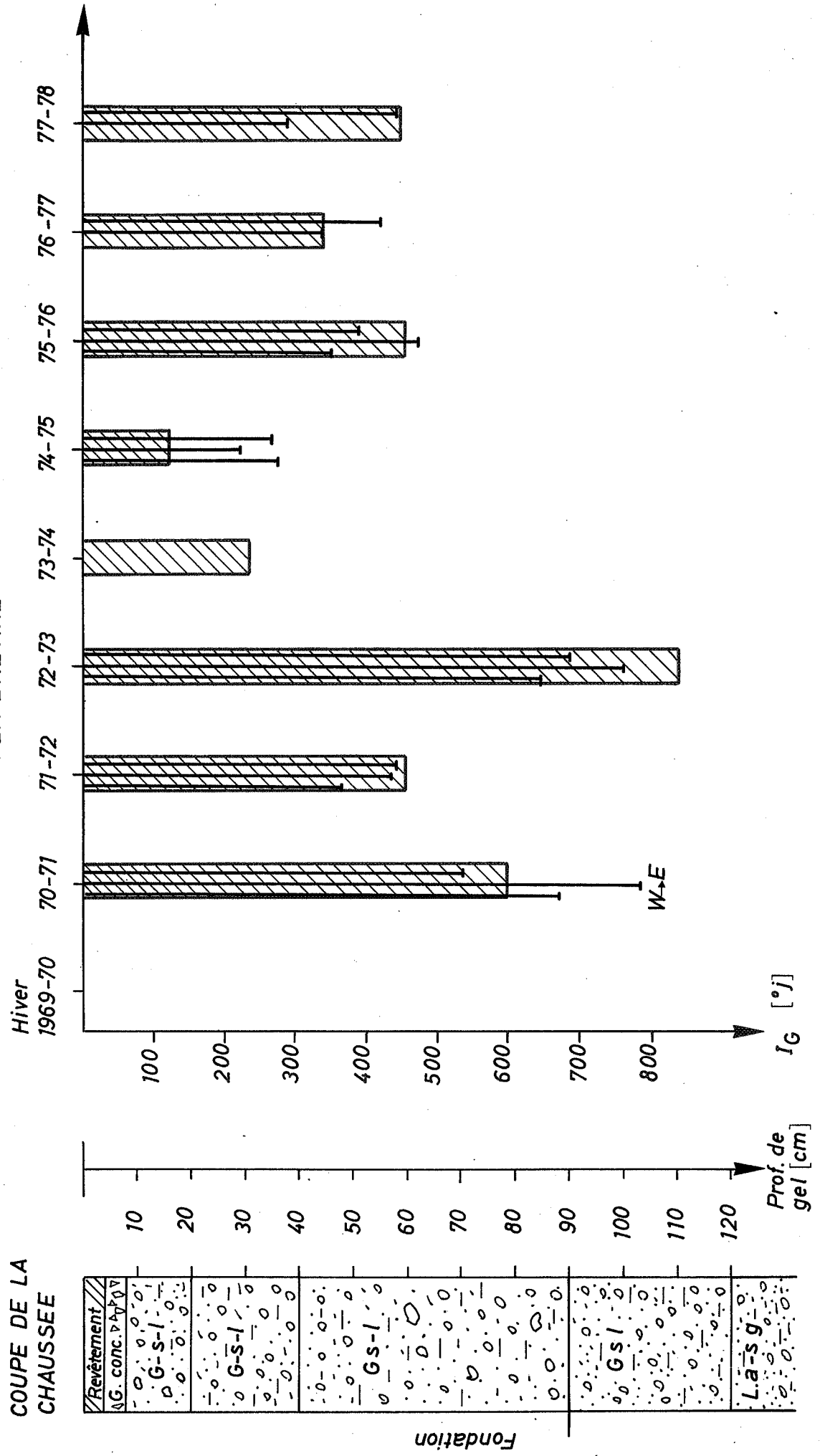


PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL DANS LA CHAUSSEE



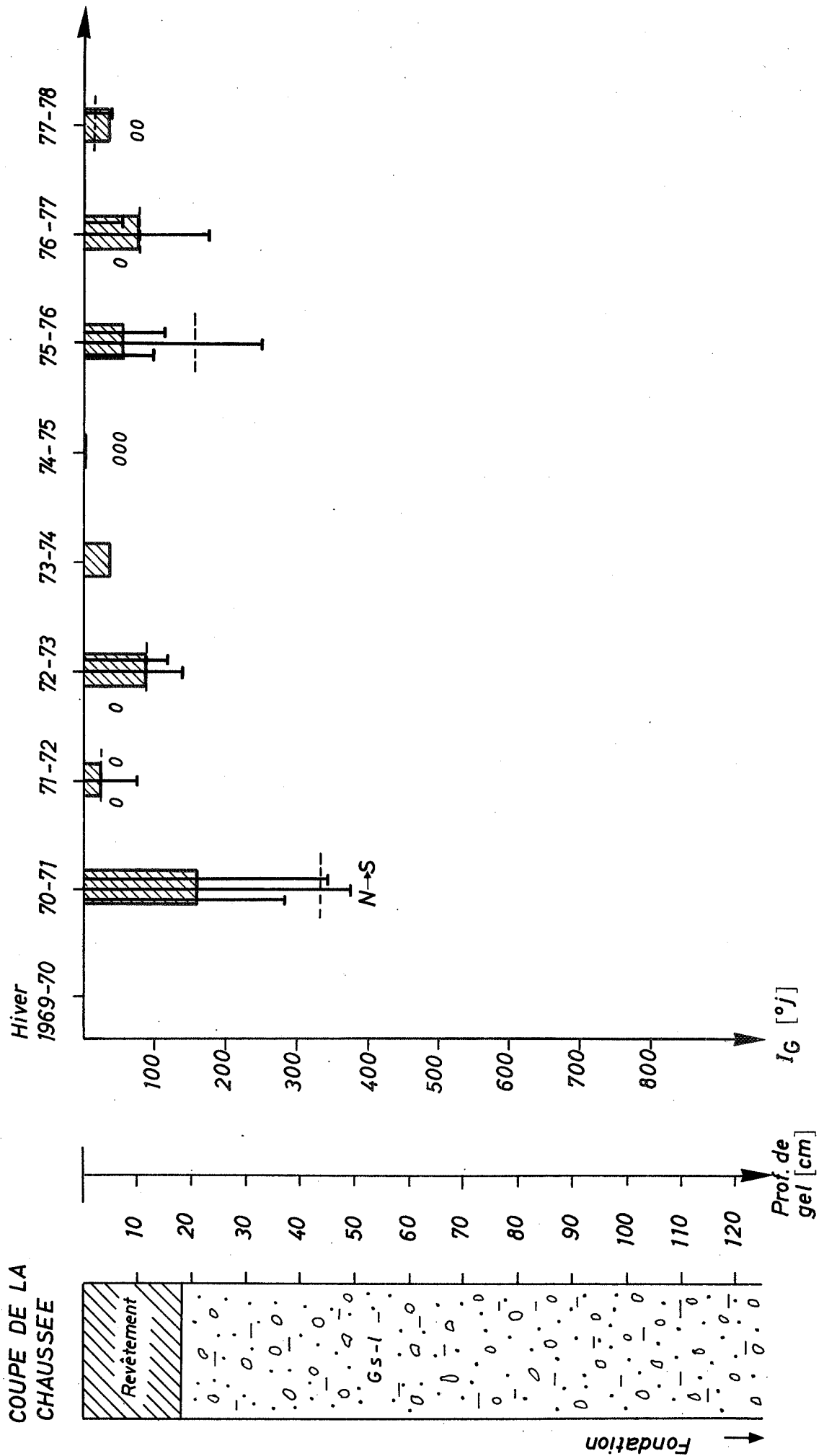
PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL DANS LA CHAUSSEE

LA BREVINE



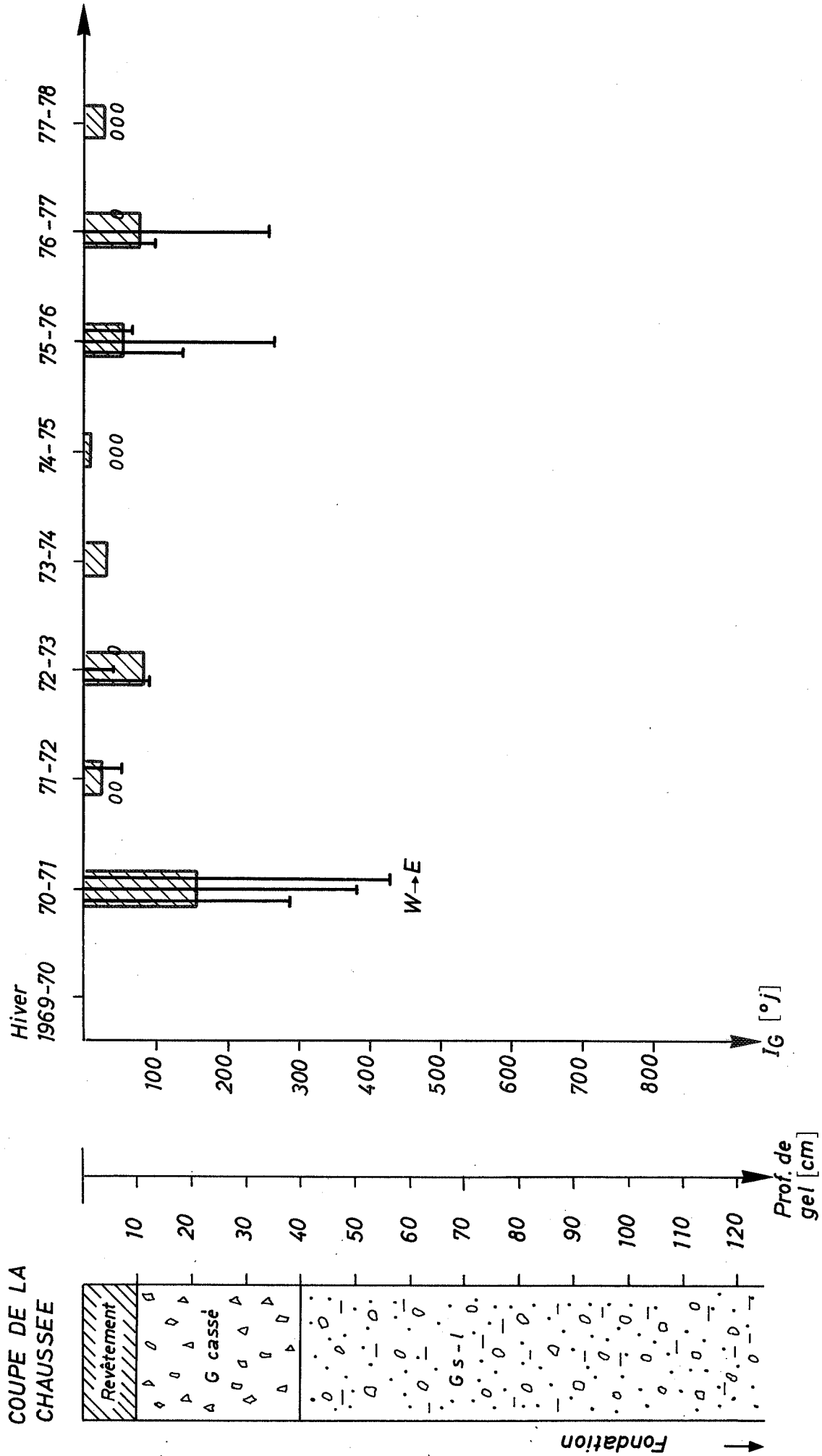
PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL DANS LA CHAUSSEE

SEMI - AUTOROUTE BIENNE



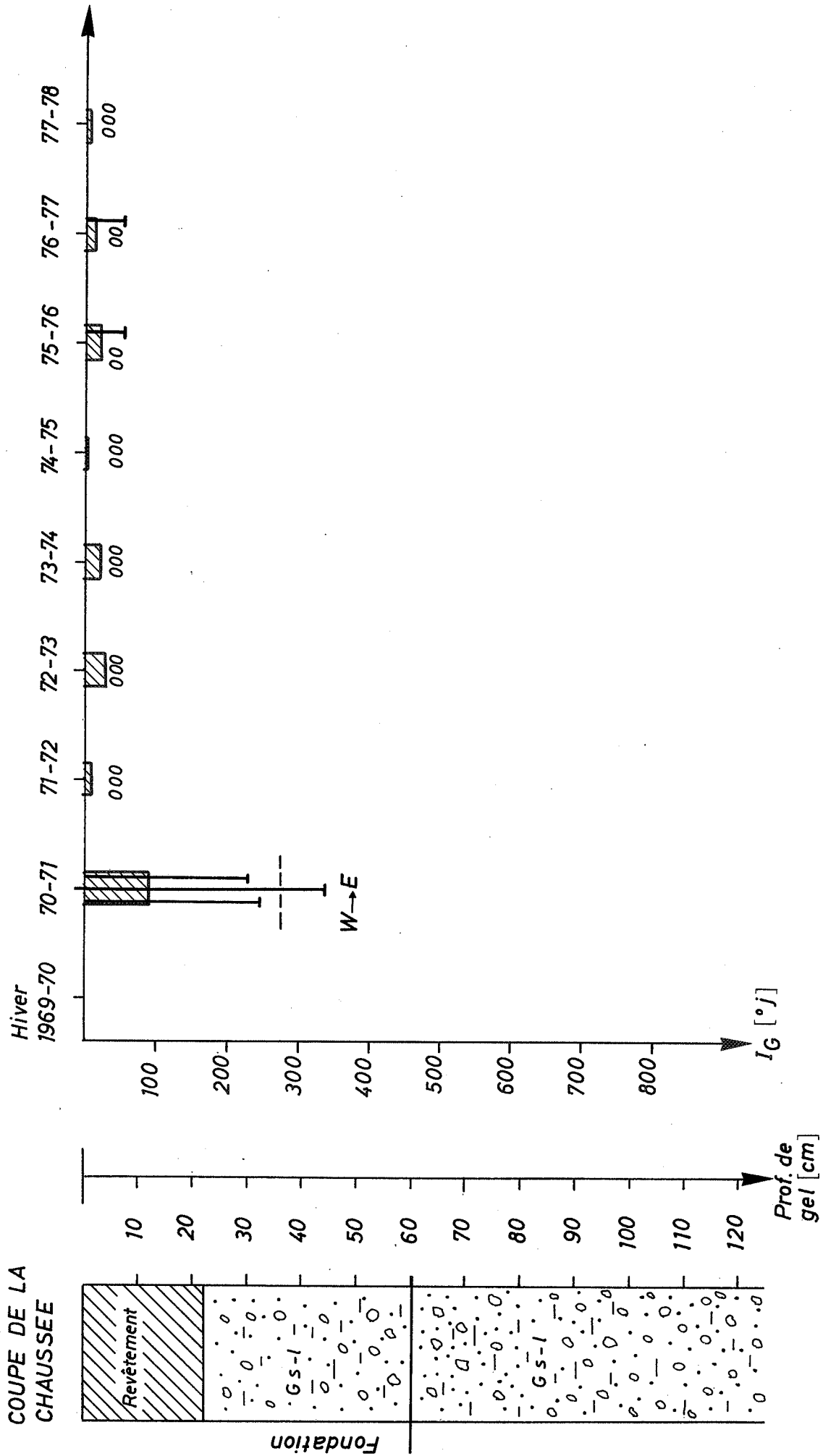
PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL DANS LA CHAUSSEE

PORTSTRASSE BIENNE



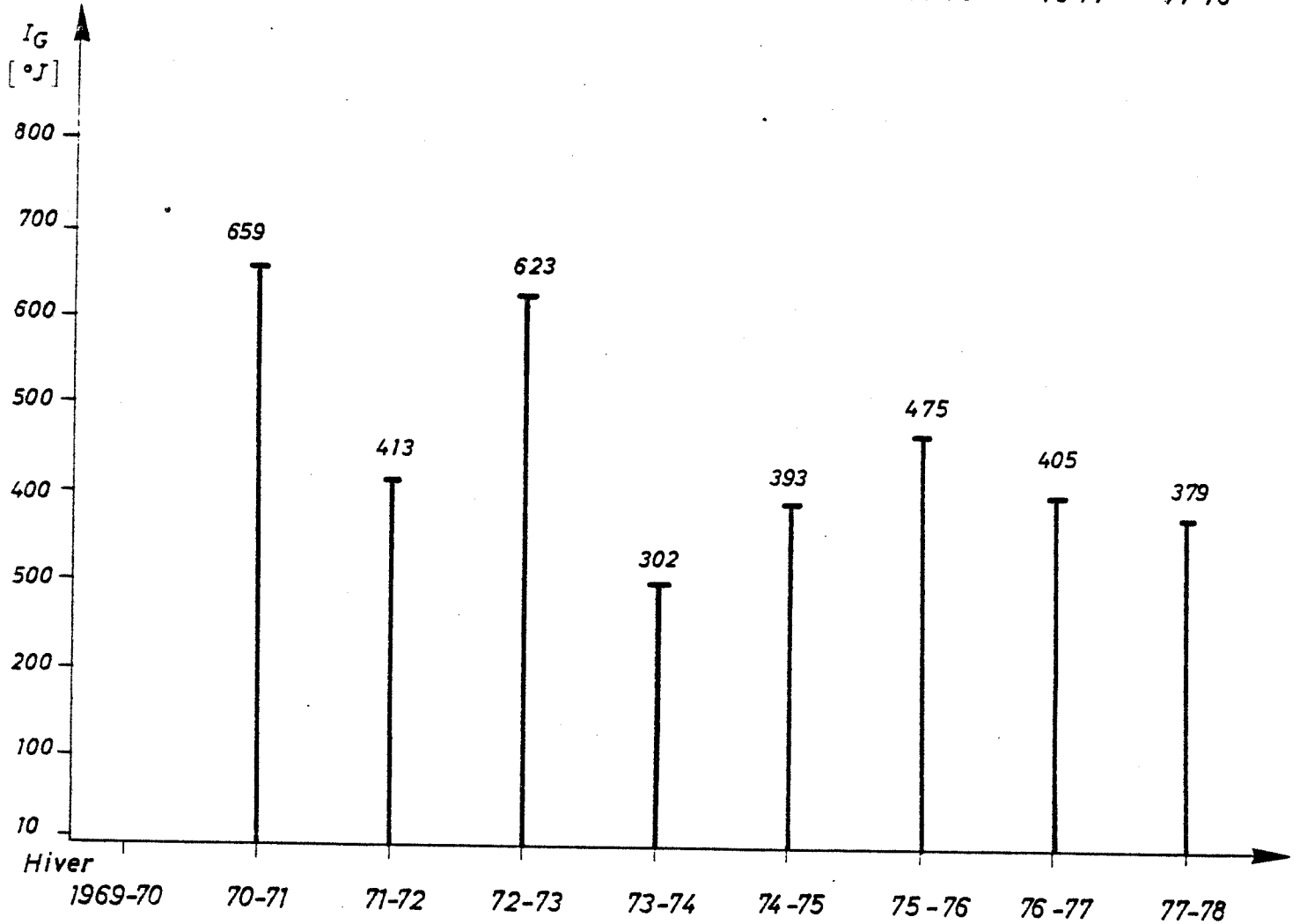
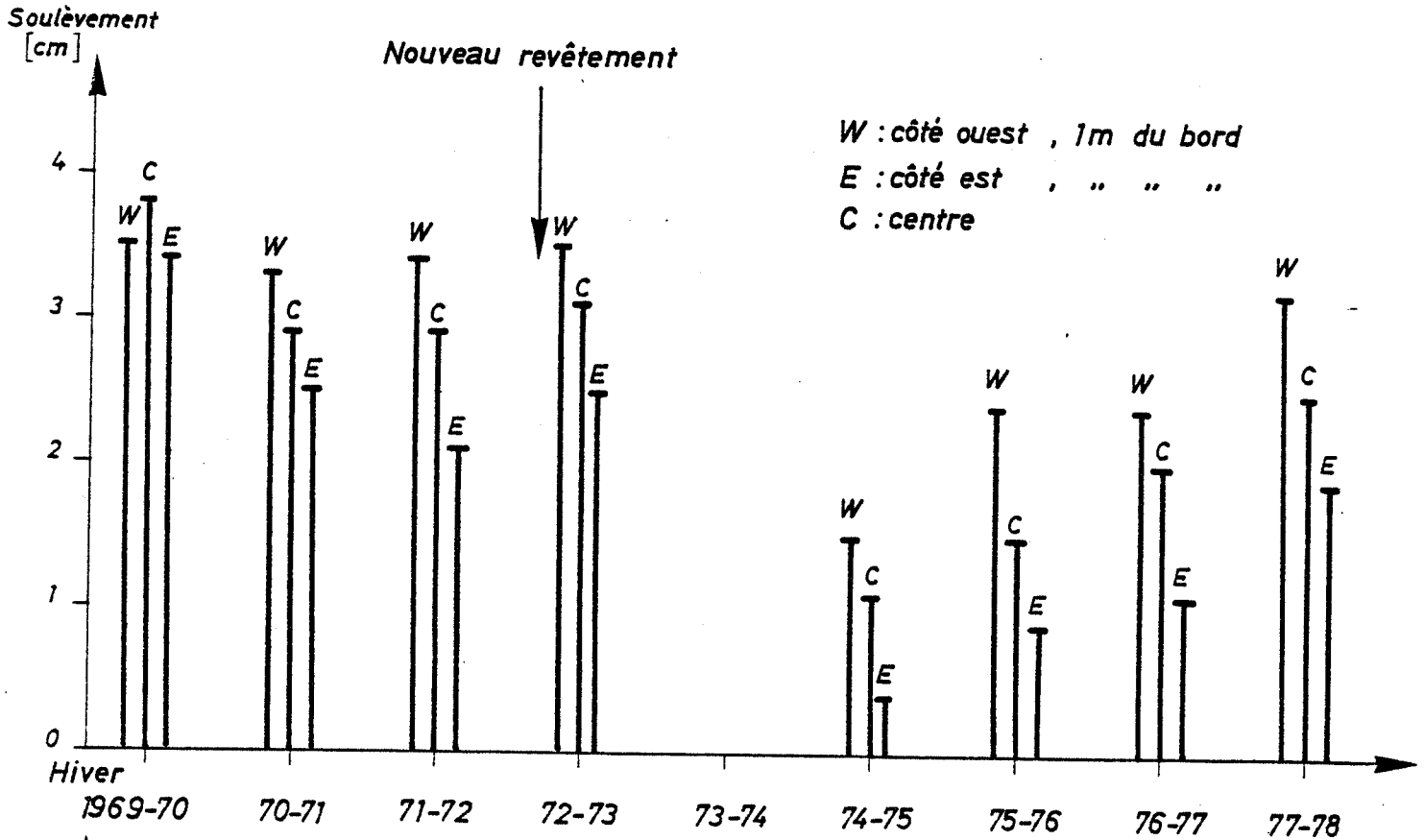
PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL DANS LA CHAUSSEE

ECUBLENS



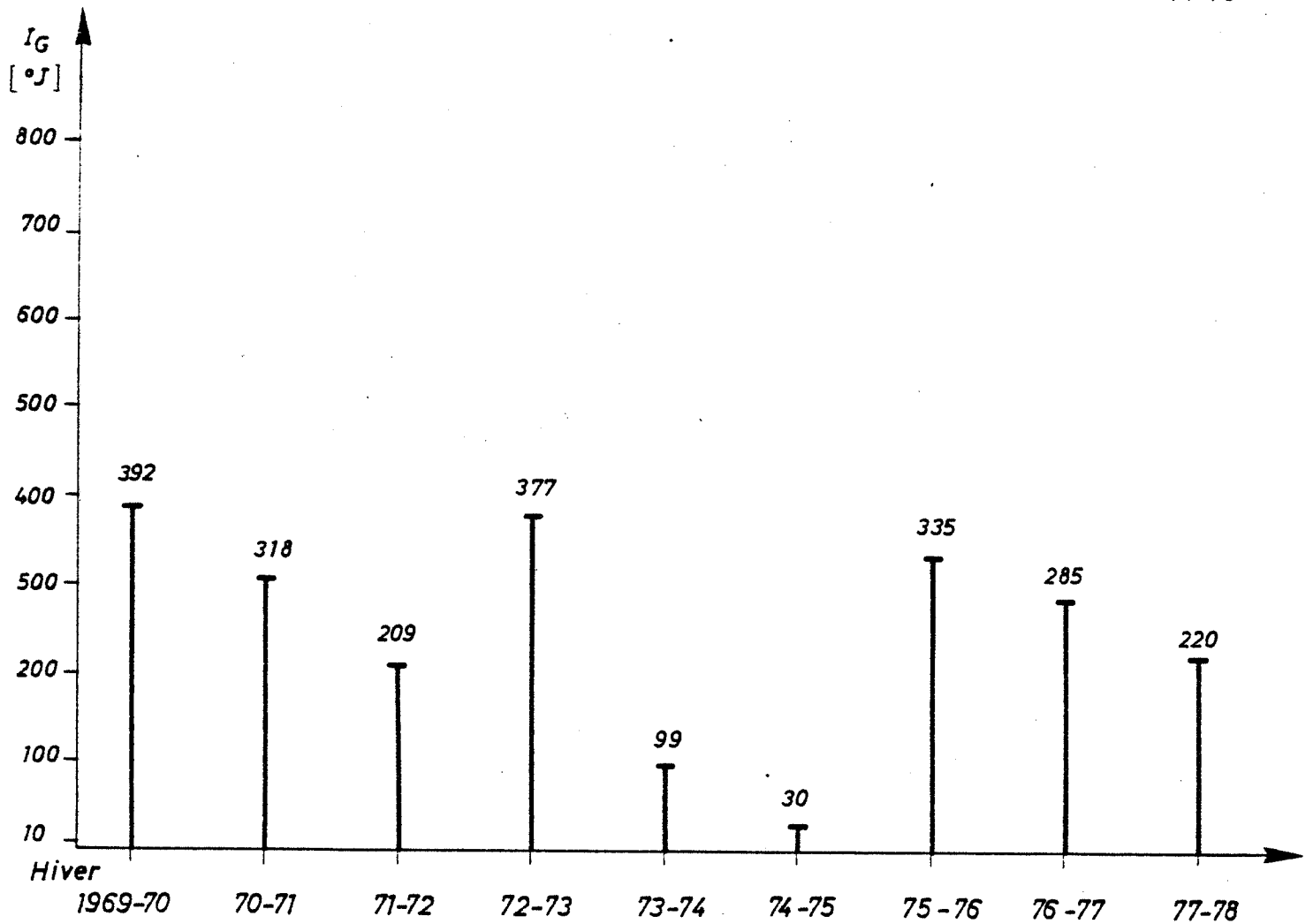
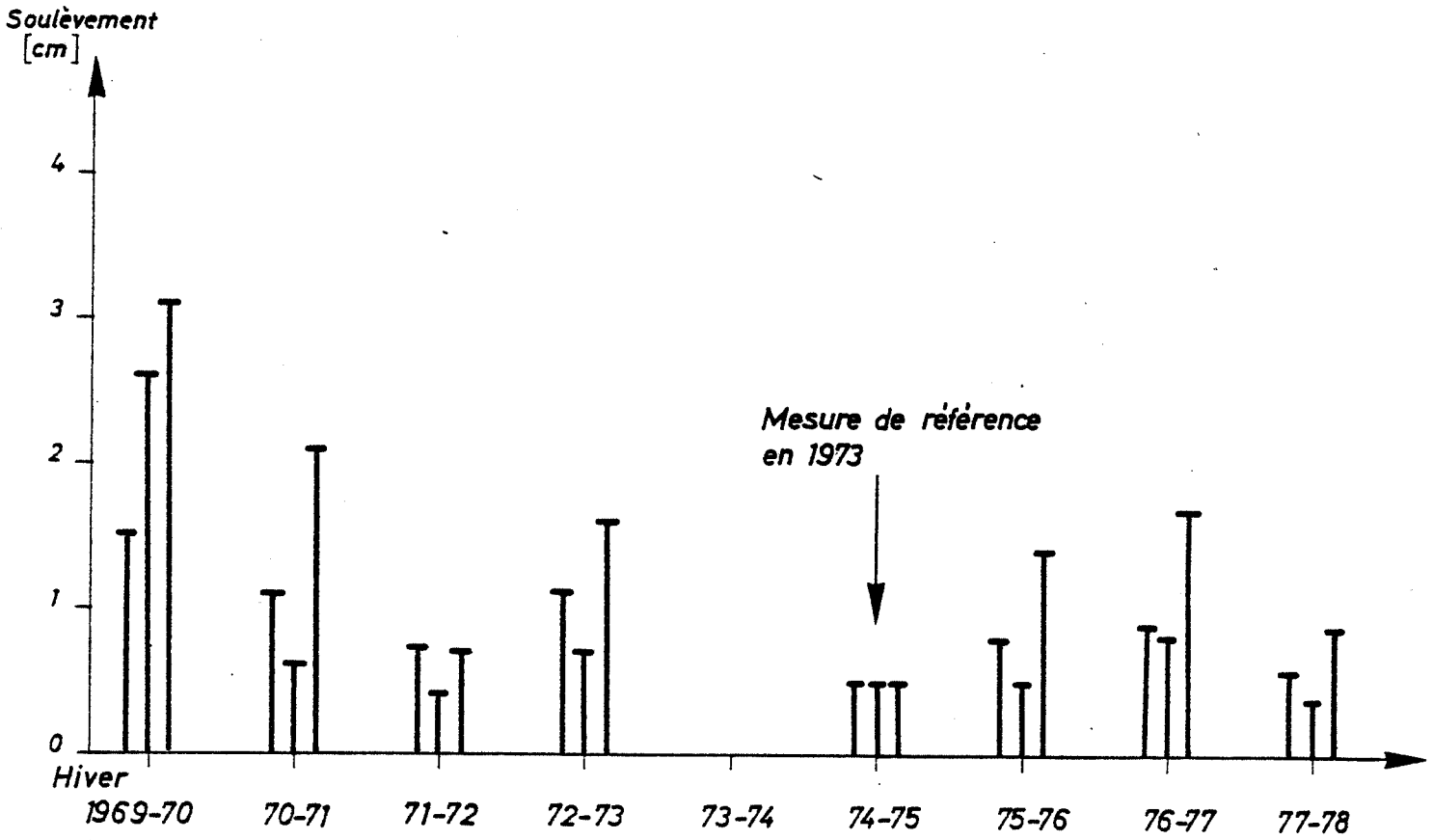
SOULEVEMENT DE LA CHAUSSEE

LA LECHERETTE



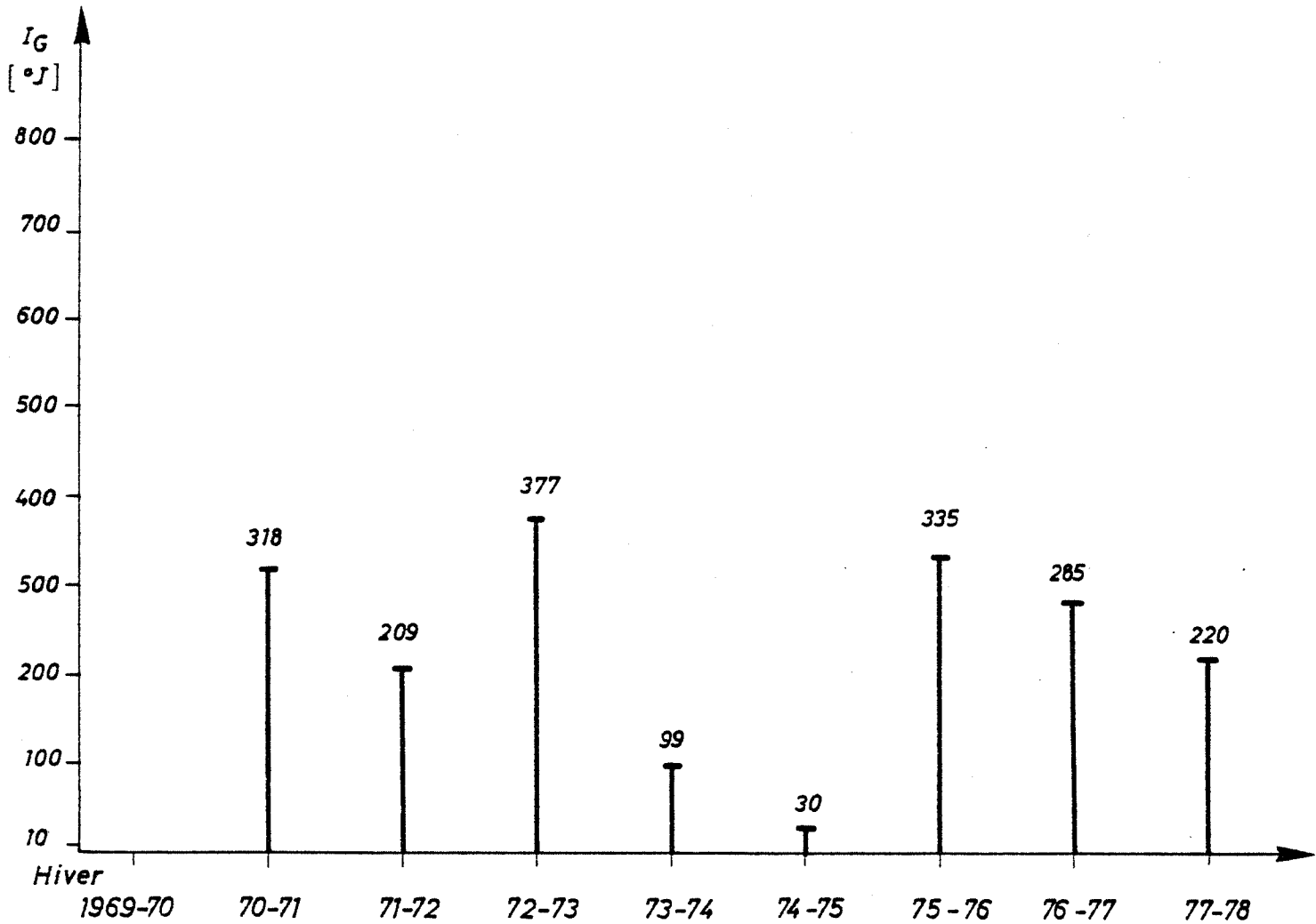
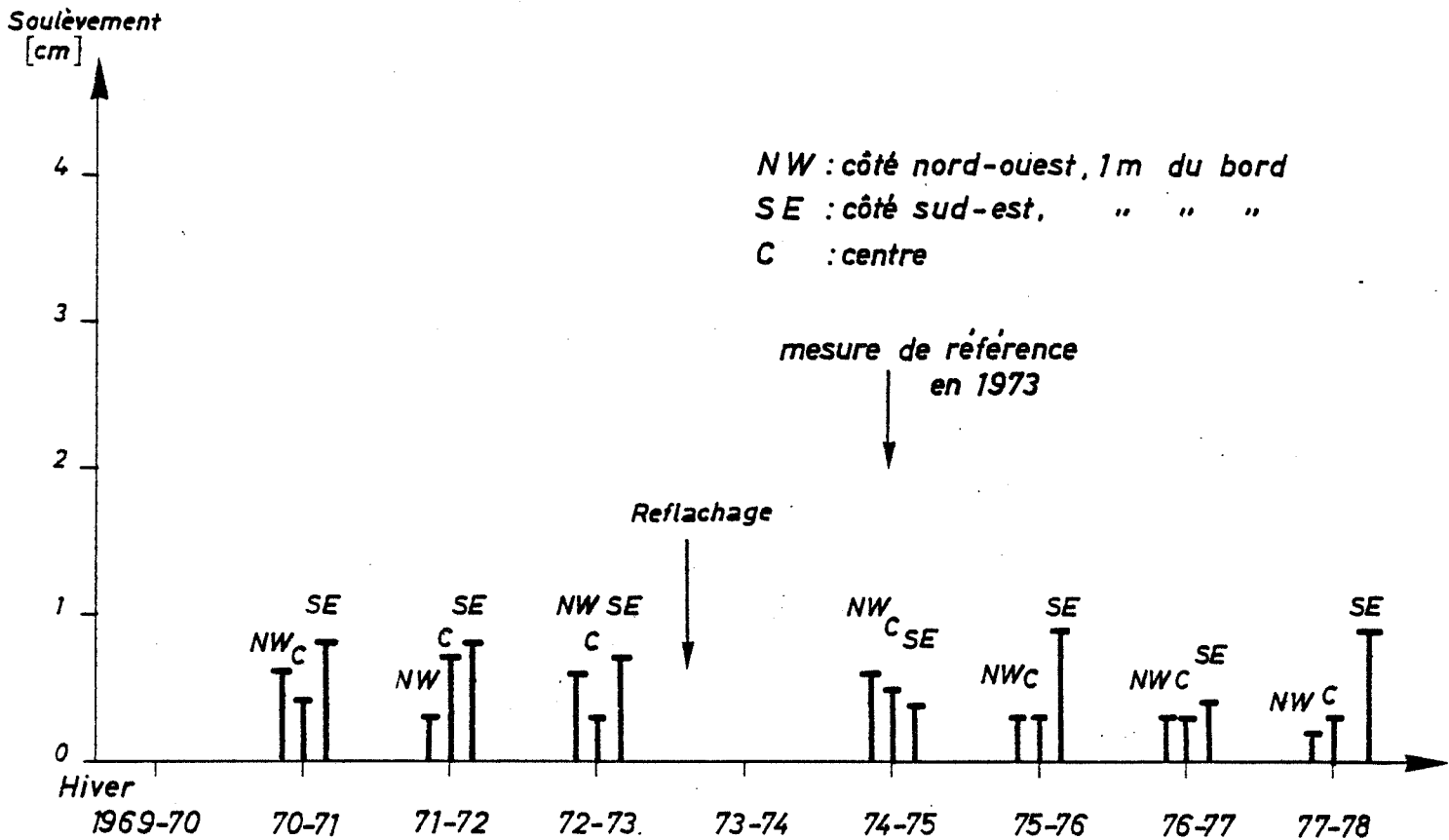
SOULEVEMENT DE LA CHAUSSEE

CONTOURNEMENT DE CHATEAU D'OEX



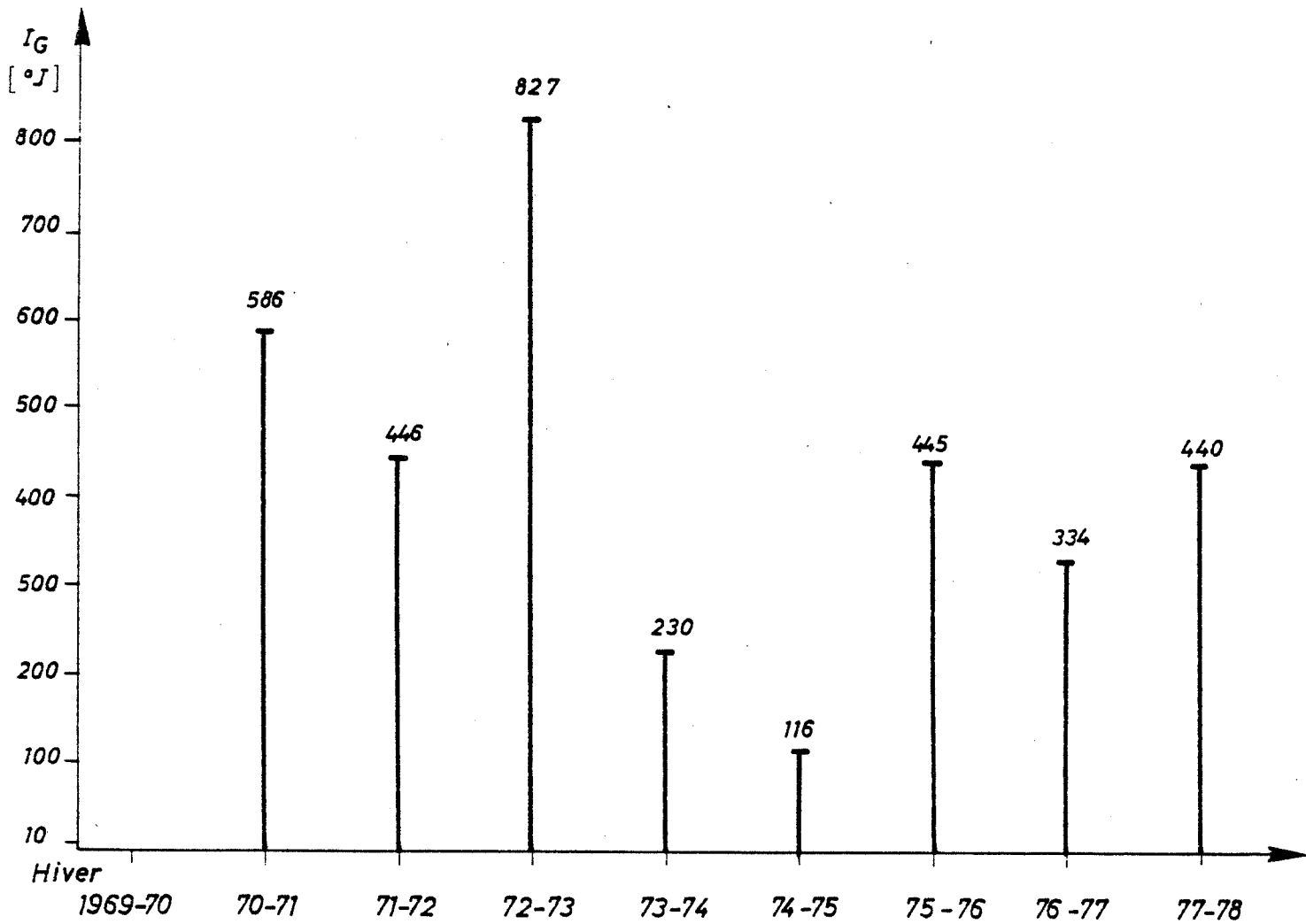
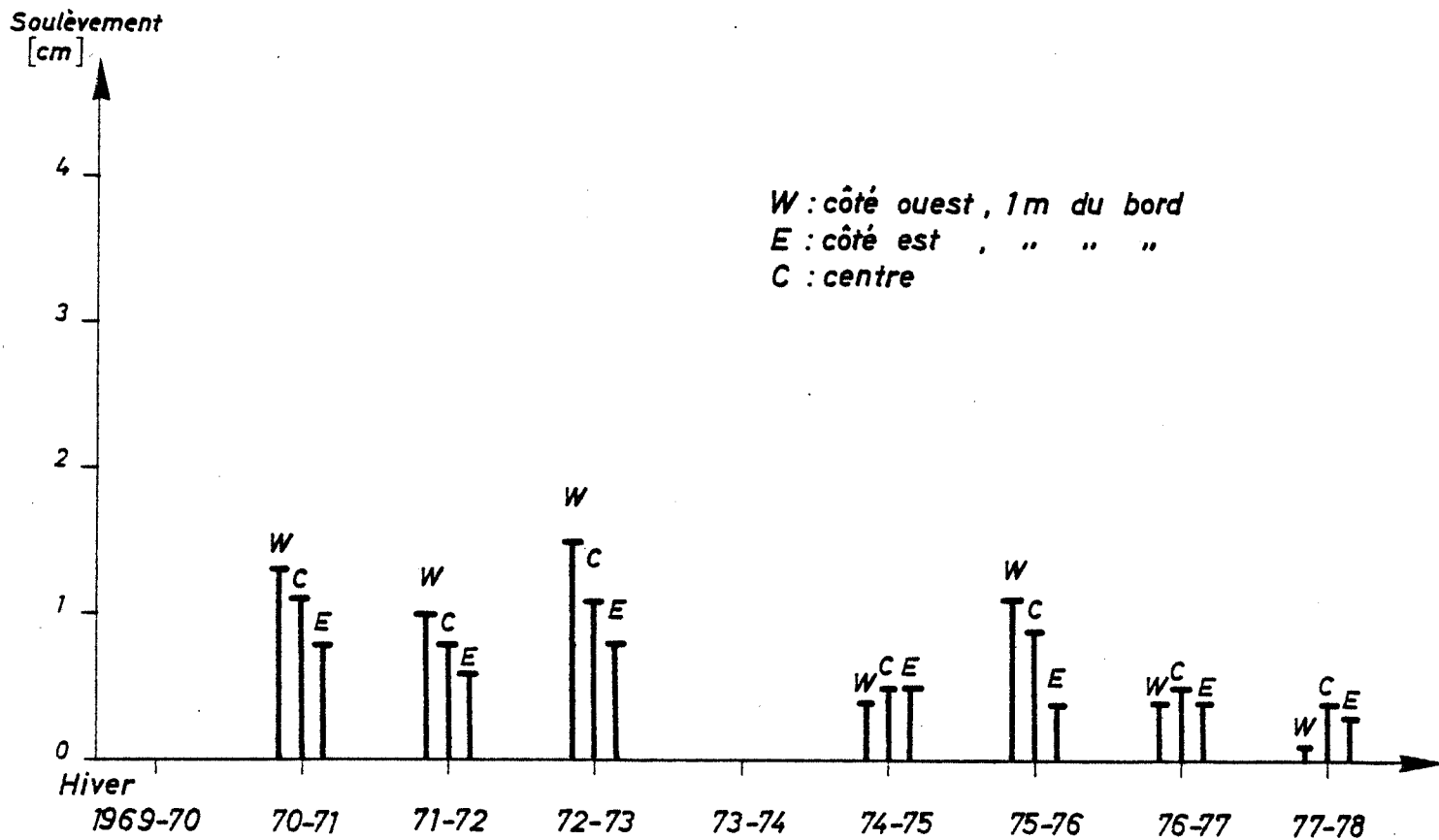
SOULEVEMENT DE LA CHAUSSEE

GRAND-RUE CHATEAU D'OEX



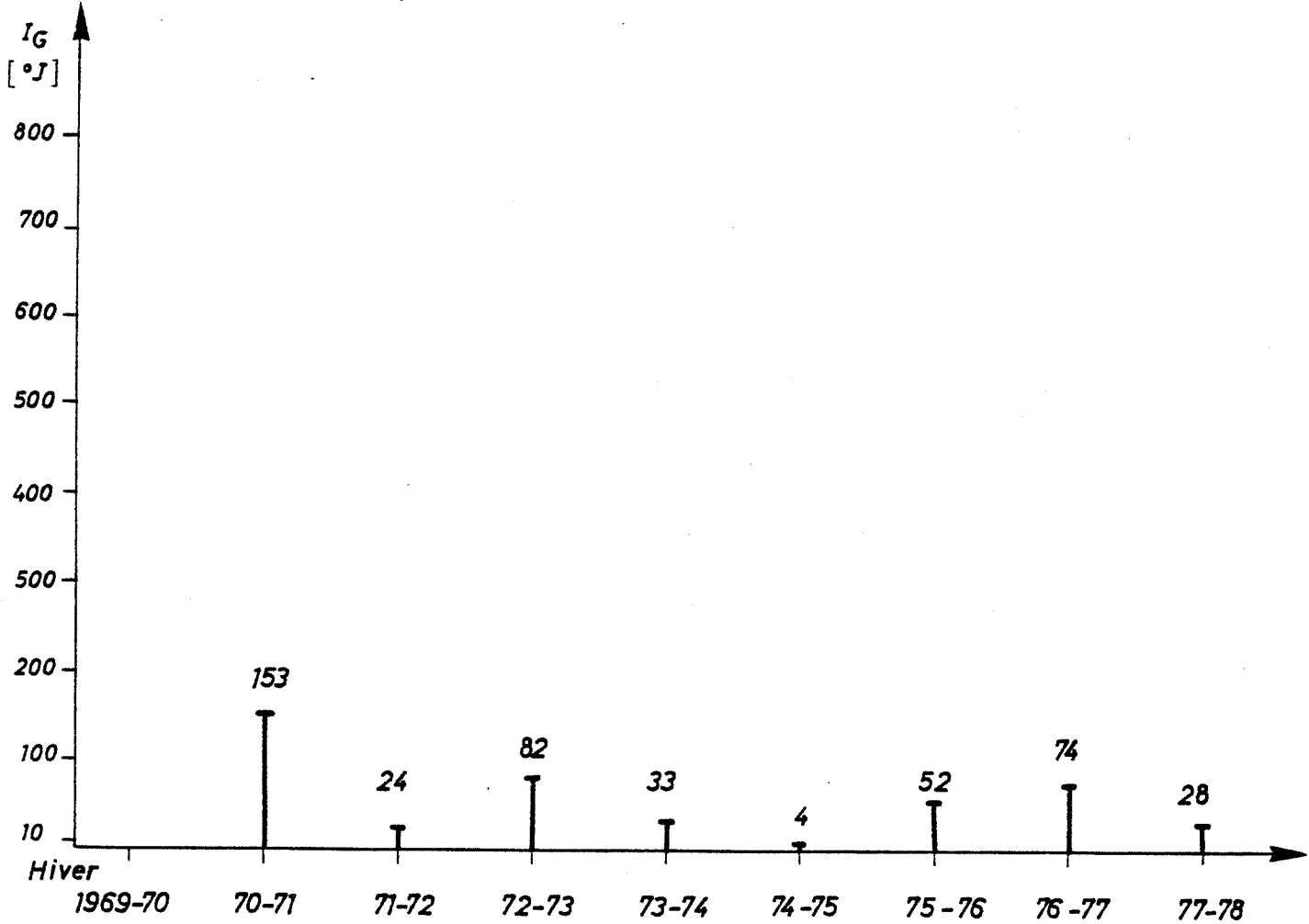
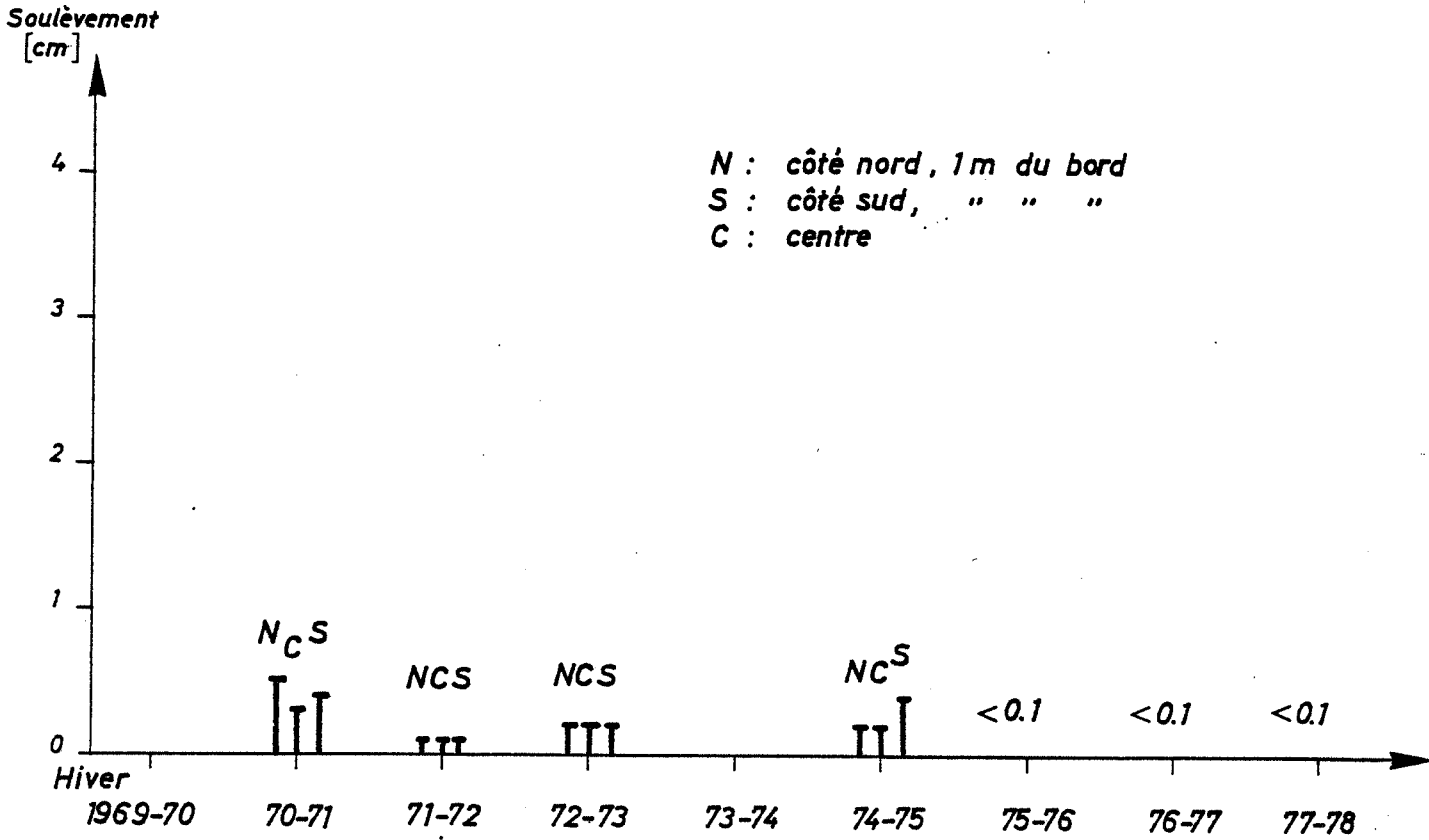
SOULEVEMENT DE LA CHAUSSEE

LA BREVINE



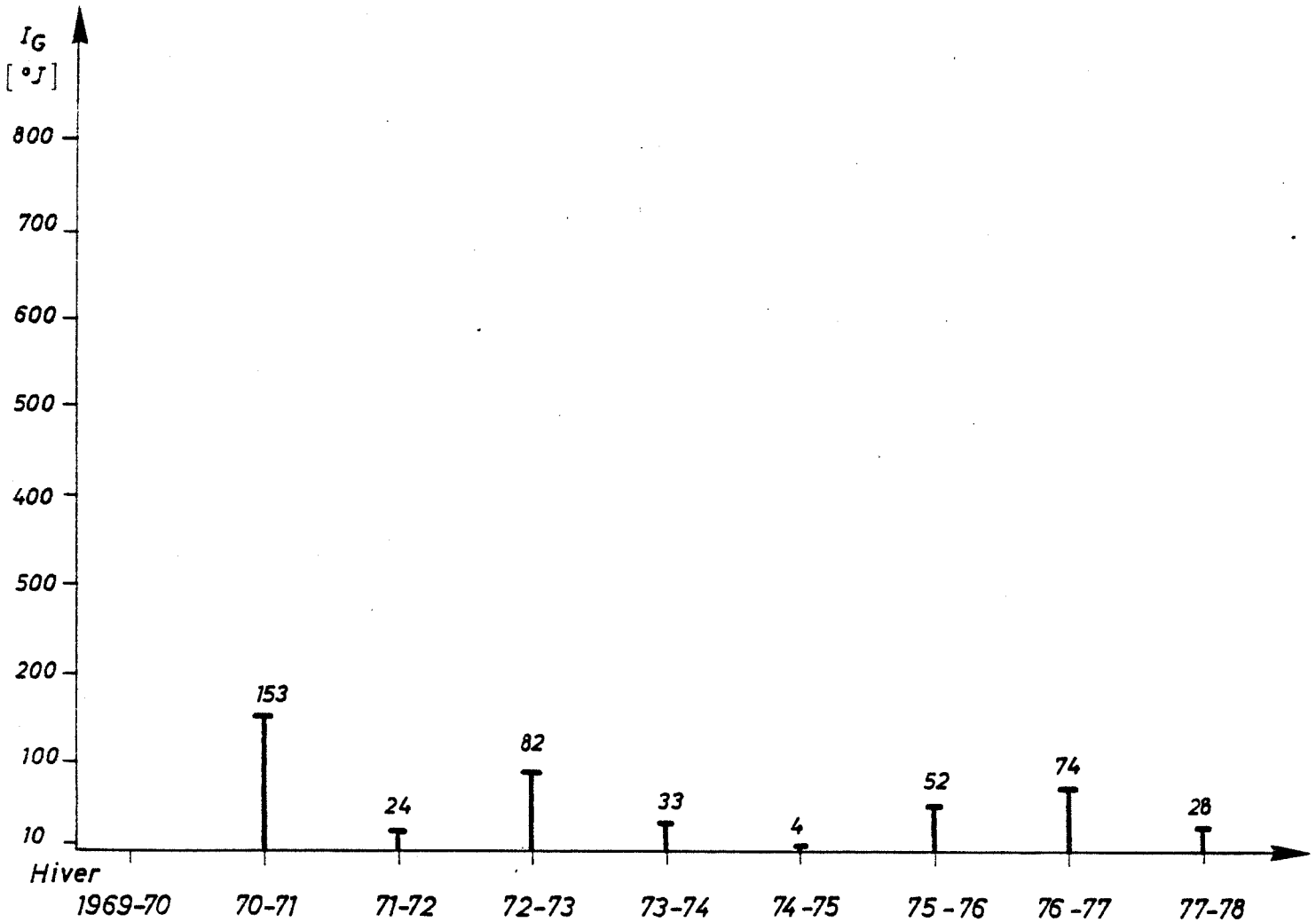
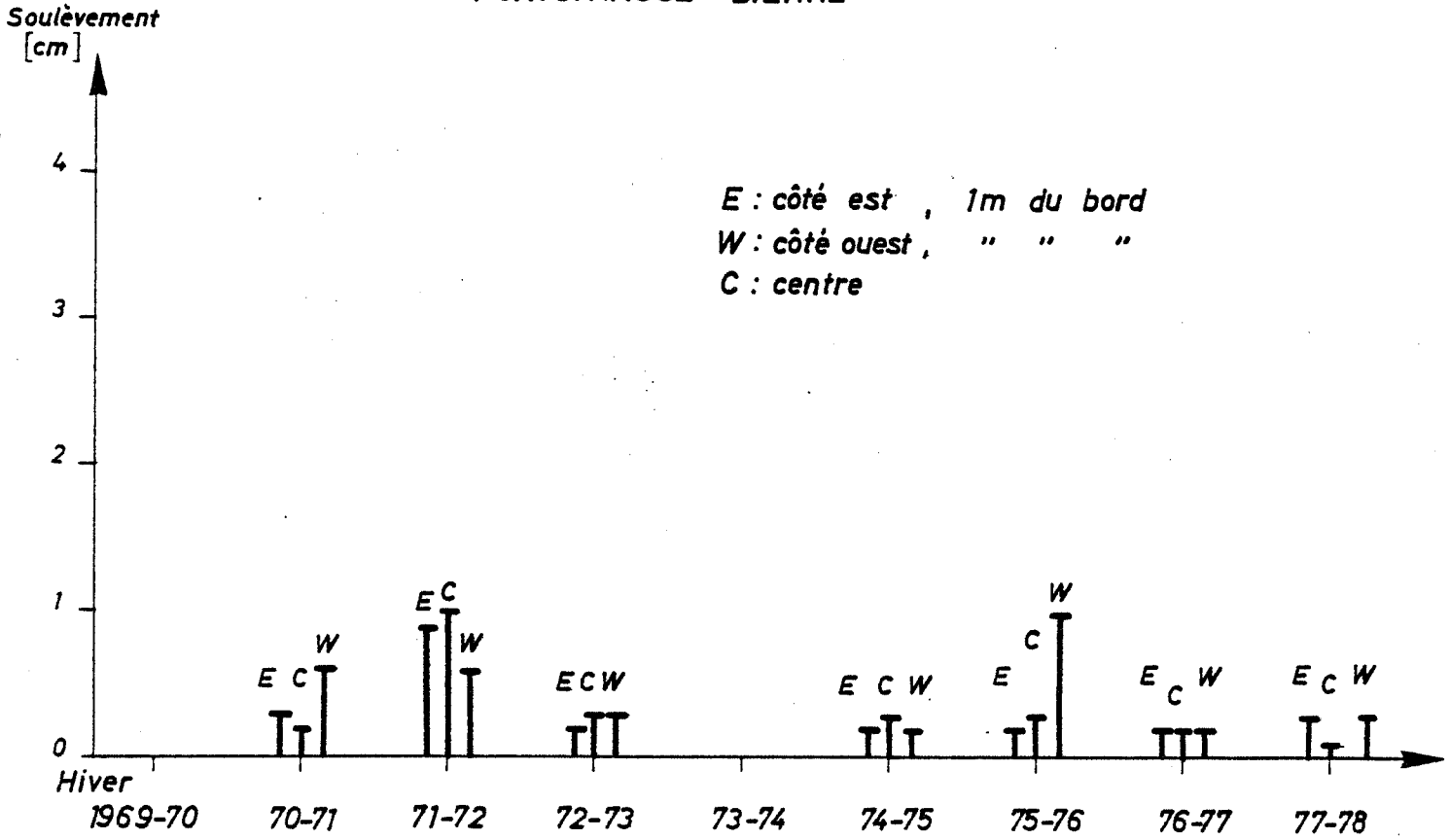
SOULEVEMENT DE LA CHAUSSEE

BIENNE SEMI-AUTOROUTE



SOULEVEMENT DE LA CHAUSSEE

PORTSTRASSE - BIENNE

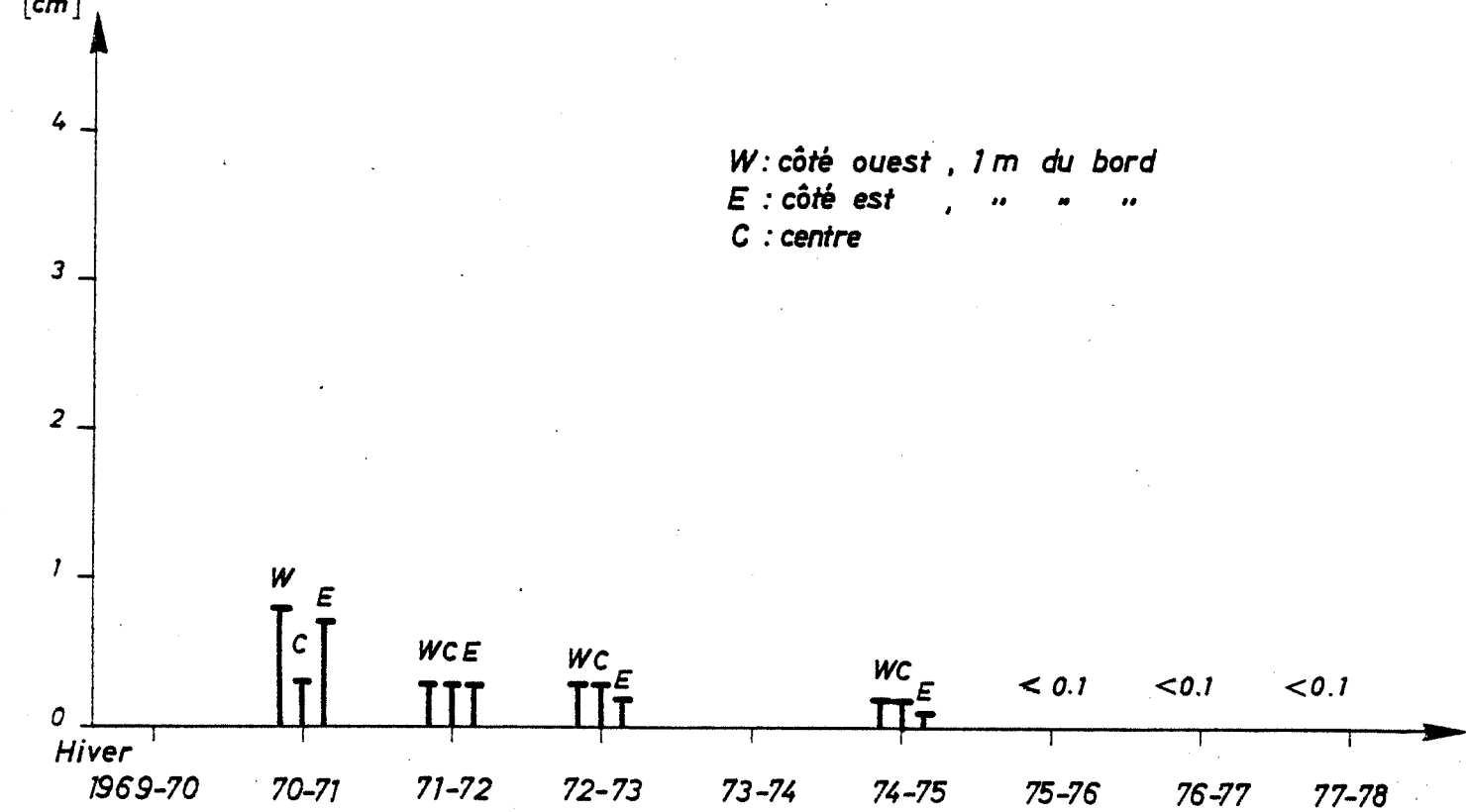


SOULEVEMENT DE LA CHAUSSEE

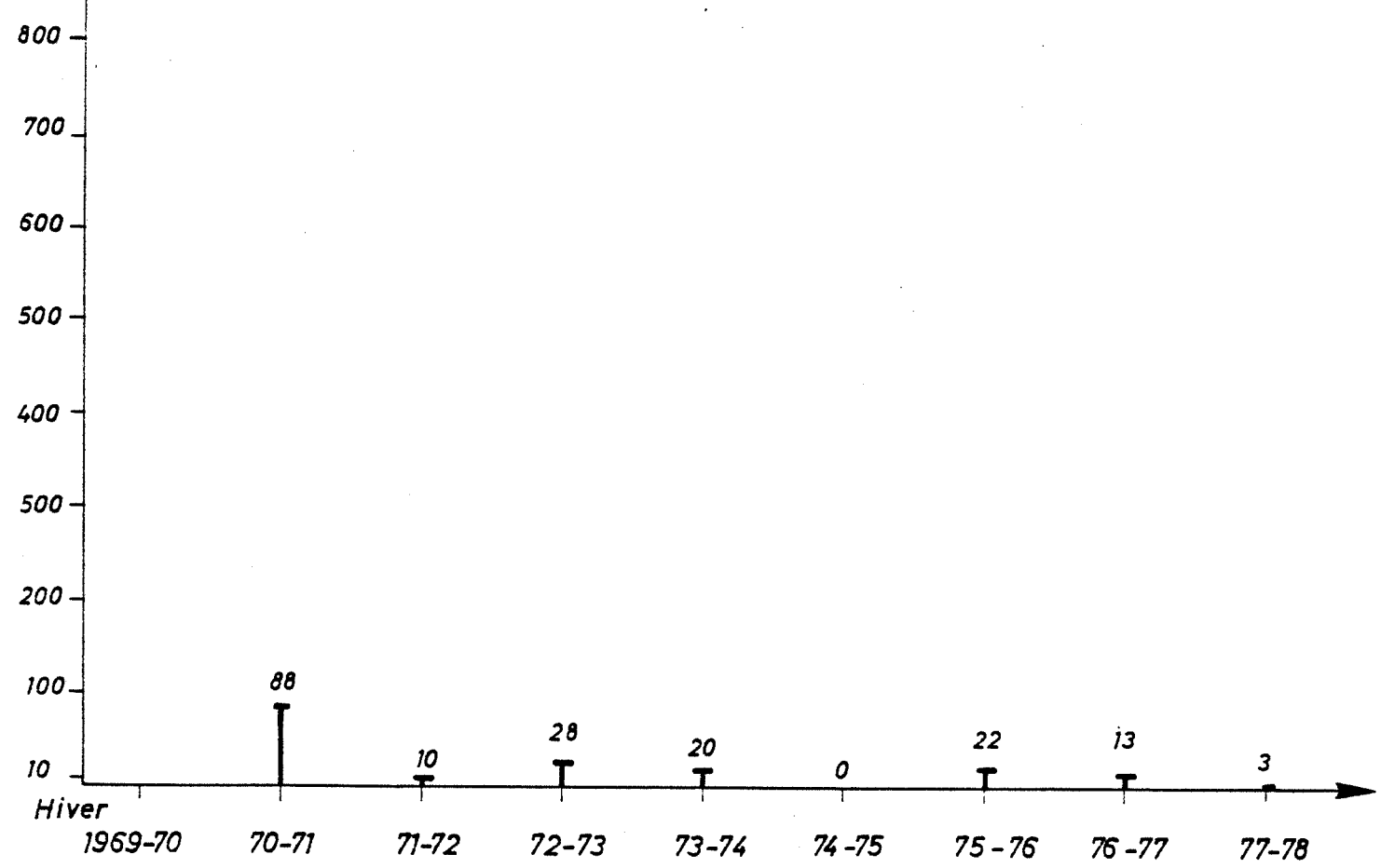
ECUBLENS

Souèvement
[cm]

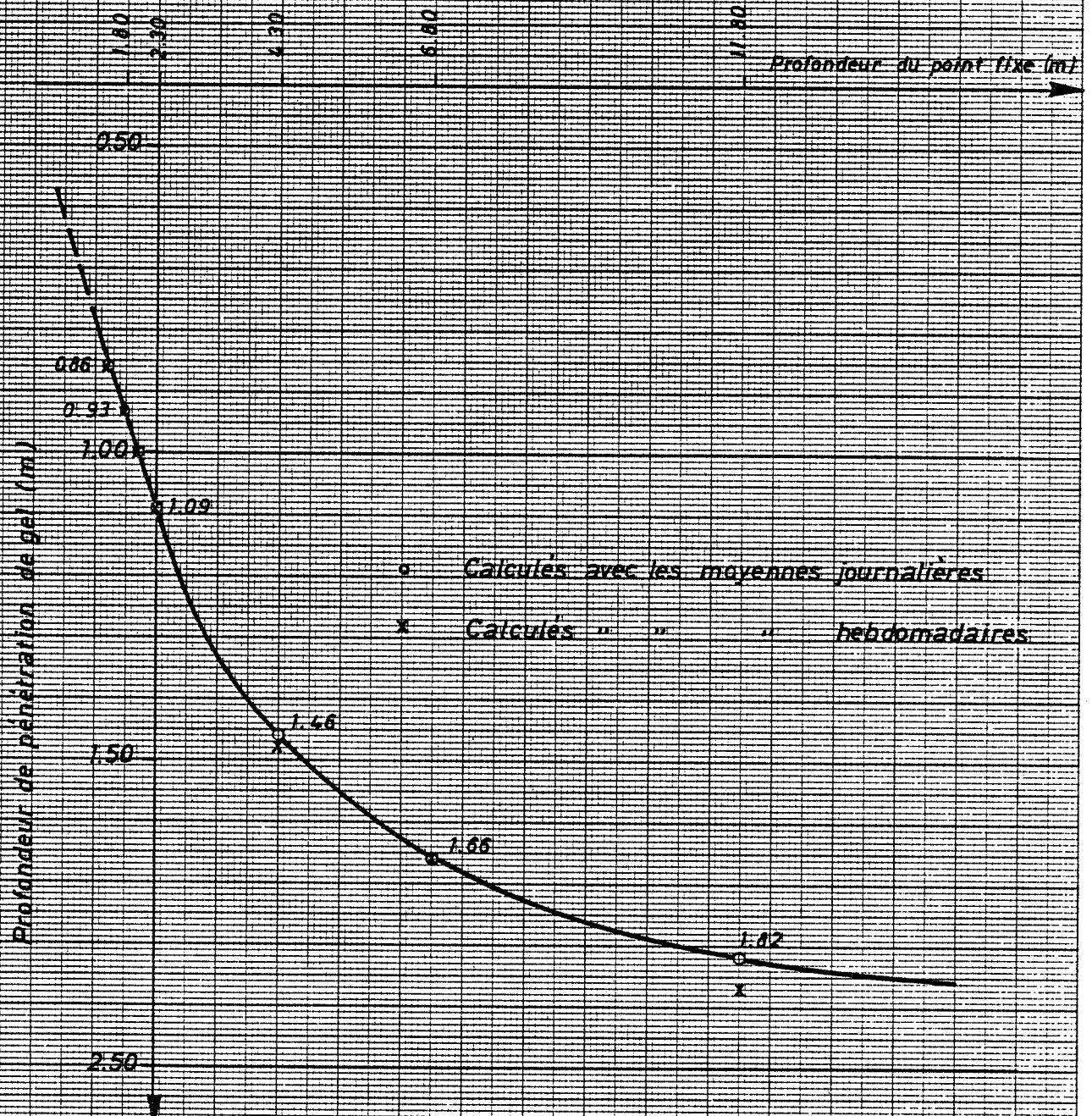
W : côté ouest , 1 m du bord
E : côté est , " " "
C : centre



I_G
[°J]



INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DU POINT FIXE
SUR LA PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL

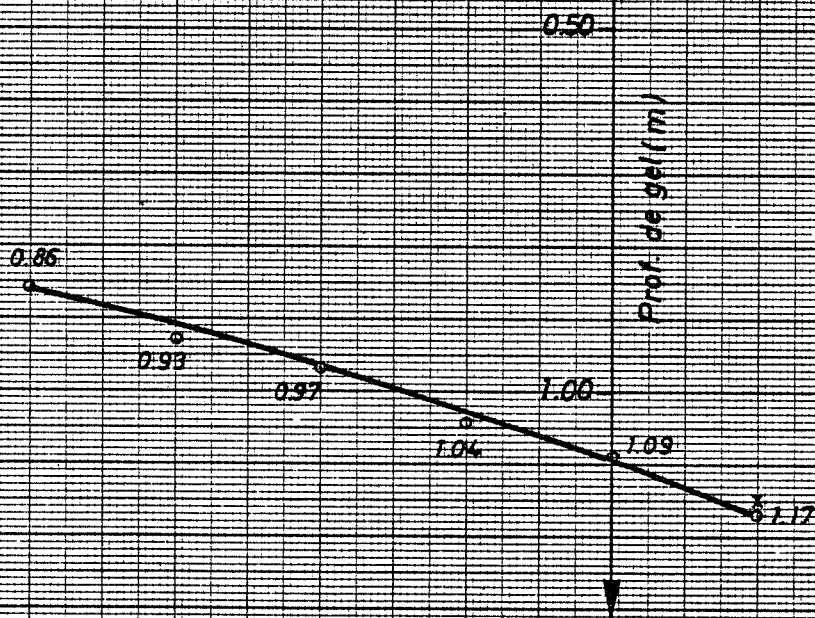
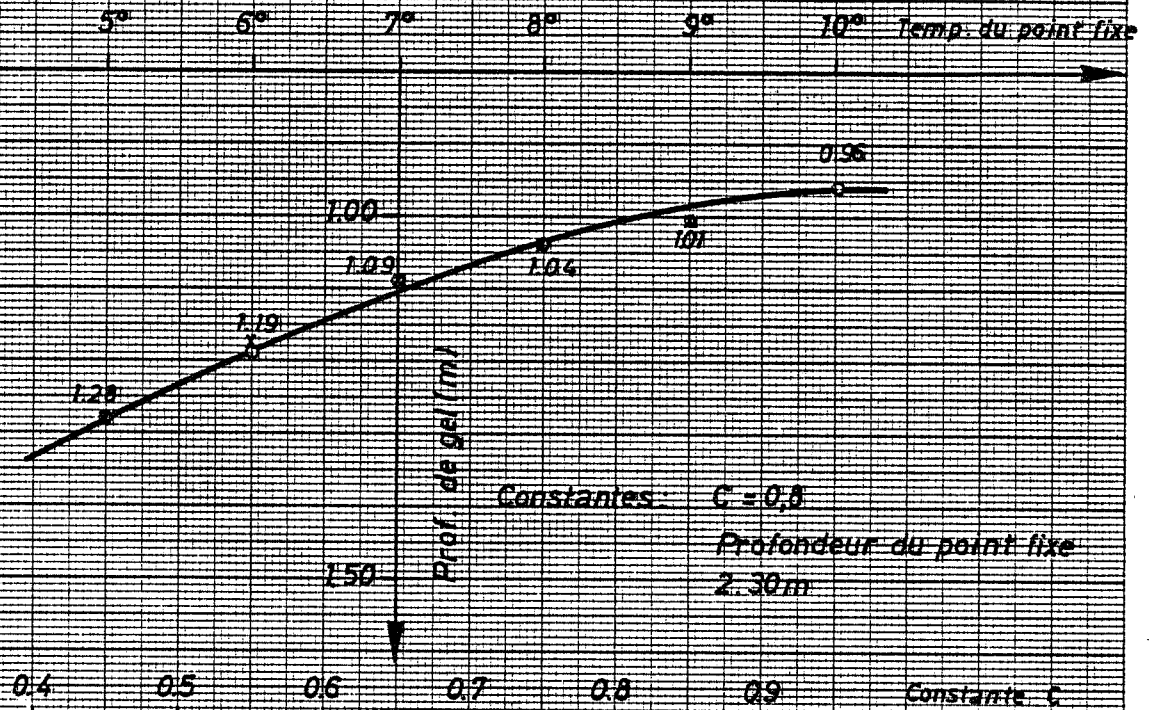


o Calculés avec les moyennes journalières
x Calculés " " " hebdomadaires

Constantes : $C = 0.8$

Température du point fixe 7°

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DU POINT FIXE ET DE LA
CONSTANTE C SUR LA PROFONDEUR DE PENETRATION DU GEL



Constantes : Profondeur du point fixe 2,30 m

Température du " " 7°

o Calculés avec les moyennes journalières

x Calculés " " hebdomadaires

Δh
[cm]

25

20

15

10

EST

15-4-71

16-10-70

Température moyenne journalière de

T [°C]

15

10

5

0

-5

-10

-15

Octobre

Novembre

Décembre

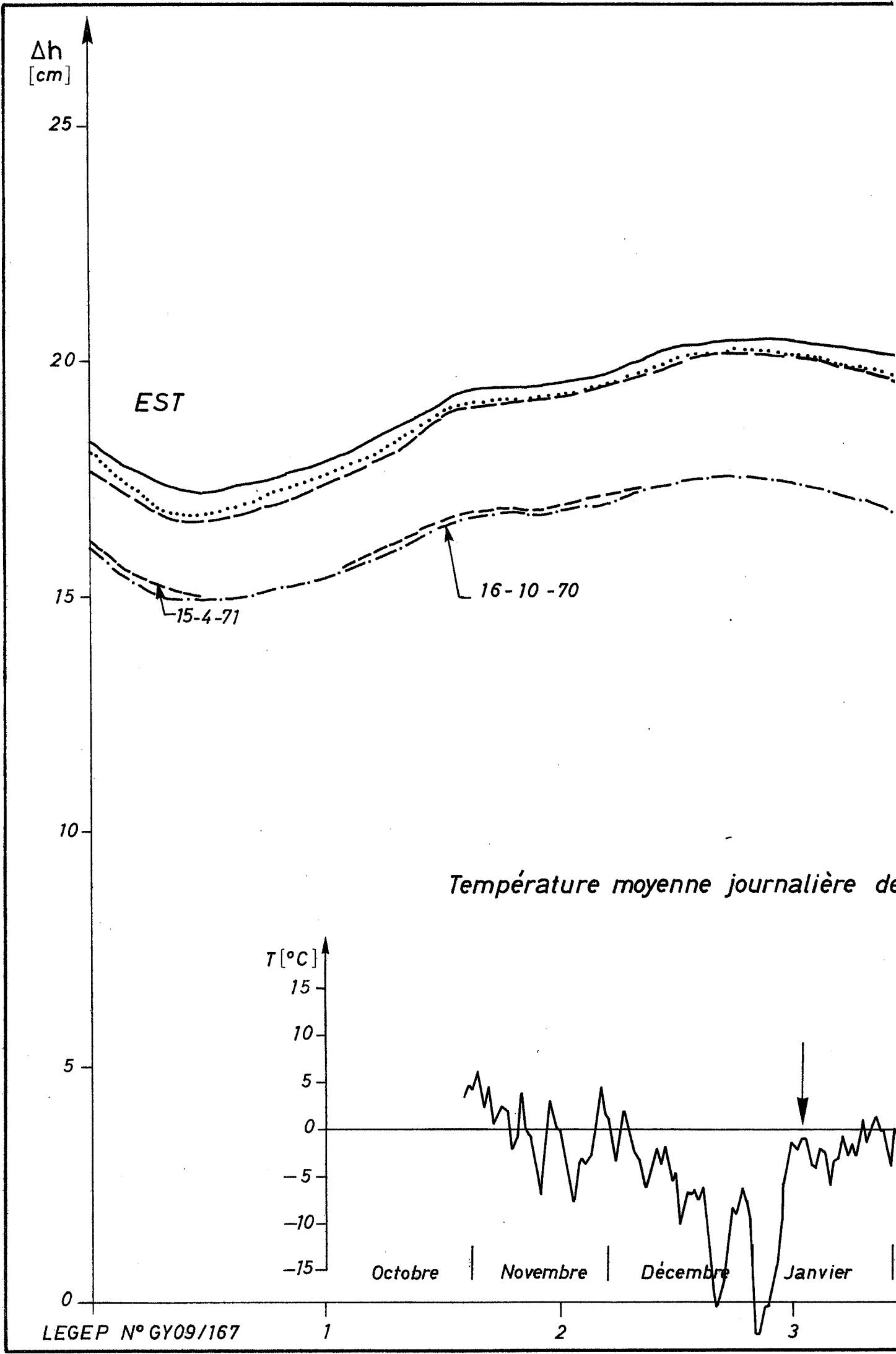
Janvier

LEGEP N° GY09/167

1

2

3

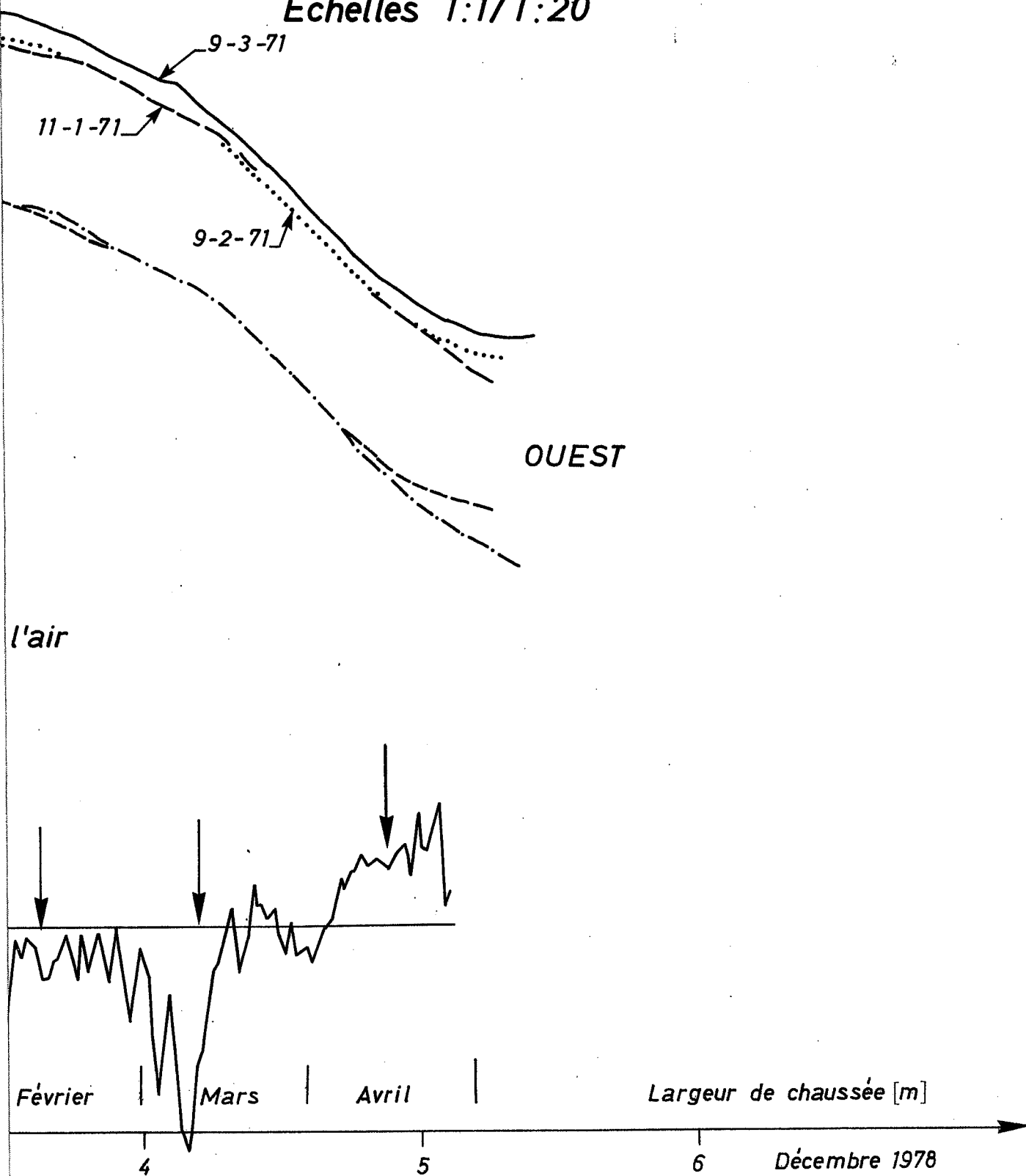


RC 705 LA LECHERETTE

VARIATION DU PROFIL EN TRAVERS
DE LA SURFACE DE ROULEMENT

Octobre 1970 - Avril 1971

Echelles 1:1/1:20



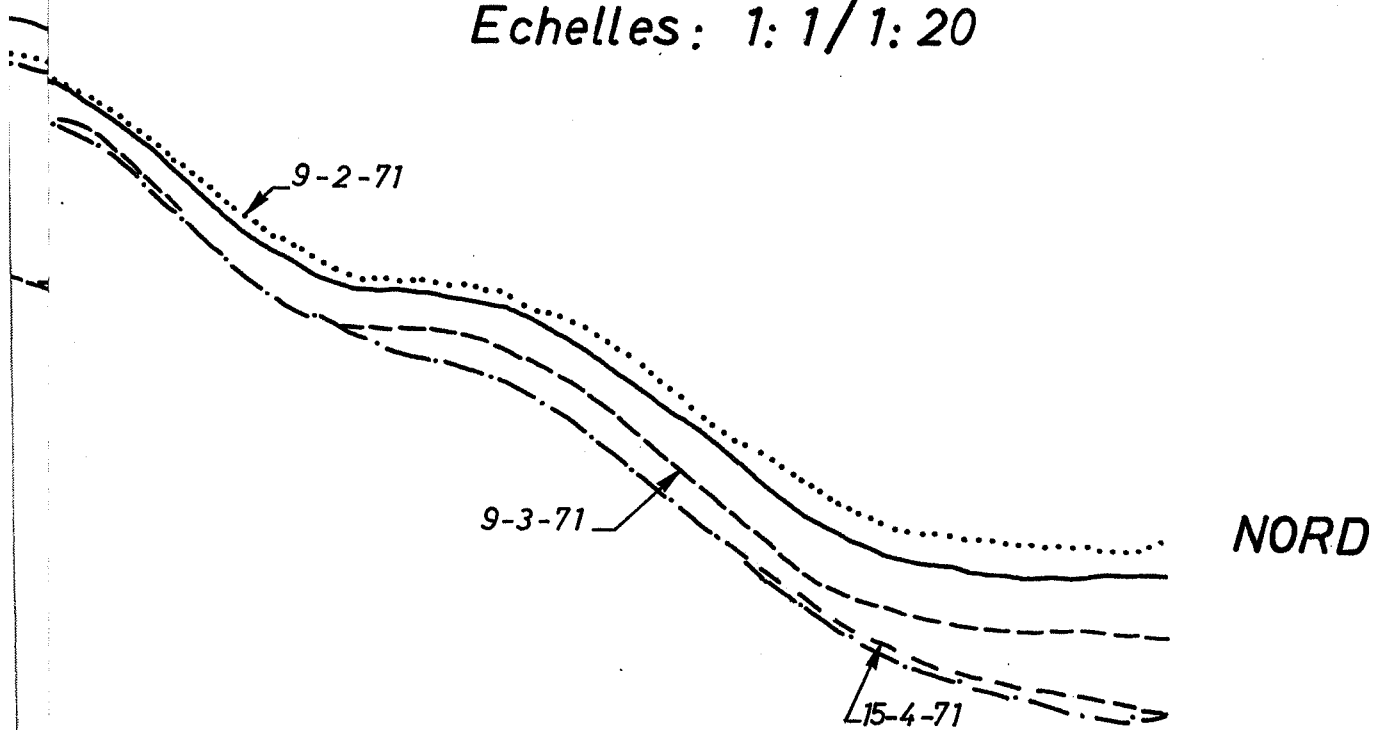
CHATEAU D'OEX

Route de contournement

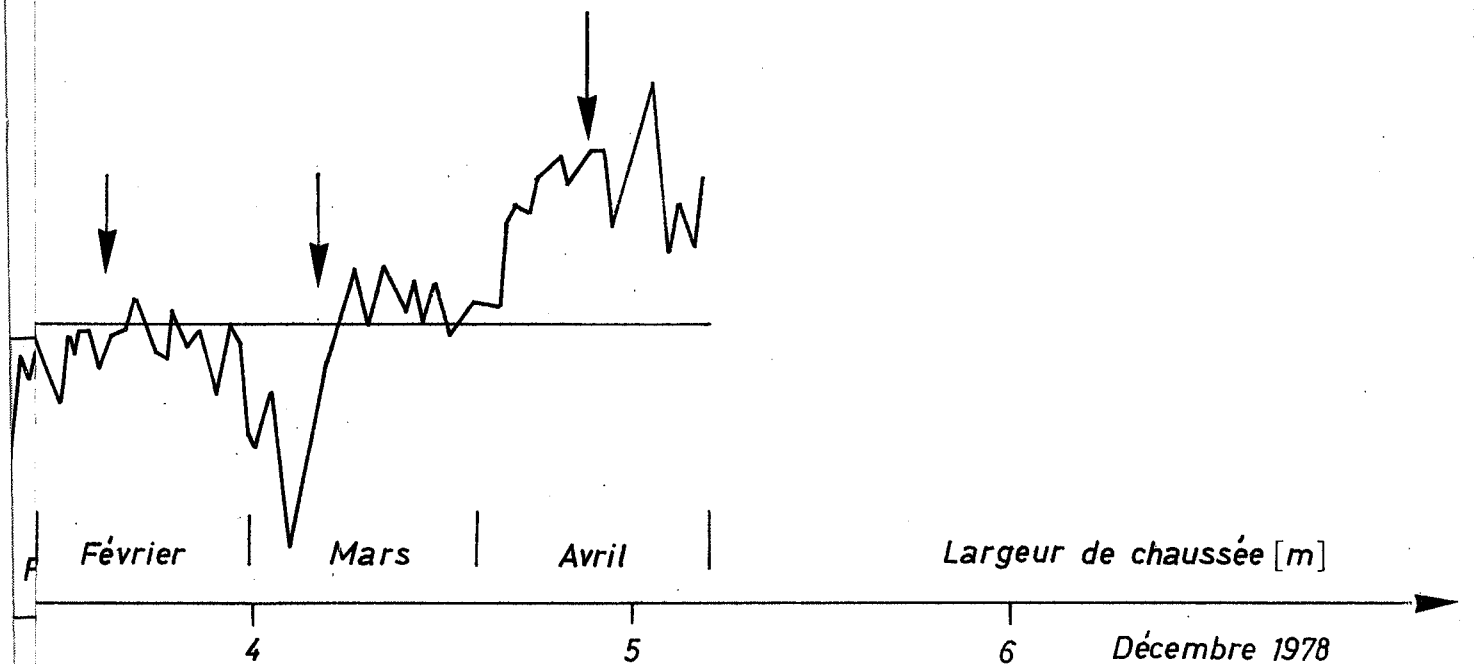
VARIATION DU PROFIL EN TRAVERS
DE LA SURFACE DE ROULEMENT

Octobre 1970 - Avril 1971

Echelles: 1: 1/1: 20



de l'air



Δh
[cm]

25

20

N-OUEST

15

10

Température moyenne journalière d

T [°C]

15

10

5

0

-5

-10

-15

Octobre

Novembre

Décembre

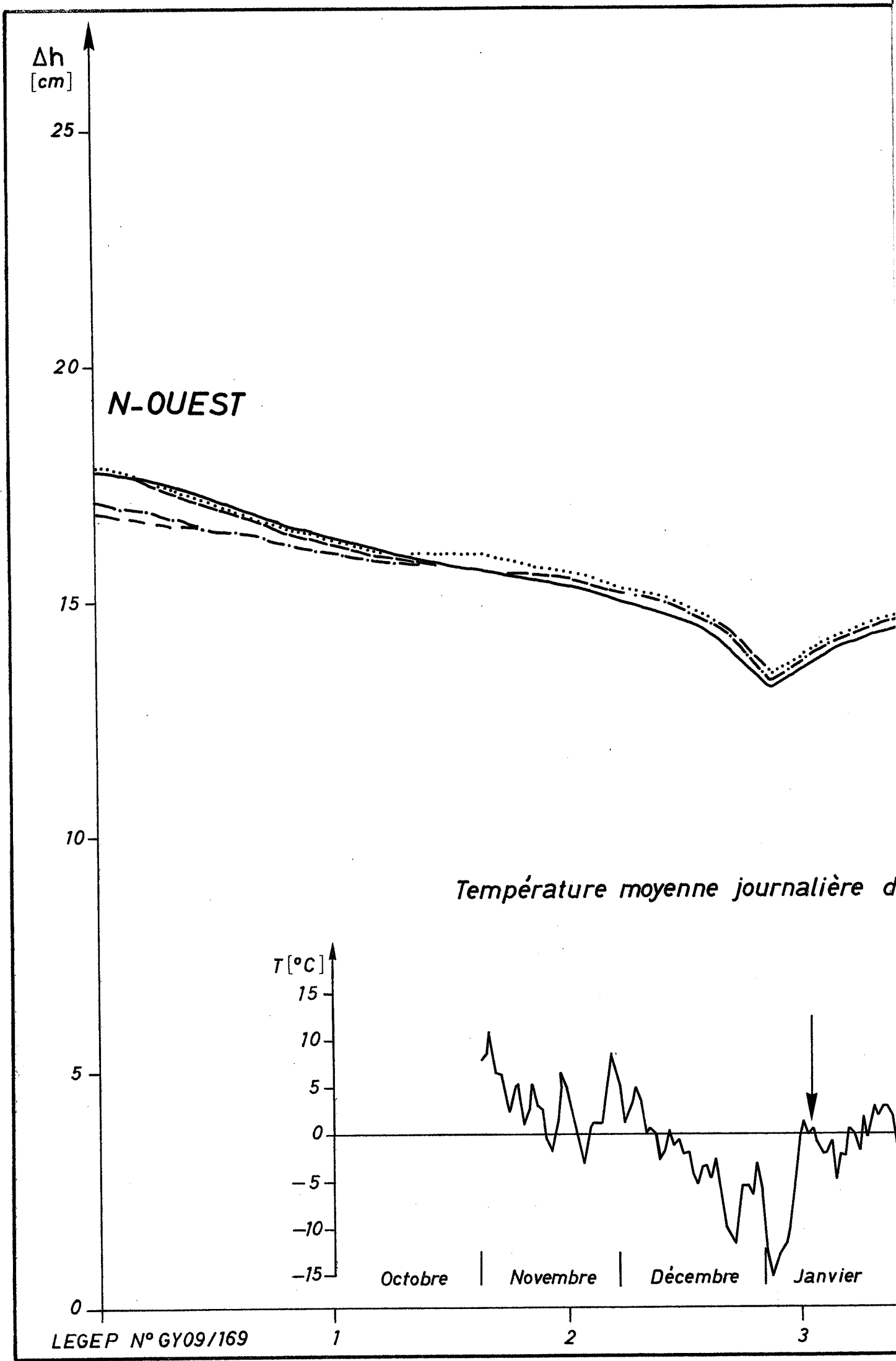
Janvier

LEGEP N° GY09/169

1

2

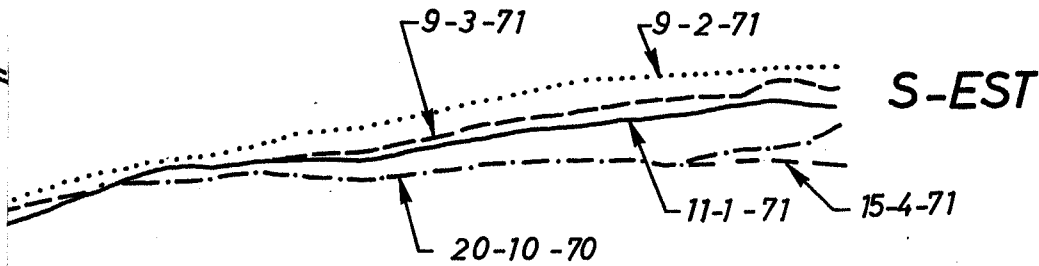
3



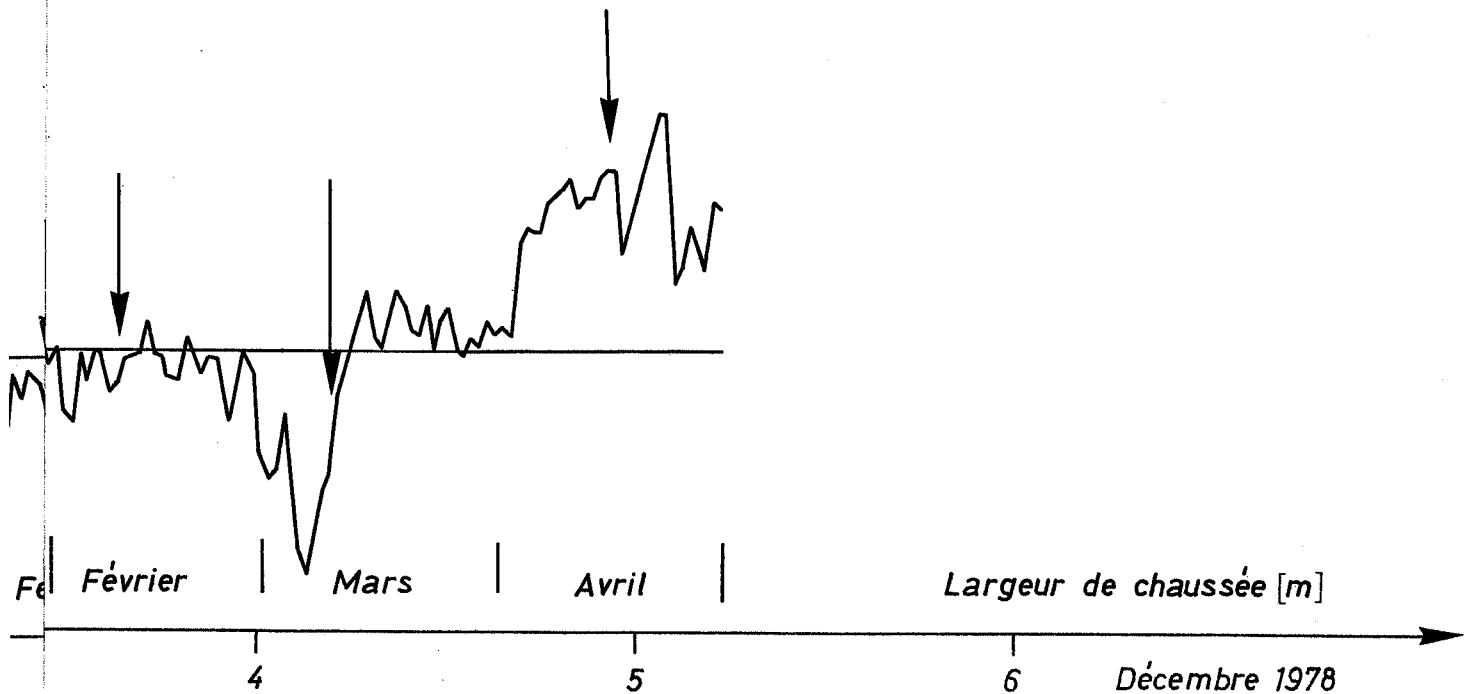
CHATEAU-D'OEX - VILLAGE

VARIATION DU PROFIL EN TRAVERS
DE LA SURFACE DE ROULEMENT
Octobre 1970 - Avril 1971

Echelles : 1:1 / 1:20



à l'air



Décembre 1978

Δh
[cm]

25

20

15

10

5

0

OUEST

22-2-71

7-

29-10-70

22-

Température moyenne journalière d

T [°C]

15

10

5

0

-5

-10

-15

Octobre

Novembre

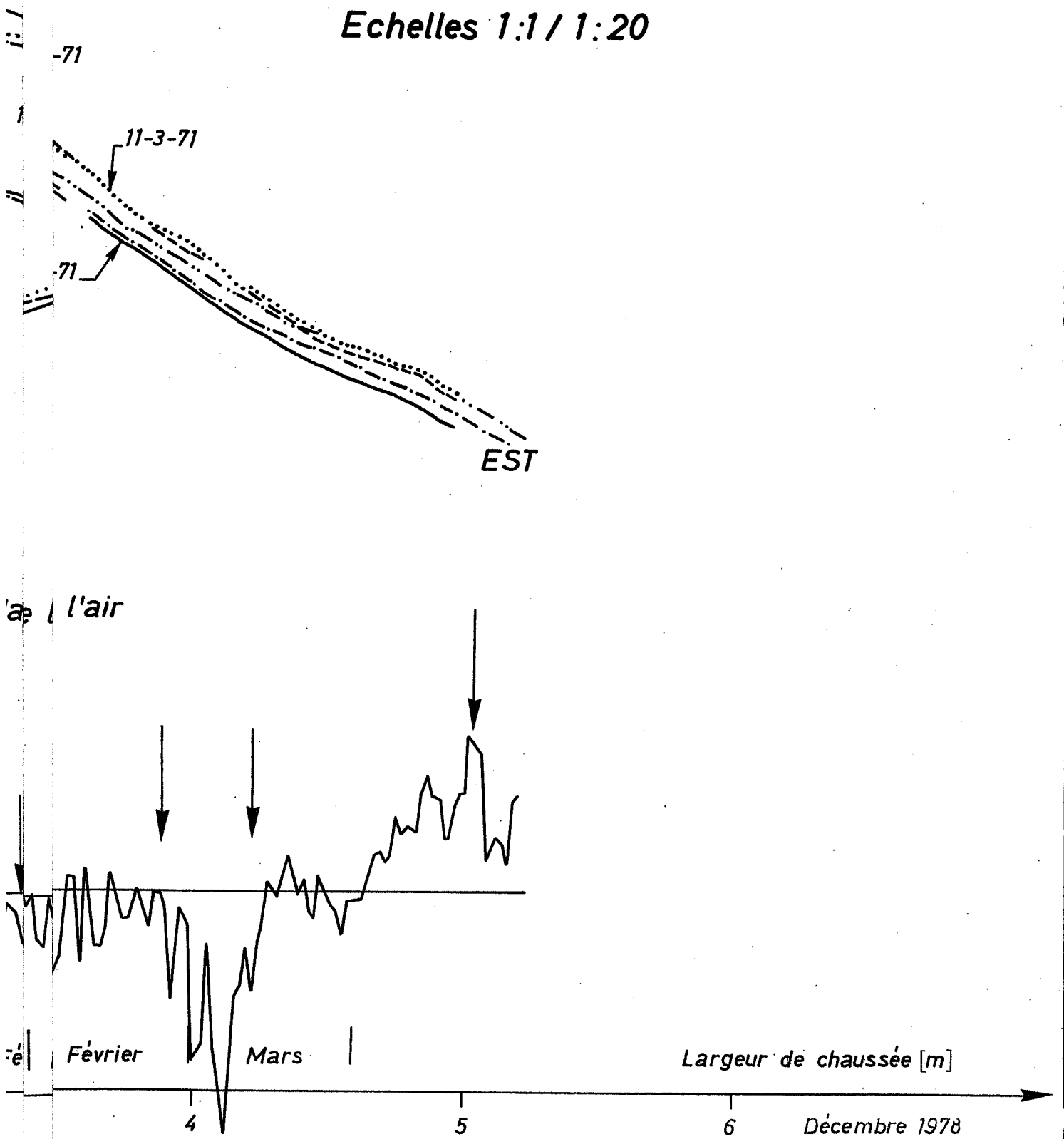
Décembre

Janvier

LA BREVINE

VARIATION DU PROFIL EN TRAVERS
DE LA SURFACE DE ROULEMENT
Octobre 1970 - Avril 1971

Echelles 1:1 / 1:20



Δh

[cm]

25

20

15

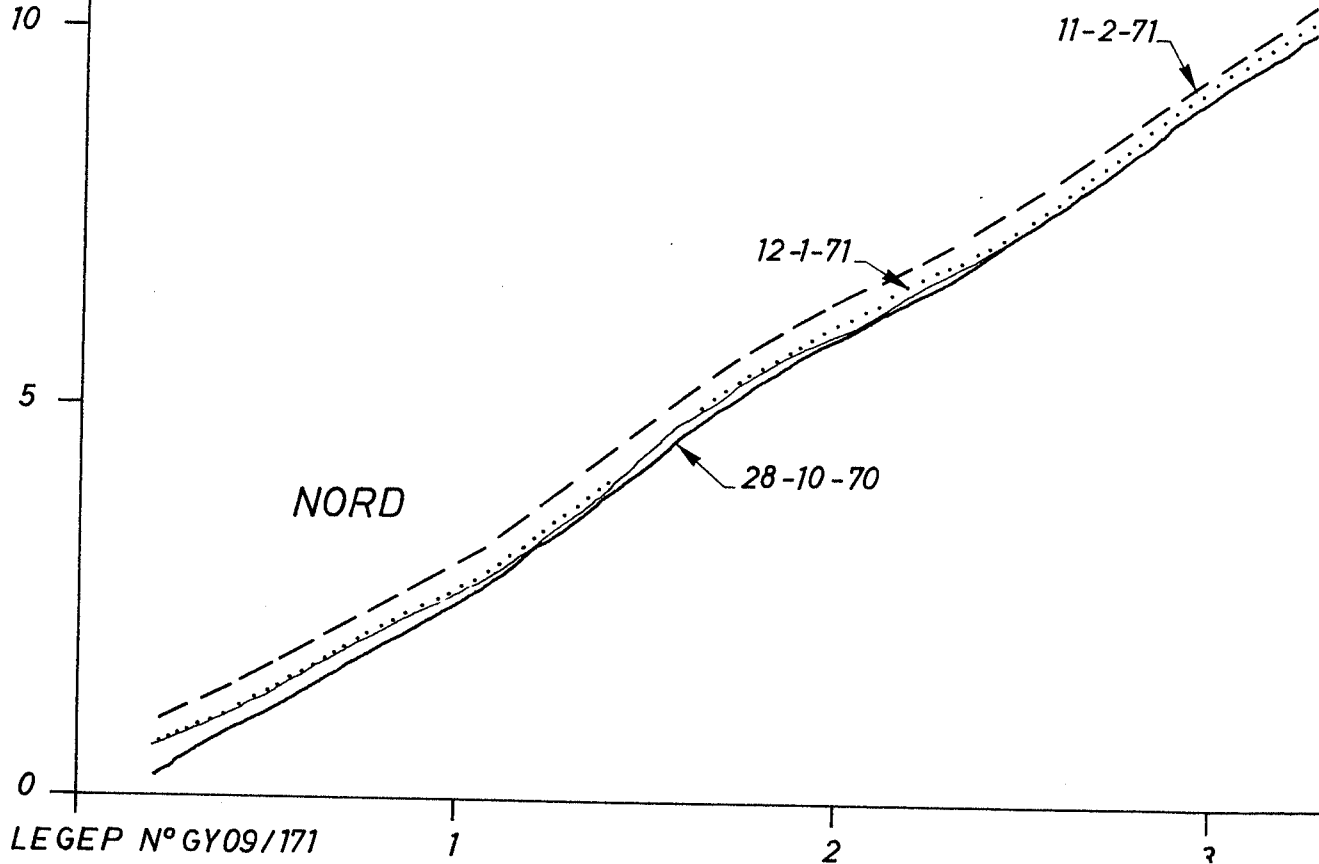
10

5

0

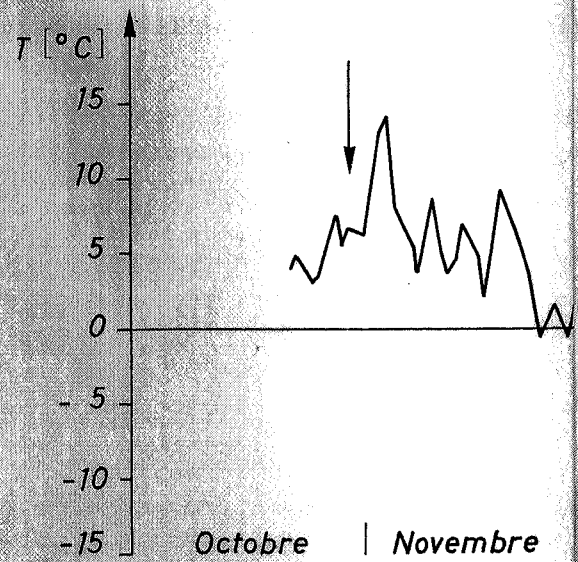
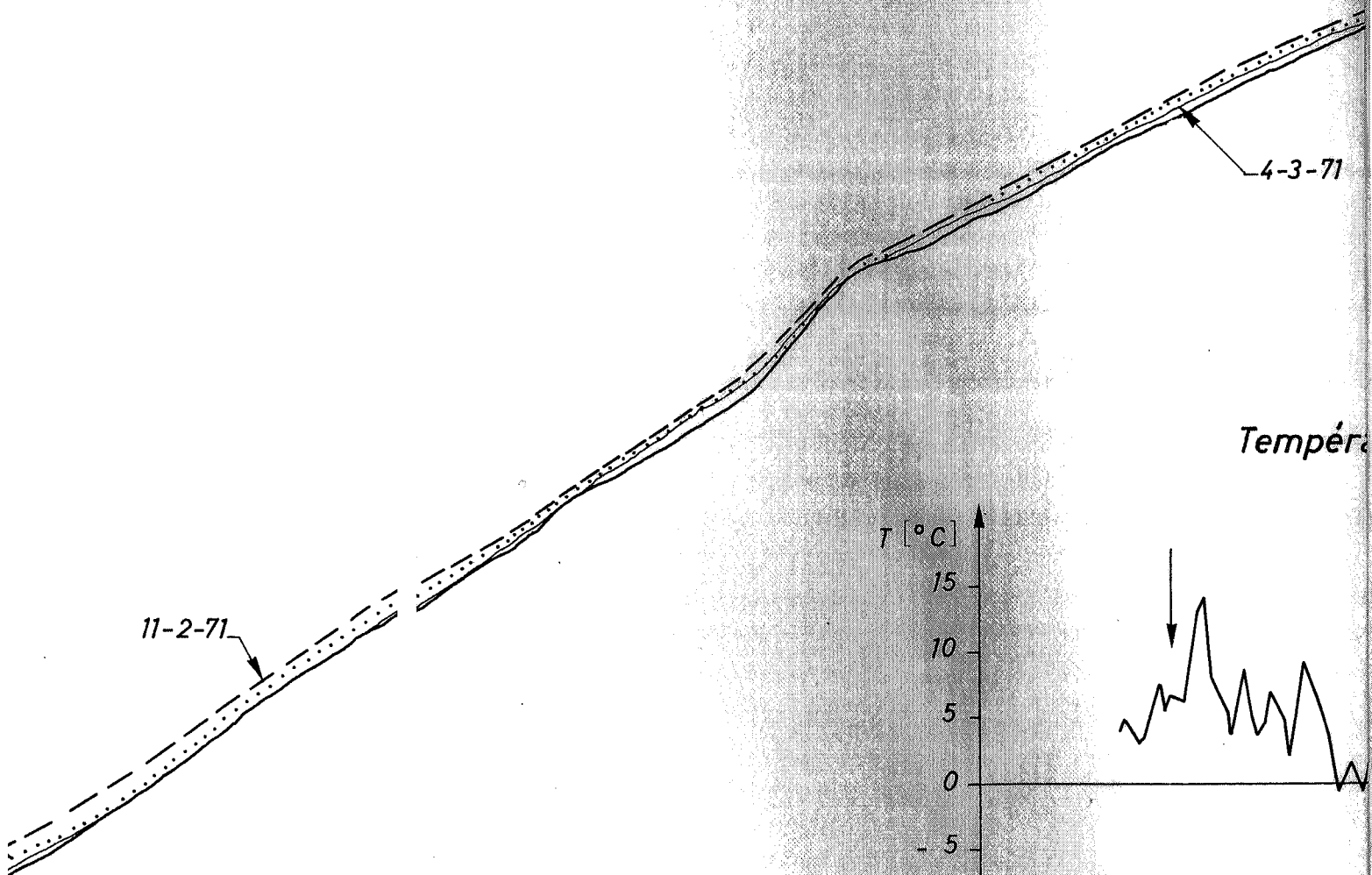
VARIATION DU PROFIL EN TRAV
DE LA SURFACE DE ROULEMEN
Novembre 1970 - Mars 1971

Echelles 1:1 / 1:20



BIENNE SEMI-AUTOROUTE

PROFIL EN TRAVERS
DE ROULEMENT
mars 1971

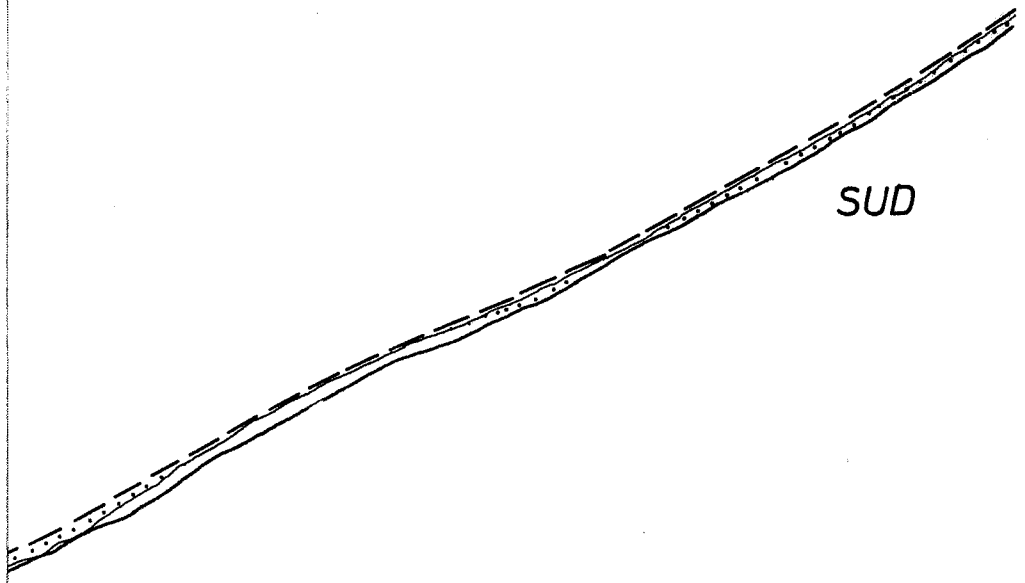


2

4

5

6



ature moyenne journalière de l'air

