RECHERCHE ROUTIERE DE L'OCDE

MESURES DE DEFORMATIONS DANS DES COUCHES HYDROCARBONEES

RAPPORT PREPARE PAR LE GROUPE
D'EXPERTS SCIENTIFIQUES I 2 DE L'OCDE

PAYS PILOTE: SUISSE

ORGANISATION POUR
LA COOPERATION ET
LE DEVELOPPEMENT
ECONOMIQUE (OCDE)

PARIS, FRANCE

1985

OFFICE FEDERAL
DES ROUTES (OFR)

BERNE, SUISSE

LE PROGRAMME DE COOPERATION DANS LE DOMAINE DES RECHERCHES EN MATIERE DE ROUTES ET DE TRANSPORTS ROUTIERS DE L'OCDE

Ce Programme de l'OCDE couvre deux principaux domaines d'activité:

- La coopération internationale en matière de recherche dans les secteurs de la route et des transports routiers afin de fournir un support technologique à la prise de décision des pays Membres sur les problèmes hautement prioritaires. Au cours de la période à venir, ces problèmes clés comprendront : a) la construction, la préservation et la remise en état des infrastructures routières; b) l'élaboration et l'évaluation des programmes intégrés de la sécurité et de la circulation routières; c) la mise au point et l'amélioration de la gestion des systèmes de régulation du trafic routier et de communication avec les conducteurs; d) l'évaluation de la restructuration des systèmes de transport routier urbains et interurbains; et e) le transfert de technologies appropriées aux pays en voie de développement;

- La gestion et l'amélioration du programme d'information et de documentation (DIRR -- Documentation Internationale de Recherche Routière), système coopératif servant de support à l'échange systématique d'informations au niveau mondial sur la littérature scientifique et les programmes de recherche en cours. On vise, plus particulièrement, à renforcer la base de données documentaires et à encourager les pays en voie de développement à l'utiliser de manière plus large.

9.85 400 32880/2

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

RESUME

Le groupe d'experts de l'OCDE "Essais en vraie grandeur des superstructures routières " (pays pilote: la Suisse) à mis sur pied un programme en commun de mesure des déformations au sein de couches d'enrobés hydrocarbonés. Cette expérience a été réalisée en avril 1984 sur la piste d'essai de Nardo (Italie) avec la participation de dix pays. Chaque équipe a utilisé sa technique et son matériel sur une même chaussée construite à cet effet, et chargée par des camions.
Une description des jauges de déformations a été faite et les paramètres de l'essai ont été analysés (caractéristiques de la chaussée et des véhicules de charge, température, etc.). Lors de la comparaison des résultats on a eu recours à des méthodes analytiques liées à des mesures in situ ou en laboratoire pour estimer la valeur effective de la déformation. Compte tenu de la variation de nombreux paramètres on peut dire que les méthodes utilisées sont fiables et qu'une collaboration internationale peut se développer.

ABSTRACT

The OCDE Expert Group on "Full scale pavement tests " (Pilot country: Switzerland) organised a joint programme of strain measurements in bituminous layers. This field experiment was carried out in April 1984 on the test track of Nardo (Italy) with the participation of ten countries. Each of the participating teams used its own technique and its own material on a specially constructed test pavement with truck loadings.
The strain gauges used are described and the test parameters have been analysed (properties of the pavement, of the vehicles, temperatures, etc.). In the comparison of the results analytical methods have been use together with field and laboratory data for the estimation of the true strain value. In view of the variability of a number of parameter the Group considers the methods adopted to be reliable and further international cooperation on this basis as possible.

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

ZUSAMMENFASSUNG

Eine Expertengrouppe der OCDE über "Grossversuche für den Strassenoberbau " hat gemeinsame Versuche zur Besserung von Dehnungen in bituminös gebundenen Schichten organisiert. Die Versuche fanden im April 1984 auf der Versuchspiste von Nardo (Italien) statt mit der Teilnahme von 10 Ländern. Alle Teilnehmer haben auf einem speziell gebauten Versuchsoberbau mit Belastung durch Lastwagen ihre eigenen messtechnischen Verfahren und ihre Geräte gebraucht.
Die verwendeten Messfühler werden beschreiben und verschiedene Versuchsparameter analysiert (Eigenschaften des Oberbaus, der Belastungsfahrzeuge, Temperaturen usw.). Beim Vergleich der Ergebnisse wurden auch analytische Methoden angewendet, um aufgrund von Feld und Laborergebnissen die wahren Dehnungswerte zu schätzen. In Anbetracht der Streuung verschiedener Parameter können die verwendeten Methoden als zuverlässig beurteilt werden. Auf diese Grundlage kann sich eine weitere internationale Zusammenarbeit entwickeln.

Le présent document, ainsi que sa version anglaise

" STRAIN MEASUREMENTS IN BITUMINOUS LAYERS "

peuvent être obtenus sur demande à:

EPFL-LAVOC CH-1015 LAUSANNE

ETHZ-IVT/Hönggerberg CH-8093 ZURICH

Ce rapport est complémentaire à celui rédigé par le Groupe d'experts I2 et publié par l'OCDE sous le titre

" ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DES SUPERSTRUCTURES ROUTIERES "

TABLE DES MATIERES

Chapitre I

INTRODUCTION 9

I.1 Coopération dans les essais en vraie grandeur de superstructures routières 9
I.2 But et conditions générales d'un programme de mesures en commun 10
I.3 Préparation et organisation des mesures 11
I.4 Participants 12
I.4.1 Participants au programme d'essai sur place 12
I.4.2 Participation au financement du programme d'essai 13
I.4.3 Participation au travail d'analyse des résultats 13
I.5 Calendrier 13
I.6 Structure du rapport 14

Chapitre II

TRONCON D'ESSAI ET SUPERSTRUCTURES 15

II.1 Tronçon d'essai de Nardo 15
II.2 Superstructures pour le programme OCDE 15

Chapitre III

MESURE DES DEFORMATIONS 19

III.1 Généralités 19
III.2 Catégories de jauges 20
III.3 Niveau des capteurs 24
III.4 Etat des jauges 26
III.5 Position des jauges 28

Chapitre IV

CONTROLE DE LA STRUCTURE DE LA CHAUSSEE 31

IV.1 Introduction 31
IV.2 Epaisseur des couches 31
IV.3 Caractéristiques des matériaux 34
IV.3.1 Béton bitumineux 34
IV.3.2 Liants 36
IV.3.3 Modules 37
IV.3.3.1 Introduction 37
IV.3.3.2 Modules déterminés par le CRR 37
IV.3.3.3 Modules déterminés par le BAST 40
IV.3.3.4 Conclusions 44

IV.4 Contrôle de l'homogénéité 45
IV.4.1 Essais au déflectomètre à boulet 45
IV.4.1.1 Description de l'essai et résultats 45
IV.4.1.2 Calcul des modules 51
IV.4.2 Mesures au vibreur lourd 53

Chapitre V

CONDITIONS D'ESSAIS 55

V.1 Définitions 55
V.2 Charge: Masse et caractéristiques géométriques 55
V.3 Vitesse des camions 57
V.4 Distribution transversale des passages de charge 60
V.5 Températures 62

Chapitre VI

RESULTATS DES MESURES 65

VI.1 Analyse des résultats 65
VI.1.1 Variation de la déformation mesurée en fonction du numéro de passages 65
VI.1.2 Variation de la déformation maximale enregistrée en fonction de la température du revêtement 66
VI.1.3 Variation de la déformation à température constante . 72
VI.1.4 Corrélation entre les températures mesurées 73
VI.1.5 Remarques sur la première phase de l'analyse 74
VI.1.6 Résultats des jauges BISON 75
VI.2 Analyse complémentaire des résultats 75
VI.2.1 Correction des résultats en fonction d'une température standard du revêtement..... 75
VI.2.2 Variation de la déformation en fonction du type de jauge 76
VI.2.3 Influence du choix de la température standard sur les déformations calculées 88
VI.3 Conclusions 89

Chapitre VII

INTERPRETATION 95

VII.1 Domaine couvert 95
VII.2 Influence des paramètres 96
VII.2.1 Etendue de l'analyse 96
VII.2.2 Modèle de chaussée et données de base 96
VII.2.3 Influence de la température 97
VII.2.4 Influence de l'épaisseur de la couche bitumineuse 98
VII.2.5 Influence de la distance entre la jauge et la base de la couche bitumineuse 99

VII.2.6 Influence de l'exentricité de la charge 100
VII.3 Calcul des déformations 101
VII.3.1 Comparaison des déformations mesurées et calculées en utilisant les mesures du déflectomètre à boulet 101
VII.3.2 Calculs de la déformation à partir des modules des couches bitumineuses déterminés en laboratoire .. 103
VII.4 Rigidité des systèmes de mesure 104
VII.4.1 Jauges 104
VII.4.2 Carottages 105
VII.5 Correction des mesures in situ 107

Chapitre VIII

CONCLUSIONS 109

VIII.1 Résultats de l'essai in situ 109
VIII.1.1 Analyse et interprétation des mesures 109
VIII.1.2 Réussite de l'essai 111
VIII.2 Recommandations 112
VIII.2.1 Recommandations pour de futurs essais internationaux 112
VIII.2.2 Recommandations pour les mesures de déformation dans les couches bitumineuses 113
VIII.2.3 Recommandations pour des études complémentaires. 114

ANNEXES A

Commentaires individuels des participants 115

ANNEXES B

Résultats bruts du programme d'essai 133

ANNEXES C

Détails de construction des jauges 153

ANNEXE D

Liste des participants 165

Liste des membres du groupe 167

Chapitre I

INTRODUCTION

I.1 COOPERATION DANS LES ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES

Depuis longtemps, les essais en vraie grandeur de superstructures routières (accélérés) - effectués par des simulateurs de trafic comme les pistes d'essai linéaires ou circulaires et les fosses équipées d'appareils de charge - ont une place bien définie dans les programmes de recherche routière de différents pays. Comme ce type d'essai - en dehors de ses indiscutables avantages techniques - accapare une portion importante des fonds attribués à la recherche routière, il est absolument nécessaire d'utiliser au mieux les résultats des expériences et de bien coordonner les programmes d'essais, afin d'éviter de répéter des essais déjà accomplis. Le besoin de coordination internationale dans ce champ d'activités a déjà été reconnu par l'OCDE à la fin des années 60 avec la création d'un groupe d'experts et la publication en mai 1982 d'un rapport intitulé "Méthodes accélérées de prévision de la la durée de vie des chaussées".

La décision de créer un nouveau groupe est apparue après qu'un autre groupe de l'OCDE s'occupant de l'effet des véhicules lourds de marchandises eut relevé la disponibilité d'un nombre d'installations de recherches spécialisées dans les essais à grande échelle dans les pays membres qui furent jugés utilisables pour les essais en vraie grandeur du comportement des structures routières, et en particulier de l'influence des véhicules lourds de marchandises. Le colloque international sur les essais routiers en vraie grandeur, tenu en mai 1982 à Zürich, a prouvé l'existence d'un grand intérêt pour un meilleur échange d'informations à l'instant où quelques nouvelles installations étaient dans un état avancé d'élaboration dans différents pays. Le nouveau groupe OCDE RTR I2 "Essais en vraie grandeur des superstructures routières" a commencé son activité en mars 1983, avec la Suisse comme pays pilote et une participation active des délégués de l'Australie, la Belgique, le Canada, le Danemark, la Finlande, la France, l'Allemagne, l'Italie, le Japon, la Grande-Bretagne et les Etats-Unis.

La première tâche de ce groupe est, entre autres, d'augmenter les bénéfices tirés des résultats de la recherche sur les essais en vraie grandeur des superstructures routières au travers d'une intense coopération et coordination internationale. Cela ne pouvait donc être possible que s'il était établi que chacun utilise - au sens technique du terme - le même langage ou, en d'autres termes, lorsqu'il est possible de répondre positivement à la question d'une comparaison directe des résultats de recherche. Une telle réponse ne peut être donnée que si la comparabilité et la fiabilité des méthodes de mesure sont assurées. Un programme coordonné de mesures en commun a donc été considéré comme absolument nécessaire (condition sine qua non) pour les activités futures du groupe.

I.2 BUT ET CONDITIONS GENERALES D'UN PROGRAMME DE MESURES EN COMMUN

Des possibilités de coordination internationale sont conditionnées par la disponibilités des installations d'essais (qui sont en général en activité) et par les méthodes d'essais utilisées. Ces méthodes sont la source du problème principal : aucun laboratoire n'a la preuve absolue de la validité de ses résultats de mesure. Cette preuve ne peut être obtenue que par des essais en commun dans des conditions identiques (structure, température, charge), où les résultats (déformation et contrainte) obtenus par différents laboratoires sont comparables. Deux situations différentes peuvent résulter de cette comparaison :

(a) les résultats sont égaux : dans ce cas, aucun doute ne subsiste sur les méthodes et techniques d'essais et une coopération internationale est alors possible ;

(b) les résultats ne sont pas égaux : les causes des différences doivent être trouvées et des contre-mesures effectuées avant le début d'une coopération internationale.

Comme il est pratiquement impossible de résoudre tous les différents aspects du problème décrit ci-dessus et parce qu'un tel programme, impliquant des contributions financières des participants pour couvrir les coûts généraux, n'a jamais été entrepris auparavant, une procédure unique a été retenue, en se limitant aux méthodes de mesure des déformations dans des couches d'enrobé hydrocarboné (ces valeurs de déformation sont très importantes pour l'utilisation des modèles informatiques de chaussée).

Le but de ce programme de mesures en commun est de vérifier la comparabilité des déformations mesurées par différentes techniques (mesures et analyses des données) sous les mêmes conditions limites (chaussée, charge, temps et température) et avec un nombre suffisant de mesures singulières.

Comme il était possible que les techniques particulières de pose des jauges puissent avoir une grande influence sur les résultats, il a été décidé que chaque équipe participante placerait ses instruments en utilisant sa propre technique et son propre personnel. Ainsi l'essai procurera non seulement les résultats relatifs au but particulier de ce programme, mais aussi une excellente opportunité pour accroître l'expérience pratique du personnel qui peut ainsi se familiariser avec différentes techniques.

I.3 PREPARATION ET ORGANISATION DES MESURES

Considérant que ce programme était une cible à très court terme dans les activités du groupe, que le site particulier d'essai convenait et était disponible, et que finalement les collègues italiens nous assuraient de leur coopération, il a été décidé d'organiser ce programme commun de mesures sur la piste d'essai de Nardo au sud de l'Italie. Sur cette route expérimentale, une chaussée longue de 50 mètres a été choisie pour les mesures en commun.

La conception de l'instrumentation devait fournir un nombre suffisant de mesures singulières pour une condition de charge particulière (dépendant de la structure de la chaussée, de la disposition et de la valeur du temps de charge et de la température de la chaussée. Quelques-unes de ces variables ont été maintenues constantes durant les mesures :

-- structure de la chaussée: une section homogène de route comportant une base de pierres concassées d'épaisseur constante ;

-- charge: véhicule à deux ou trois axes avec le même type de pneumatiques et respectivement la même charge sur l'axe avant et sur l'axe arrière ;

-- temps de charge: une seule vitesse d'essai de 30 kilomètres/heure.

Le coût général des essais a été divisé entre les participants, soit pour couvrir la plupart des dépenses pour la mise en place et le compactage des deux couches de béton bitumineux et la préparation et l'utilisation des véhicules de charge durant les mesures. L'opération a été financée par la contribution des pays membres du Groupe, sur un compte spécial administré par l'OCDE. L'engagement financier des participants comprenait tous les frais pour le matériel (jauges de défomation) et les frais de déplacement en Italie pour les ingénieurs et techniciens partipant à l'expérience sur place.

I.4 PARTICIPANTS

Toutes les délégations actives dans le groupe ont participé sous une forme ou une autre à ce programme d'essai en commun. Les participants peuvent être répartis en trois catégories :

-- participation au programme d'essai sur place ;
-- participation au financement du programme d'essai ;
-- et participation au travail d'analyse des données.

I.4.1 Participants au programme d'essai sur place

Neuf équipes de huit pays différents ont pris part à l'essai. Elles sont indiquées ci-après dans l'ordre alphabétique (cet ordre ne correspond pas à la numérotation des équipes utilisées dans le reste du rapport).

Australie : Australian Road Research Board, Nunawading, Victoria

Allemagne : Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch-Gladbach

Canada : Alberta Research Council, Civil Engineering Department, Edmonton, on behalf of roads and Transportation Association of Canada. Gauges for installation in the test were also supplied by:

Saskatchewan Highways and Transportation, Research Branch, Regina

Danemark : Institute of Roads, Transport and Town Planning, The Technical University of Denmark, Lyngby

Finlande : Technical Research Center of Finland, Road and Traffic Laboratory Espoo

France : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes

Italie : Società AUTOSTRADE, Rome, et RODECO, Voghera

Suisse : Laboratoire des voies de circulation LAVOC, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne

Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau ISETH, Ecole Polytechnique Fédérale, Zürich.

La liste de tous les participants au programme d'essai sur place est donnée a l'annexe D.

I.4.2 Participation au financement du programme d'essai

Des contributions financières directes pour couvrir les coûts généraux des essais ont été reçus des pays suivants :

- Australie	- Danemark	- Allemagne
- Belgique	- Finlande	- Suisse
- Canada	- France	- U.S.A.

Une part importante des coûts généraux a été prise en charge par la compagnie Autostrade, Italie, qui était aussi responsable de l'organisation locale.

Le TRRL de Grande-Bretagne a effectué le travail d'analyse détaillée des données gratuitement en utilisant ses propres installations informatiques.

I.4.3 Partipation au travail d'analyse des résultats

Le travail d'analyse des résultats comprenant les conclusions et la préparation du présent rapport, a été assigné à un sous-groupe du Groupe I2 comprenant les participants suivants :

- Allemagne : H. Buseck
- Belgique : J. Verstraeten
- Danemark : P. Ullidtz
- Finlande : M. Huhtala
- France : A. de Boissoudy
- Italie : G. Battiato
- Suisse : A.-G. Dumont (président), A. Jacot, I. Scazziga
- Royaume-Uni : R.R. Addis

I.5 CALENDRIER

- 23 mars 83 : Première réunion du Groupe I2: naissance de l'idée
- 02 mai 83 : Premier projet de programme technique
- septembre 83 : Deuxième réunion du Groupe I2: proposition d'exécuter le programme de mesures
- 10 janvier 84 : Réunion du groupe ad hoc d'organisation (délégations italienne et suisse) à Voghera, Italie
- 10 février 84 : Date limite de l'annonce de participation
- 06 mars 84 : Deuxième réunion du groupe ad hoc d'organisation à Bellinzone, Suisse
- 02/06 avril : Mise en place des jauges et des couches bitumineuses,
  09-12 avril 84 : Essais avec les charges de trafic et déflections dynamiques
- 12, 13 juin 84 : Première réunion du sous-groupe d'analyse des données à Bergisch-Gladbach (D)
- 10, 12 sept.84 : Deuxième réunion du sous-groupe d'analyse des données à Crowthorne (GB)
- 24, 25 janv.85 : Troisième et dernière réunion du sous-groupe d'analyse des données à Stoos (CH)
- février 85 : Projet final du rapport

I.6 STRUCTURE DU RAPPORT

Le rapport spécial du groupe I2, complémentaire au rapport du groupe publié par l'OCDE, donne ci-après toutes les informations détaillées sur le programme en commun de mesures des déformations effectuées en avril 1984 sur le site d'essai de Nardo en Italie. Il comporte également le travail d'analyse des données et d'interprétation des résultats. Les conclusions de ce rapport donnent, d'une part une interprétation résumée et explicite des résultats, et d'autre part une série de recommandations. Des informations détaillées sur les jauges utilisées et toutes les données brutes de l'essai sont jointes en annexe sous forme graphique et numérique (Annexes B et C).

Conformément à une décision du groupe, le rapport n'indique pas le lien existant entre les résultats et les équipes participantes. Les conclusions ont été approuvées par le groupe qui a accepté l'introduction éventuelle de commentaires individuels de chaque équipe en conclusion de ce rapport (Annexe A).

Chapitre II

TRONCON D'ESSAI ET SUPERSTRUCTURES

II.1 TRONCON D'ESSAI DE NARDO

La piste d'essai de Nardo (un anneau de 2 km de rayon) constitue l'un des centres européens les plus importants pour les essais à haute vitesse et d'endurance des véhicules et camions. La piste appartient à la compagnie SASN (Societa Autopiste Specimentali Nardo) qui en assure la gestion. Ce centre d'essai est situé dans le sud-est de l'Italie près de Brindisi. La figure II.1 montre une vue générale de la piste d'essai. L'anneau principal est constitué de 4 voies pour les voitures et de 2 voies pour les camions (figure II.2).

En 1979, il a été décidé d'utiliser l'équipement de Nardo pour étudier certaines superstructures. A cet effet, une route complémentaire a été construite à l'intérieur de l'anneau principal. La longueur de cette route est d'environ 1,8 km; elle se compose de deux sections de 500 m chacune permettant l'accès à l'anneau, et d'un tronçon de 800 m pour les structures expérimentales. Dans le cadre des essais pour les routes italiennes, entrepris jusqu'à présent à Nardo, trois tronçons d'essai avec revêtement souple et un tronçon avec revêtement rigide ont été construits. Etant donné l'emplacement retenu pour la route expérimentale, il est possible d'utiliser les véhicules circulant sur l'anneau principal pour solliciter les superstructures d'essai. Le sens de la circulation sur l'anneau principal change chaque jour.

La situation et la coupe de la route expérimentale sont indiquées à la figure II.3.

II.2 SUPERSTRUCTURES POUR LE PROGRAMME OCDE

La zone retenue pour le nouveau programme d'essais en commun de l'OCDE est située dans la partie centrale de la route expérimentale. Une longueur de 40 m a été construite après enlèvement partiel de la superstructure souple existante (figure II.4).

Figure II.1 : Plan de situation de la piste SASN (Società Autopiste Sperimentale Nardo) avec l'extension comprenant la chaussée expérimentale de l'OCDE

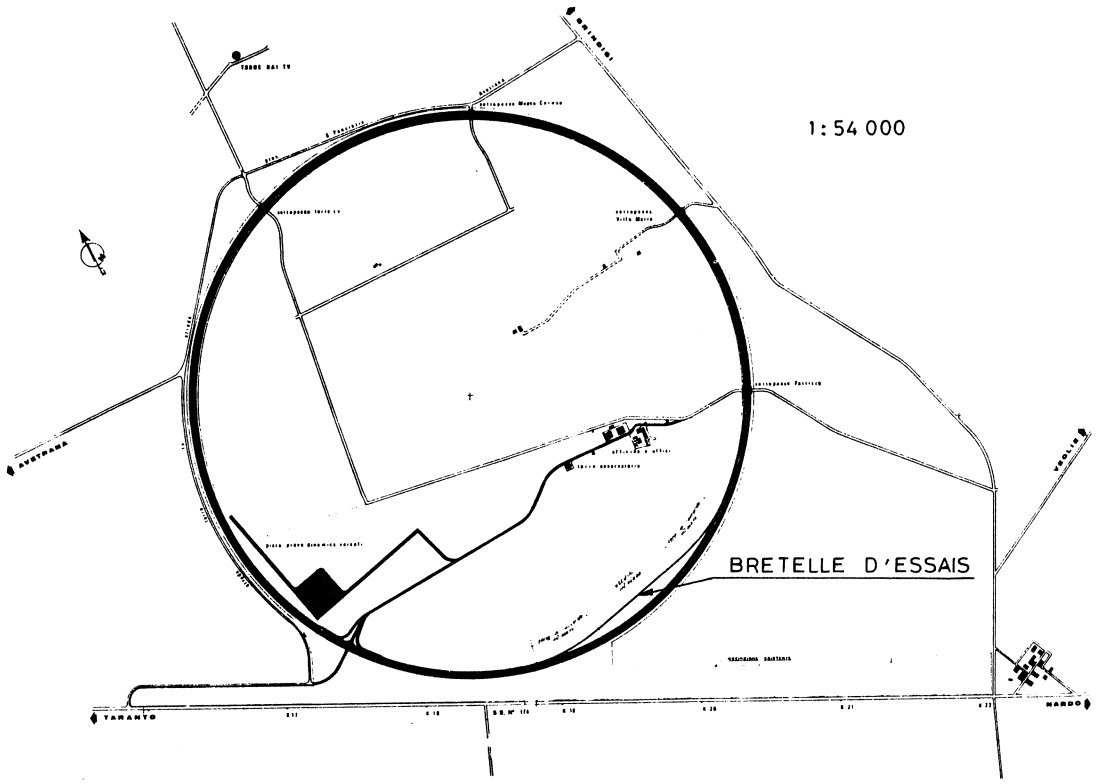


Figure II.2 : Anneau principal de la piste de Nardo, divisé en 2 voies pour les poids lourds et 4 voies pour les voitures, séparées par un mur en béton continu type "New Jersey"

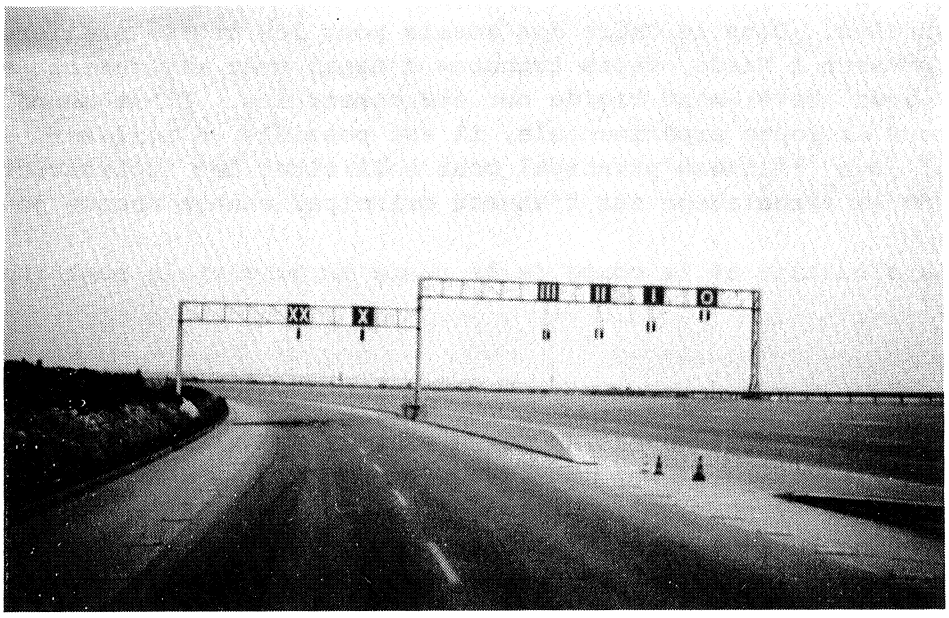
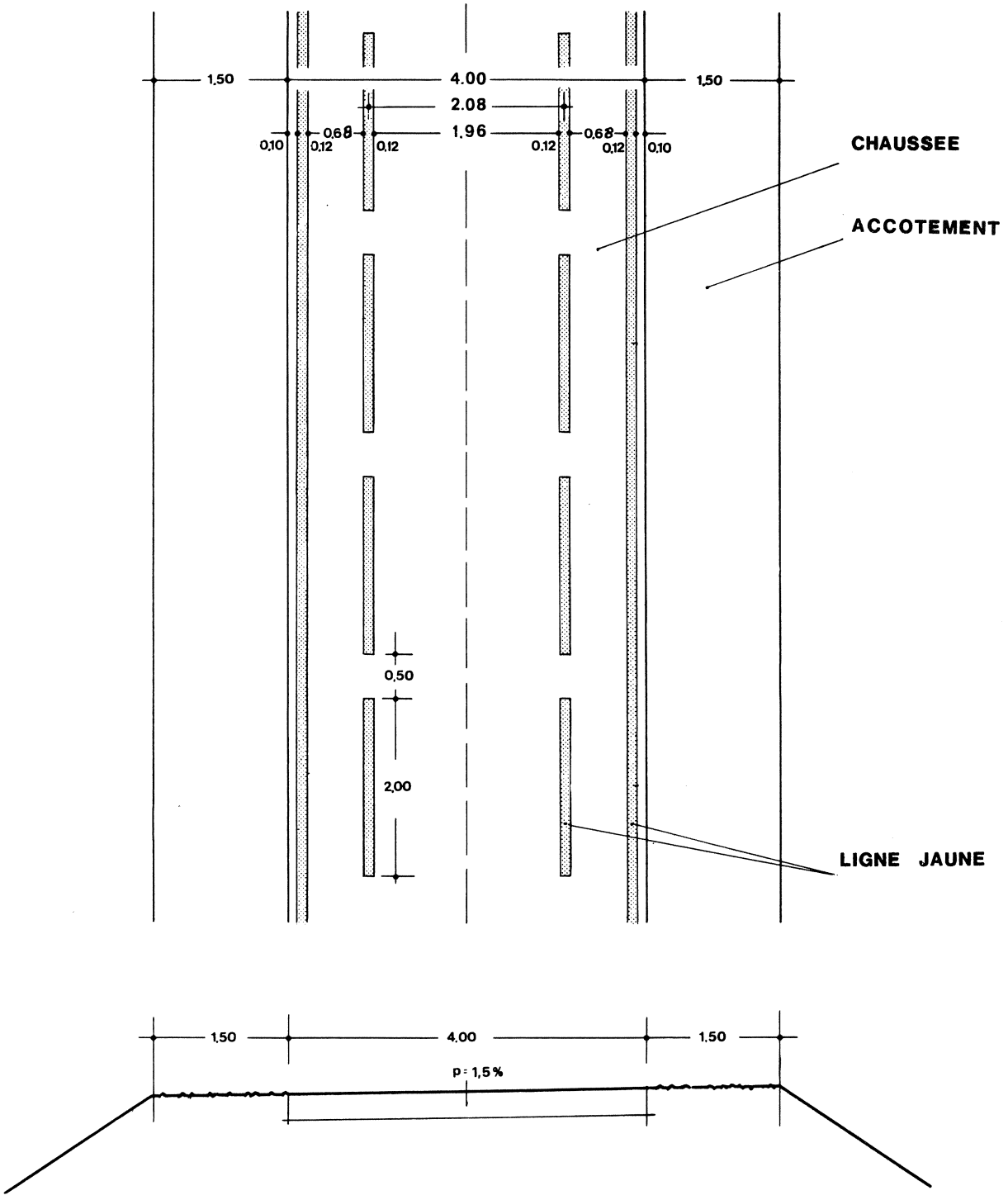


Figure II.3 : Plan et coupe de la route expérimentale

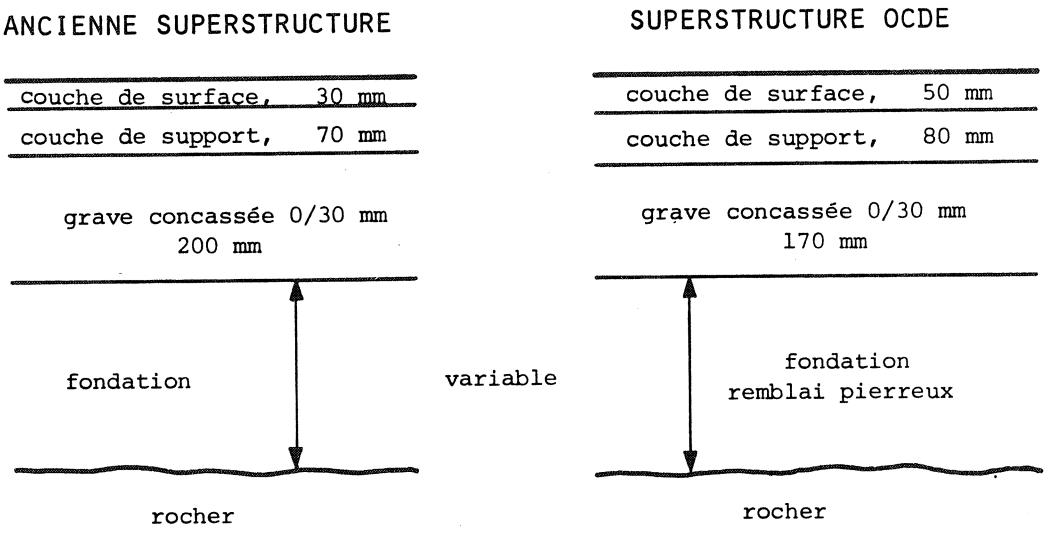


Avant de construire la superstructure pour l'OCDE, il a été nécessaire d'enlever les 2 couches existantes de béton bitumineux ainsi que la partie supérieure de la couche de grave concassée. Après reprofilage et compactage de cette couche concassée ramenée à une épaisseur de 170 mm, un essai de plaque y a été entrepris, en utilisant une plaque de 300 mm de diamètre (mode opératoire selon la norme suisse SN 670 317).

Pour le premier et le deuxième cycles de chargement, les modules suivants ont été calculés sur la base du tassement différentiel entre les charges de 0,25 et 0,15 MPa :

1. cycle: M_E = 137 MPa
2. cycle: M_E = 273 MPa

Figure II.4 : Superstructure sur la piste de Nardo



Ces valeurs indiquent que la couche en grave concassée est relativement rigide. Ce résultat est également influencé par la présence de la roche à une faible profondeur. D'un autre côté, le rapport de 2 pour le module entre les 2 cycles de chargement montre que le compactage de la couche est tout juste suffisant et qu'il pourrait être amélioré.

La courbe granulométrique, les caractéristiques de formulation et les résultats d'essais du béton bitumineux et du liant sont donnés au chapitre IV.

Lors de la mise en oeuvre des matériaux hydrocarbonés, un soin particulier a été apporté pour éviter d'endommager les jauges, ainsi

-- une température du mélange ne dépassant pas 130 °C,
-- l'utilisation d'un compacteur à pneus,
-- l'interdiction de recourir à un compactage par vibrations.

Ces précautions peuvent expliquer la forte teneur finale en vides du béton bitumineux.

Chapitre III

MESURE DES DEFORMATIONS

III.I GENERALITES

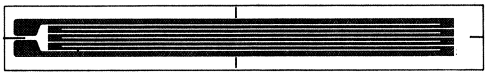
La déformation horizontale au sein d'une couche d'enrobé hydrocarboné à l'instant de l'application d'une charge se mesure à l'aide de jauges extensométriques. Ces capteurs de déformation sont constitués d'un fil en matériau conducteur de l'électricité dont la résistance électrique R varie de $\Delta R/Ro$ lorsque celui-ci subit un allongement mécanique $\epsilon = \Delta L/Lo$. Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta R/Ro = k \cdot \epsilon$$

unités: $\Delta R, R$ [Ω]
ϵ [10^{-6}m/m = microstrain]

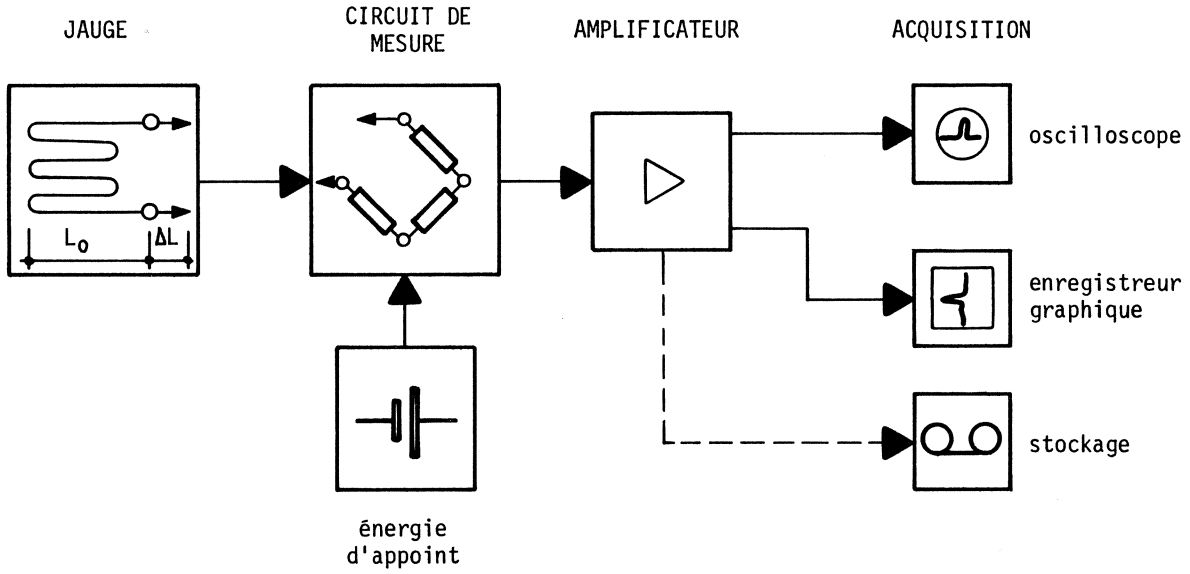
où le facteur de proportionalité k est une caractéristique de la jauge.

Figure III.1 : Exemple de jauge d'extensométrie



La déformation mécanique que subissent la jauge et son support est transformée en grandeur électrique qu'un circuit de mesure, un pont de Wheatstone, permet de quantifier. Un amplificateur et un indicateur (oscilloscope ou enregistreur graphique) complète la chaîne de mesure. Des systèmes perfectionnés permettent actuellement de stocker les mesures automatiquement sur bandes magnétiques ou cassettes pour un traitement informatique ultérieur.

Figure III.2 : Schéma d'une chaîne de mesure



Les câbles qui relient la jauge au système de mesure présentent une résistance électrique non nulle. De même les variations de température sur la jauge modifient sa résistance. Des dispositions particulières (pont complet ou demi-pont de jauge, jauge de compensation de température, câble court mais de section importante) peuvent limiter ces effets parasites.

III.2 CATEGORIES DE JAUGES

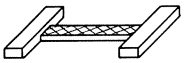
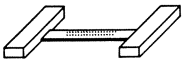
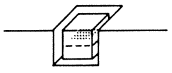
Actuellement les jauges disponibles sur le marché ne sont pour la plupart pas adaptées à la mesure directe des déformations au sein de matériaux hydrocarbonés, ainsi les centres de recherche confectionnent eux-mêmes ces capteurs par adjonction de support ou de barreaux d'ancrage. Une intéressante tentative est faite pour coller la grille à même le matériau hydrocarboné, soit sur un échantillon préparé en laboratoire, soit sur une carotte prélevée dans la chaussée.

C'est tout d'abord sur la base du mode de mise en oeuvre qu'une classification des jauges a été effectuée en trois catégories principales :

1. jauge en H
2. jauge collée sur matériau hydrocarboné d'apport
3. jauge collée sur carotte prélevée dans la chaussée

Ces catégories sont encore subdivisées selon la méthode particulière d'élaboration du support ou du matériau hydrocarboné. La figure III.3. donne la classification des jauges. Une fiche détaillée de chaque jauge est donnée à l'annexe C de ce rapport.

Figure III.3 : Classification des jauges

CATEGORIE	SCHEMA	MODELE DE JAUGE	LONGUEUR ACTIVE DU FIL /ANCRAGE	RESISTANCE (Ω)	COUT (US $)	EQUIPE	MONTAGE
1.1		KYOWA KM-120-H2-11L 100-3	70 MM/104 MM	120 ± 1 %	40	3	- FIXATION DES BARREAUX D'ANCRAGE EN LABORATOIRE
		KYOWA KM-120-H2-11L 100-3	70 MM/106 MM	120 ± 1 %	35	5	
		KYOWA KM-120-H2-11L 100-3	70 MM/100 MM	120 ± 1 %	75	7	
1.2		KYOWA KC-70-A1-11	67 MM/130 MM	120	35	2	- COLLAGE DE LA JAUGE SUR LE SUPPORT ET FIXATION DES BARREAUX EN LABORATOIRE
		PL 30 ou KYOWA KFC-30-C1-11	30 MM/100 MM	120	23	6	
1.3		HBM DA 3	88 MM/140 MM	350	180	1	
2.1		HBM LP 21 60-120	60 MM/60 MM	120	12	1	- COLLAGE SUR 1/3 DE LA HAUTEUR SUR EPROUVETTE MARSHALL
		BLH FAE 2-300-35 PL	76 MM/76 MM	350	35	8	- COLLAGE SUR EPROUVETTE DE LABORATOIRE
2.2		HBM 20/600 XA21	20 MM/20 MM	600 ± 0,25	10	9	- COLLAGE AU MILIEU D'UNE EPROUVETTE DE LABORATOIRE
2.3		METAL FOIL GAUGE	13 MM/25 MM	120	15	4	- COLLAGE SUR BLOC DE SHEET ASPHALT
3.1		HBM LP 21 60-120	60 MM/60 MM	120	12	1	- COLLAGE SUR EPROUVETTE PRELEVEE DANS LA CHAUSSEE
		HBM 60/600 LP 21		600 ± 0,25	15	3	

En plus des jauges décrites ci-avant et présentées à la figure III.3, une paire de jauges BISON à été installée dans la zone libre à la suite de la zone 9 de l'équipe No 9 (voir figure III.17). Les deux jauges ont été placées l'une après l'autre, sur la même ligne que les autres jauges, à l'interface entre la fondation en matériaux concassés et la couche inférieure du béton bitumineux.

Catégorie 1

Pour des raisons essentiellement historiques, trois équipes (3, 5 et 7) utilisent le même type de jauge (1.1) où le fil conducteur est enserré dans une barre de matière plastique. A chaque extrémité sont fixés des barreaux en aluminium pour améliorer l'ancrage au sein du matériau hydrocarboné.

Deux équipes (2 et 6) utilisent la méthode recommandée par le TRRL en collant la jauge sur une plaquette d'aluminium aux extrémités de laquelle on fixe le même système d'ancrage (1.2). La partie centrale de la jauge doit être alors soigneusement protégée.

L'équipe 1 a utilisé des jauges HBM qui sont prévues pour les enrobés hydrocabonés et ne nécessitent donc aucune préparation (1.3).

Figure III.4:
Jauge type 1.1

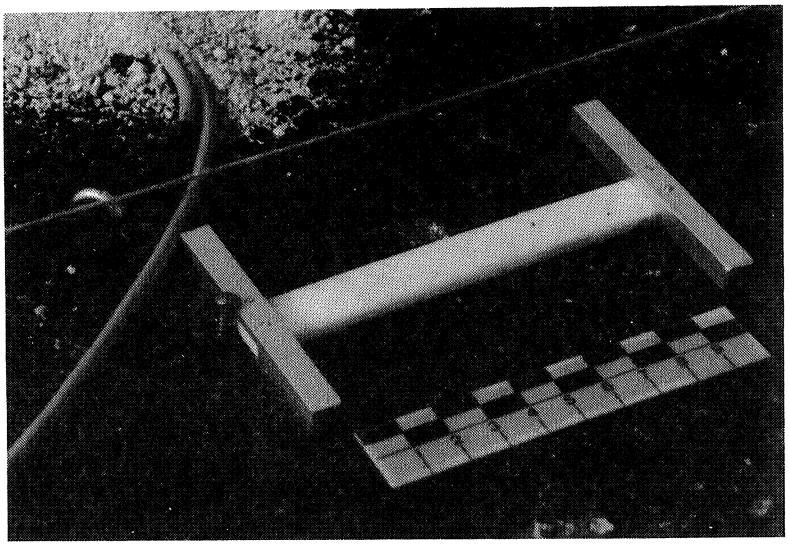


Figure III.5:
Jauge type 1.2

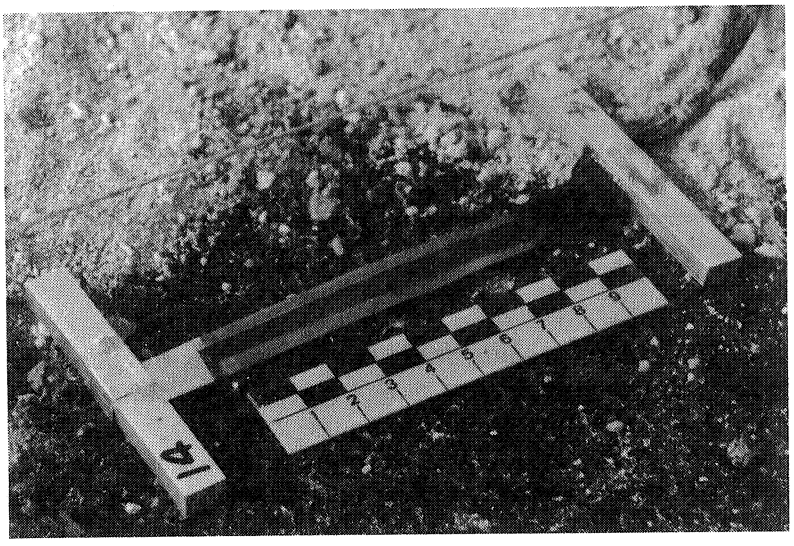
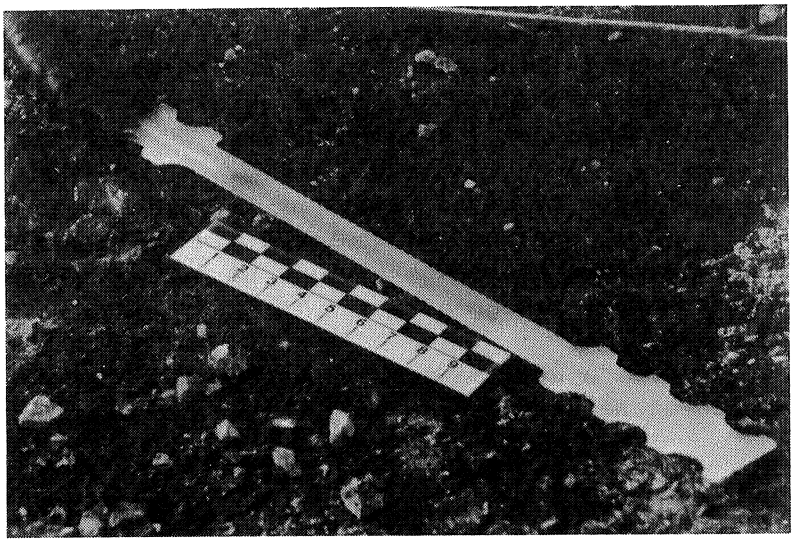


Figure III.6:
Jauge type 1.3



Catégorie 2

Quatre équipes collent les jauges directement sur des éprouvettes compactées en laboratoire : éprouvettes Marshall pour l'équipe 1 et éprouvettes cylindriques diam. 160 mm pour l'équipe 8 (2.1). L'équipe 9 se réfère à la méthode Shell en introduisant une jauge courte (20 mm) dans un bloc de matériau hydrocarboné scié puis recollé en laboratoire (2.2). Quant à l'équipe 4, elle colle chaque jauge sur la face inférieure d'une plaque mince de "Sheet asphalt" de 15 x 15 cm (2.3).

Figure III.7:
Jauge type 2.1

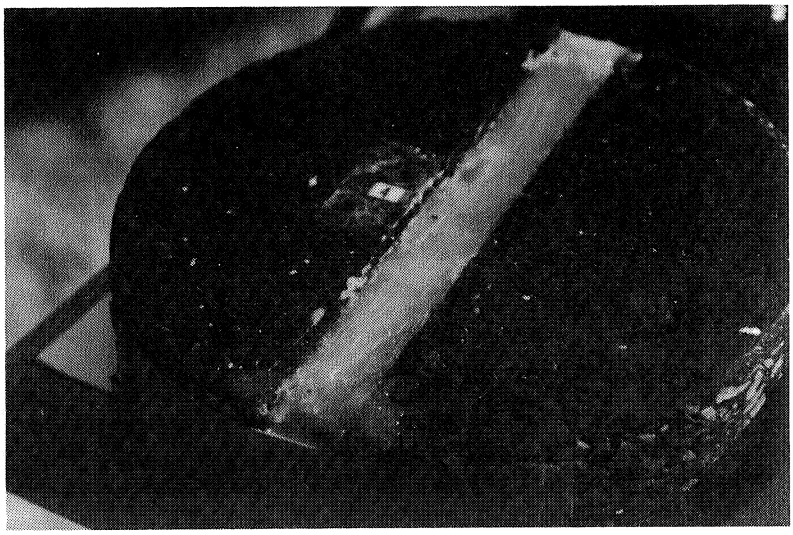


Figure III.8:
Jauge type 2.2

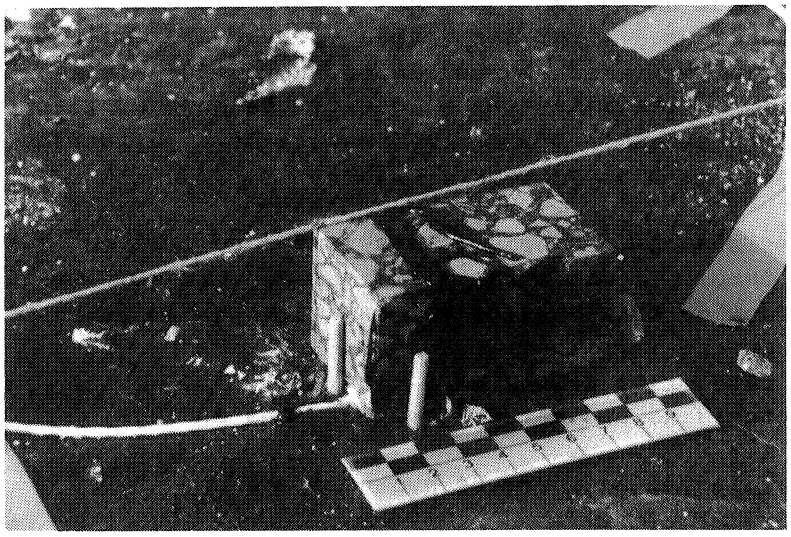
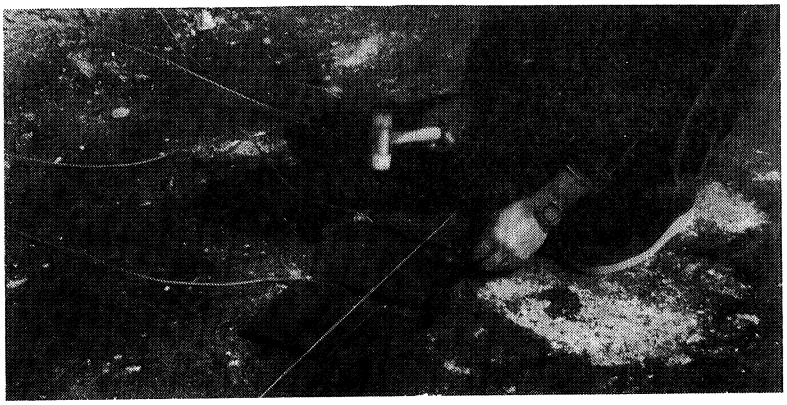


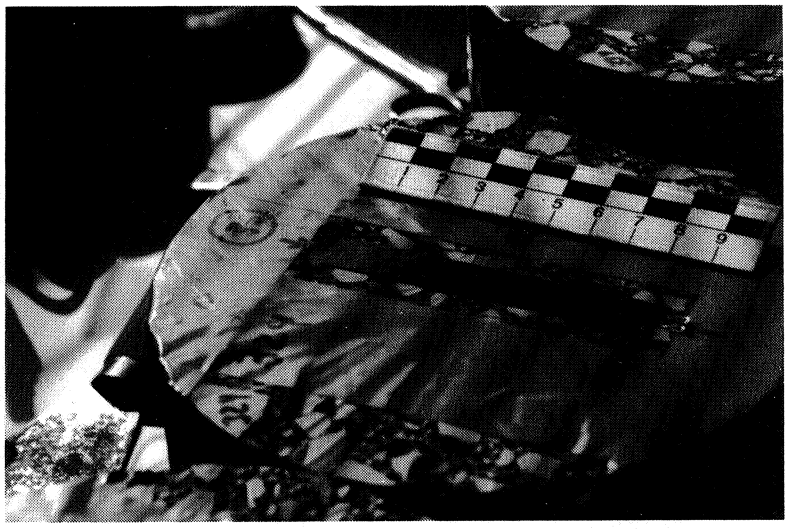
Figure III.9:
Jauge type 2.3



Catégorie 3

Deux équipes (1 et 3) prélèvent une carotte dans la chaussée à tester, y collent une ou deux jauges (inf. et sup.) et replacent la carotte dans son trou. L'espace de sciage est ensuite colmaté par une colle époxy.

Figure III.10:
Jauge type 3.1



La longueur active de la jauge ne doit pas être confondue avec l'espace entre les ancrages. Ainsi des jauges courtes (30 mm) sont parfois fixées sur un support de 100 mm. Bien qu'une étude allemande indique que la longueur active de la jauge n'influence que de quelques pourcents le résultat de la mesure, il est préférable que cette longueur soit d'environ 3 à 5 fois le diamètre du plus gros élément de l'enrobé.

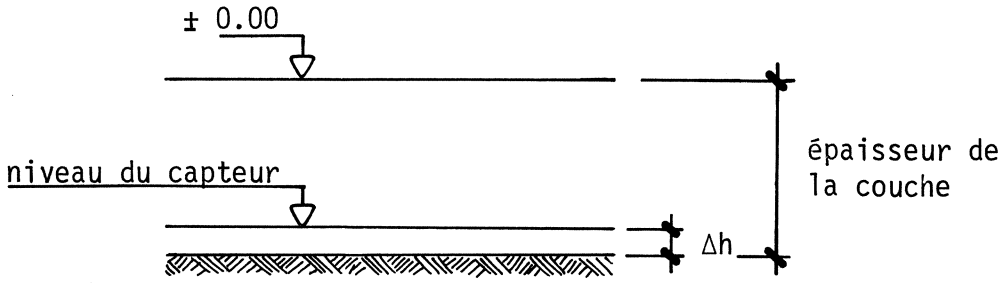
Les résistances électriques des jauges se limitent à trois valeurs 120, 350 ou 600 ohms. Il est caractéristique de voir que les jauges se regroupent en trois niveaux de prix si l'on ne considère pas la préparation faite par le centre de recherche :

a. jauge des catégories 1.2, 2 et 3 — 10-35 US$
b. jauge enrobée dans une matière support sans ancrage catégorie 1.1 — 35-75 US$
c. jauge spécialement pour enrobé hydrocarboné catégorie 1.3 — 180 US$

III.3 NIVEAU DES CAPTEURS

Selon le type de capteur utilisé ou le mode de mise en place, le niveau exact où le capteur fait la mesure n'est souvent pas le même que celui prévu théoriquement soit la base de la couche de revêtement. Sur la base des informations fournies par chaque équipe, nous avons déterminé les hauteurs Δh :

Figure III.11 : Niveau relatif des capteurs



Catégorie de jauge	No des équipes	Δh [mm]	
1.1	3, 5, 7	2	
1.2	2	0	
1.2	6	4	
1.3	1	0	
2.1	1	0	
2.1	8	5	
2.2	9	0	couche sup.
2.2	9	15	couche inf.
2.3	4	6	
3.1	1	0	
3.1	3	11	

III.4 ETAT DES JAUGES

Lors de la mise en place et du compactage des enrobés, un certain nombre de jauges sont détruites ou rendues inutilisables. On a distingué les pertes en jauges lors de la pose (résistance électrique nulle ou hors limite) et les signaux inutilisables (perturbation dans la forme et dans la valeur maximale). La figure III.12 donne l'état des jauges avant la mise en charge le 8 avril 1984.

Figure III.12 : Etat des jauges avant charge le 8 avril 1984

Equipe Team	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
Couche sup. Upper layer	(201...234)									
Nb of gauges	2	8	16	0	16	12	13	4	8	79
Gauges OK	1	5	16	-	16	11	12	4	7	72
Gauges KO	1	3	0	-	0	1	1	0	1	7
Loss rate [%]	50	38	0	-	0	8	8	0	13	[9]
Signal OK	1	5	15	-	15	11	12	4	7	70
Signal KO	0	0	1	-	1	0	0	0	0	2
Loss rate [%]	0	0	6	-	6	0	0	0	0	[3]
Couche inf. Inner layer	101...134)									
Nb of gauges	17	16	16	4	16	16	16	8	8	117
Gauges OK	16	2	16	2	16	16	15	8	7	98
Gauges KO	1	14	0	2	0	0	1	0	1	19
Loss rate [%]	6	88	0	50	0	0	6	0	13	[16]
Signal OK	15	2	16	2	16	16	15	7	7	96
Signal KO	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2
Loss rate [%]	6	0	0	0	0	0	0	13	0	[2]

Nb of gauges total	196	100 %
OK	170	87 %
KO	26	13 %
Nb of gauges with signal OK total	166	[85 %]

Les résultats obtenus (15 % de perte) sont très inférieurs à ceux constatés habituellement lors d'essais en vraie grandeur où l'on se situe très souvent aux alentours de 50 %. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées.

Tout d'abord sur le site d'essai, le compactage s'est fait par des compacteurs à pneus, sans vibration. De plus, la forte teneur en vides et la faible température de compactage ont limité les déplacements des jauges par rapport à leurs câbles et, enfin, les équipes présentes ont mis un soin tout particulier à la pose de ces capteurs.

Cependant, des pertes importantes ont été constatées par l'équipe 2 utilisant des jauges de catégorie 1.2. On peut penser que la protection de la zone active était alors insuffisante, pour preuve les jauges de la couche supérieure protégées par une plaquette d'aluminium ont fonctionné parfaitement.

Le nombre de charges très limité ne permet pas de tirer des conclusions sur le comportement à long terme des jauges (fatigue, durée de vie). Cependant, nous savons que des effets annexes tels que les infiltrations d'eau peuvent conduire à la dégradation de la jauge. A cet effet, des mesures de résistance électrique ont été effectuées en janvier 1985 sur le site de mesure. Les résultats sont donnés à la figure III.13.

Figure III.13 : Résistance électrique des jauges, état janvier 1985, soit après 9 mois

Catégorie	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	2.1	2.1	2.2	2.3	3.1	3.1
Equipe	3	5	7	2	6	1	1	8	9	4	1	3
Résistance électrique												
nominale (1) [Ω]	120	120	120	120	120	350	120	350	600	120	120	600
max.mes. (2) [Ω]	133.2	122.1	122.4	122.6	121.4	379.0	125.9	356.9	604.5	120.8	121.6	602.3
min.mes. (2) [Ω]	118.8	119.5	119.7	120.8	119.8	346.7	121.2	356.9	596.2	120.7	121.0	599.8
Nbre de jauges mesurées	24	27	33	6	28	7	7	10	20	4	4	8
Nbre de jauges KO	0	4	1	0	1	1	0	9	3	2	0	0
% perte	0	15	3	0	4	14	0	90	15	50	0	0

Remarque : Le pourcent de perte peut être inférieur à celui de la fig. III.14 si toutes les jauges n'ont pas été testées

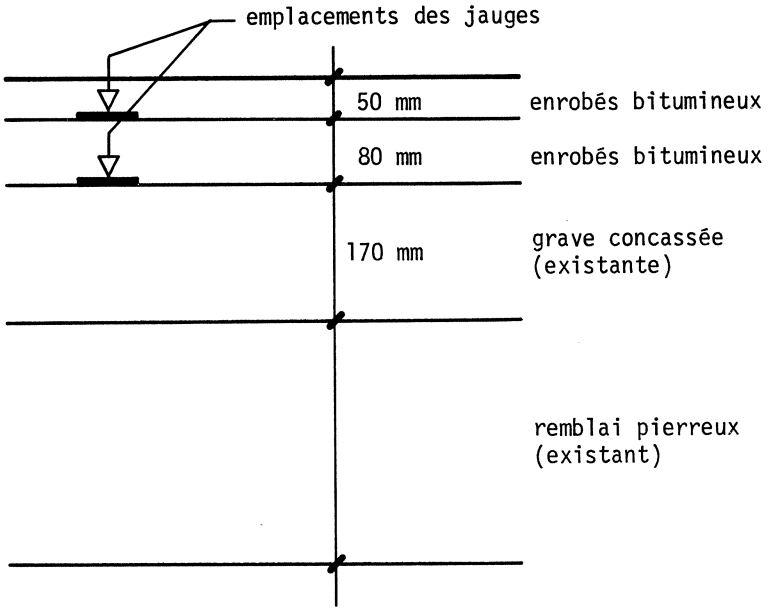
(1) selon descriptif des jauges en annexe
(2) pour les jauges dont la résistance n'est ni nulle ni infinie

Après 9 mois, et bien que les câbles n'aient pas été spécialement protégés, le taux de perte est encore faible, généralement inférieur à 15 %. Les jauges de l'équipe 4 présentent déjà les 50 % de perte lors de la pose de la superstructure, par contre, l'équipe 8, dont une seule jauge était hors service en 1984, a pratiquement perdu la totalité de ses jauges. Des infiltrations d'eau le long des câbles coupés au ras de l'enrobé hydrocarboné (ce qui n'est normalement pas le cas pour des jauges dont on prévoit l'utilisation future) peuvent expliquer que seule 1 jauge sur 10 a encore une résistance électrique de 350 Ω.

III.5 POSITION DES JAUGES

Les jauges ont été placées à deux niveaux dans la chaussée, soit au niveau inférieur sur la fondation en matériaux concassés et au niveau supérieur sur la couche de base en enrobés hydrocarbonés.

Figure III.14 : Position verticale des jauges



La disposition en plan a été étudiée pour que chaque capteur soit placé dans la zone de passage des charges en évitant au mieux l'interférence due à la forte concentration des capteurs. Il est à noter que chaque équipe ne disposait que de 3 mètres de chaussée. La disposition de toutes les jauges est donnée dans les figures III.16 et III.17 (seulement pour la couche inférieure puisque les résultats des jauges supérieures ne sont pas analysés dans ce rapport).

Figure III.15 : Position horizontale des jauges

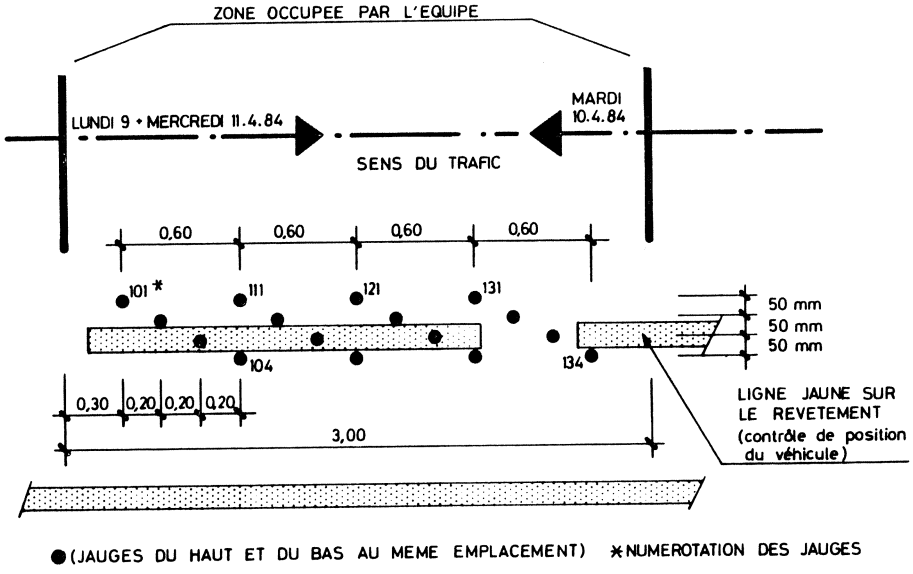


Figure III.16 : **Lower layer gauges layout (No 101-134)**

Plan de pose des capteurs de la couche inférieure (no 101-134)

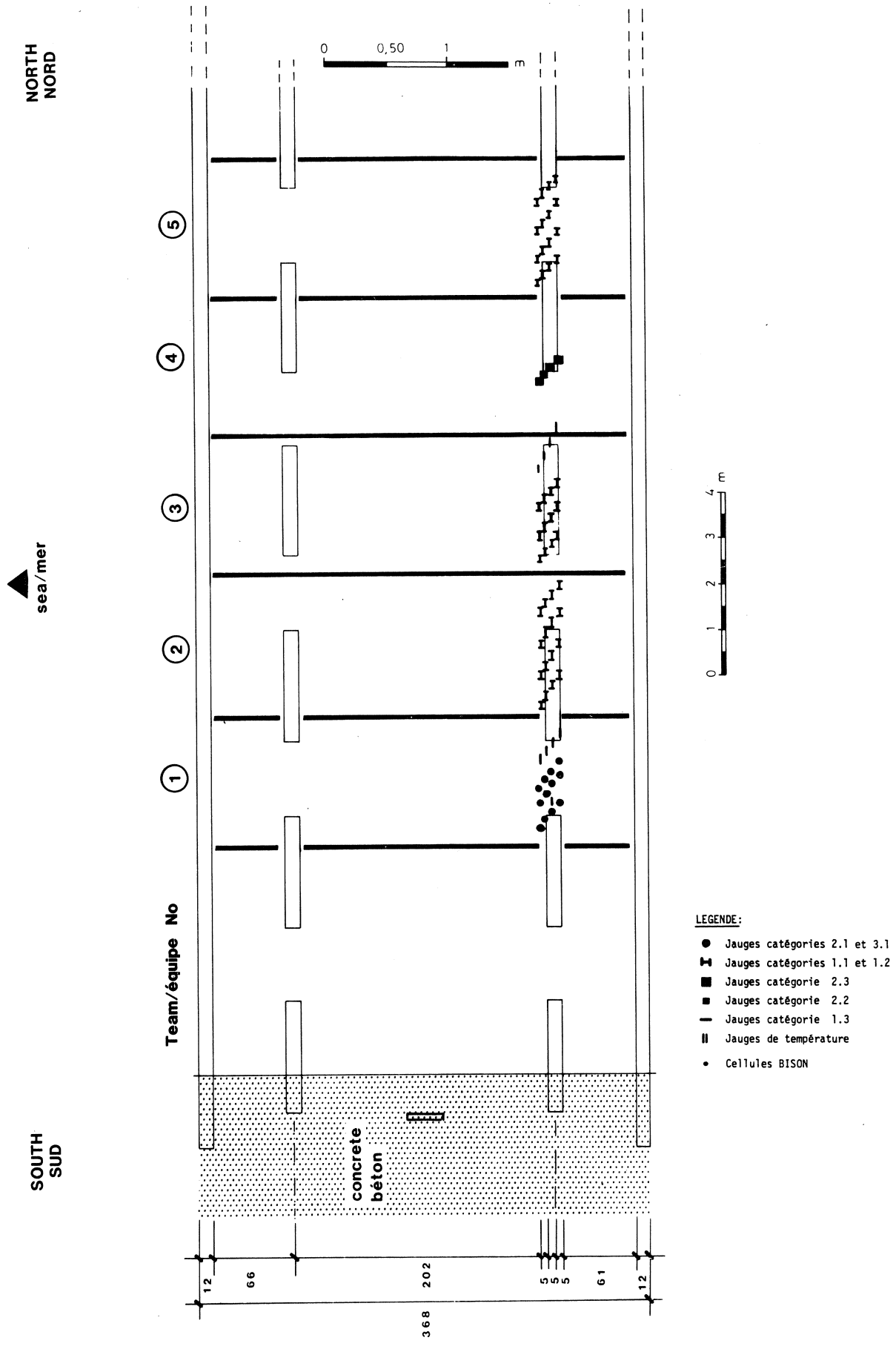
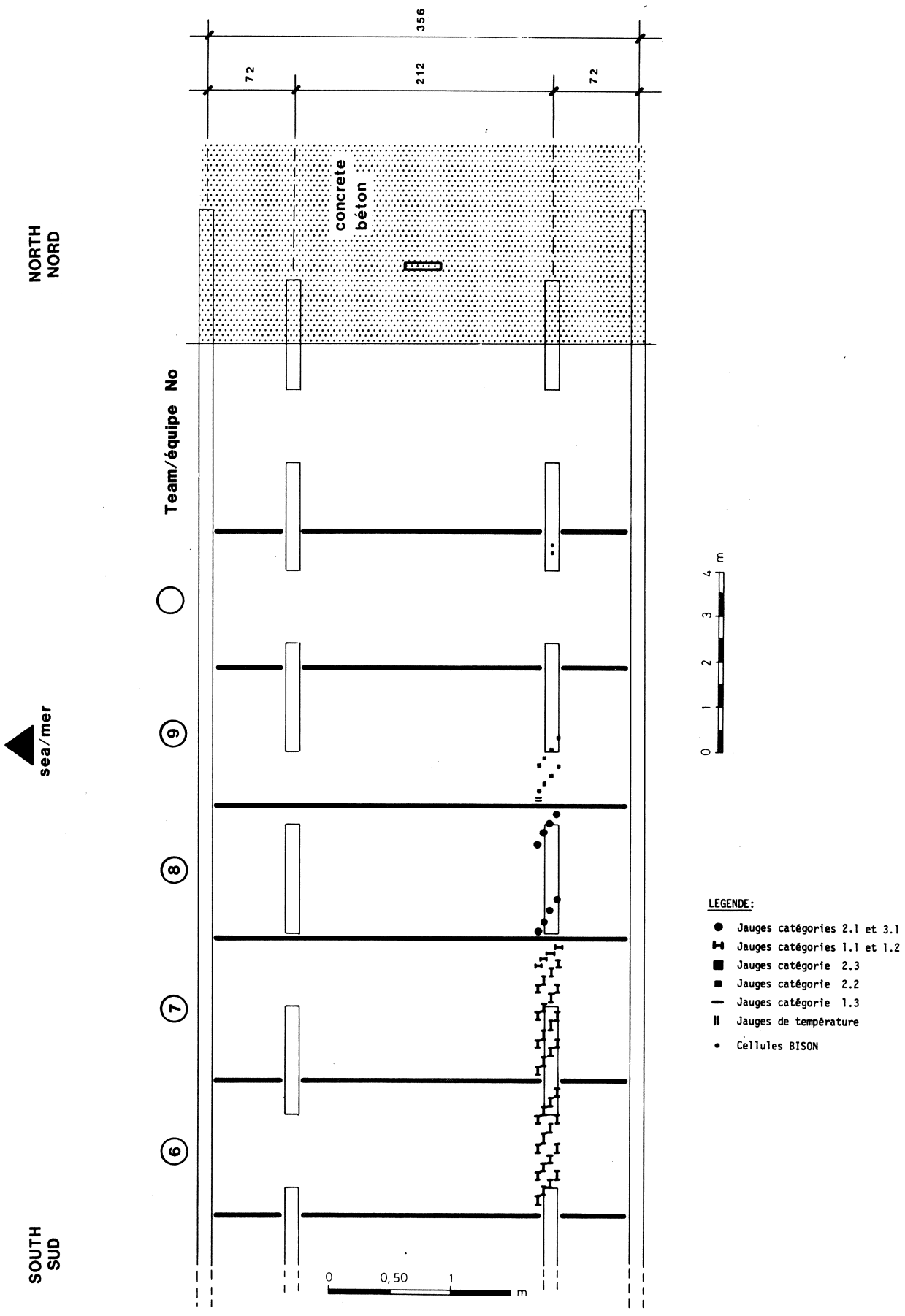


Figure III.17: **Lower layer gauges layout (No 101-134)**

Plan de pose des capteurs de la couche inférieure (no 101-134)



Chapitre IV

CONTROLE DE LA STRUCTURE DE LA CHAUSSEE

IV.1 INTRODUCTION

Comme indiqué au chapitre II, la superstructure retenue pour le programme OCDE n'est que partiellement neuve. En fait, seules les 2 couches supérieures de béton bitumineux (d'une épaisseur totale nominale de 130 mm) ont été mises en oeuvre pour l'essai, après enlèvement de la partie supérieure de l'ancienne superstructure. Le chapitre suivant contient les résultats des différents essais et mesures réalisés afin de vérifier l'homogénéité de la superstructure sur l'ensemble du tronçon d'essais.

L'étude des caractéristiques des matériaux (épaisseur des couches, granulométrie, teneur en liants et en vides) a été effectuée sur des carottes prélevées dans le tronçon, à la fin des essais. Ces carottes ont été analysées dans quelques-uns des laboratoires dont dépendaient les équipes participantes. En plus des analyses habituelles, quelques essais plus poussés ont été également entrepris dans le but principal de déterminer le module du béton bitumineux.

L'état de l'ancienne superstructure "conservée" (c'est-à-dire la couche de fondation en grave et le sol d'infrastructure) a été étudié indirectement à l'aide de deux appareils de mesure de déflexion. Les valeurs de la déflexion dynamique reflètent le comportement de l'ensemble des matériaux anciens (couche de fondation en grave et infrastructure) et nouveau (béton bitumineux), mais avec une analyse précise il est possible d'évaluer le comportement des seules couches inférieures.

IV.2 EPAISSEUR DES COUCHES

Cette épaisseur des couches a été déterminée en laboratoire, par des mesures sur des carottes prélevées sur le tronçon d'essai. Les résultats, donnés en détail à la figure IV.1, sont les suivants :

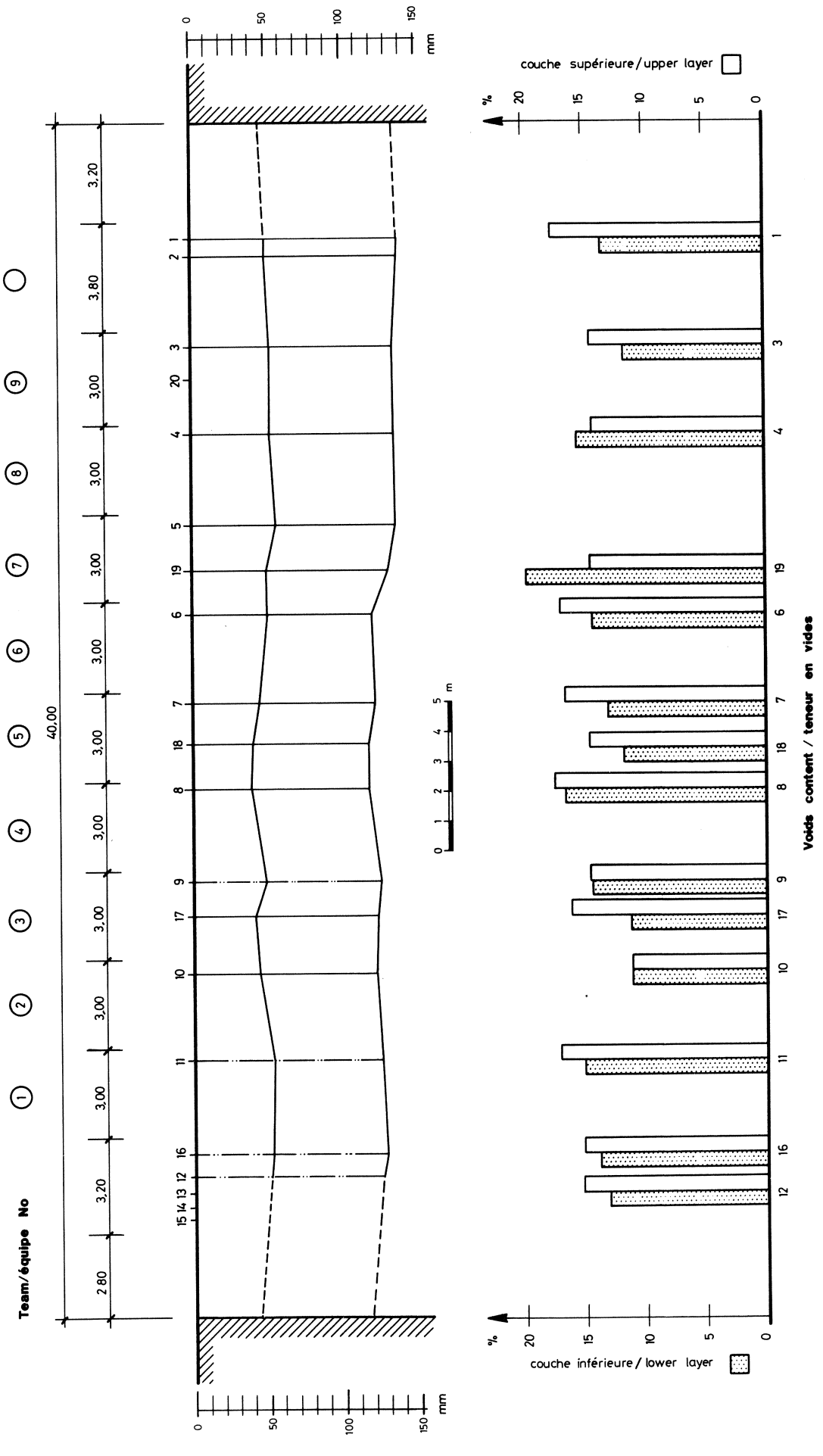
	minimum	moyenne	maximum
Couche de surface (mm)	38	48	57
Couche de base (mm)	70	79	88
Total (mm)	117	127	138

Figure IV.1 : Epaisseur des carottes prélevées sur le revêtement du tronçon d'essai de Nardo

	D ALLEMAGNE			CH SUISSE		
Numéro Carottes	Epaisseur (cm) sup.	inf.	total	Epaisseur (mm) sup.	inf.	total
1	5.0	8.8	13.8			
2	5.0	8.8	13.8			
3	5.2	8.2	13.4			
4	5.3	8.3	13.6			
5	5.7	8.0	13.7			
6	5.0	7.0	12.0			
7	4.4	7.8	12.2			
8	3.8	7.9	11.7			
9				50.3	75.7	126.0
10	4.4	7.8	12.2			
11				53.6	72.7	126.3
12				49.6	75.2	124.8
13						
14						
15						
16				51.7	77.0	128.7
17	4.1	8.2	12.3			
18	4.0	7.7	11.7			
19	5.0	8.1	13.1			

Toutes les valeurs sont également représentées graphiquement à la figure IV.2

Figure IV.2 : **Thickness of asphaltic layers / épaisseurs des couches hydrocarbonées**



IV.3 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

IV.3.1 Béton bitumineux

Les matériaux bitumineux ont été analysés dans les laboratoires de trois centres de recherche : CRR en Belgique, BAST en Allemagne et LAVOC en Suisse.

Les méthodes d'essai utilisées ainsi que le lieu de prélèvement des éprouvettes ne sont pas les mêmes pour chacun des laboratoires. Cela peut, en partie, expliquer les différences dans la détermination de la teneur en vides (figure IV.3).

Figure IV.3 : Teneur en vides sur carottes

No carotte	BAST		LAVOC	
	sup.	inf.	sup.	inf.
1	17.8	13.6		
3	14.6	11.7		
4	14.4	15.7		
6	17.1	14.4		
7	16.7	13.1		
8	17.6	16.7		
9			14.5	14.4
11			17.1	15.1
12			15.3	13.1
16			15.3	13.9
17	16.3	11.4		
19	14.6	19.9		

La courbe granulométrique ne donne que peu d'information sur la qualité du béton bitumineux. Cependant, on peut remarquer que l'éprouvette provenant de la couche de base analysée par le CRR est riche en sable (figures IV.4 et IV.5).

La teneur en liant des 2 couches est indiquée à la figure IV.6.

Sur la base de ces résultats, il apparaît que le béton bitumineux mis en oeuvre dans le cadre de ce programme est différent des enrobés bitumineux employés habituellement en construction routière. En particulier, les valeurs de la teneur en vides sont très élevées, 16 et 15 %, avec simultanément une teneur en liant très basse, soit 3,9 %. La mise en oeuvre d'une couche mince (jusqu'à 40 mm) et l'interdiction d'utiliser des compacteurs vibrants peuvent expliquer partiellement ces résultats.

Figure IV.4 : Courbe granulométrique de la couche supérieure

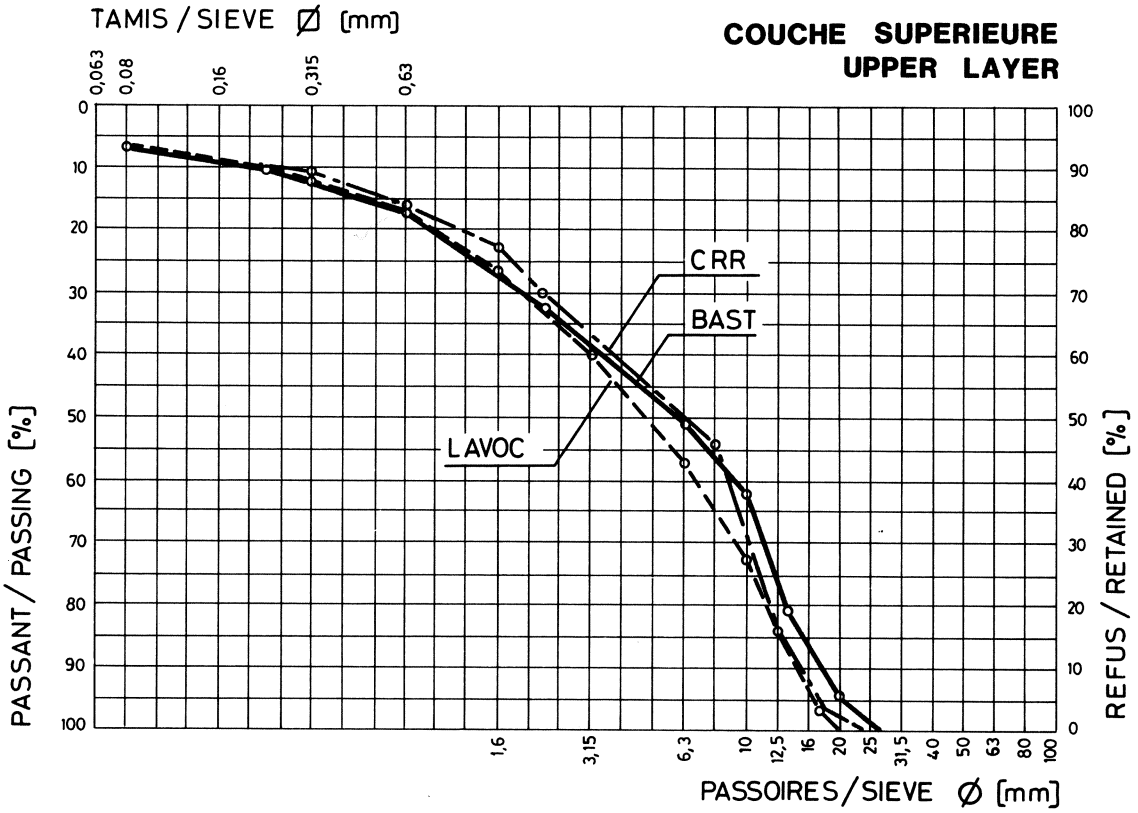
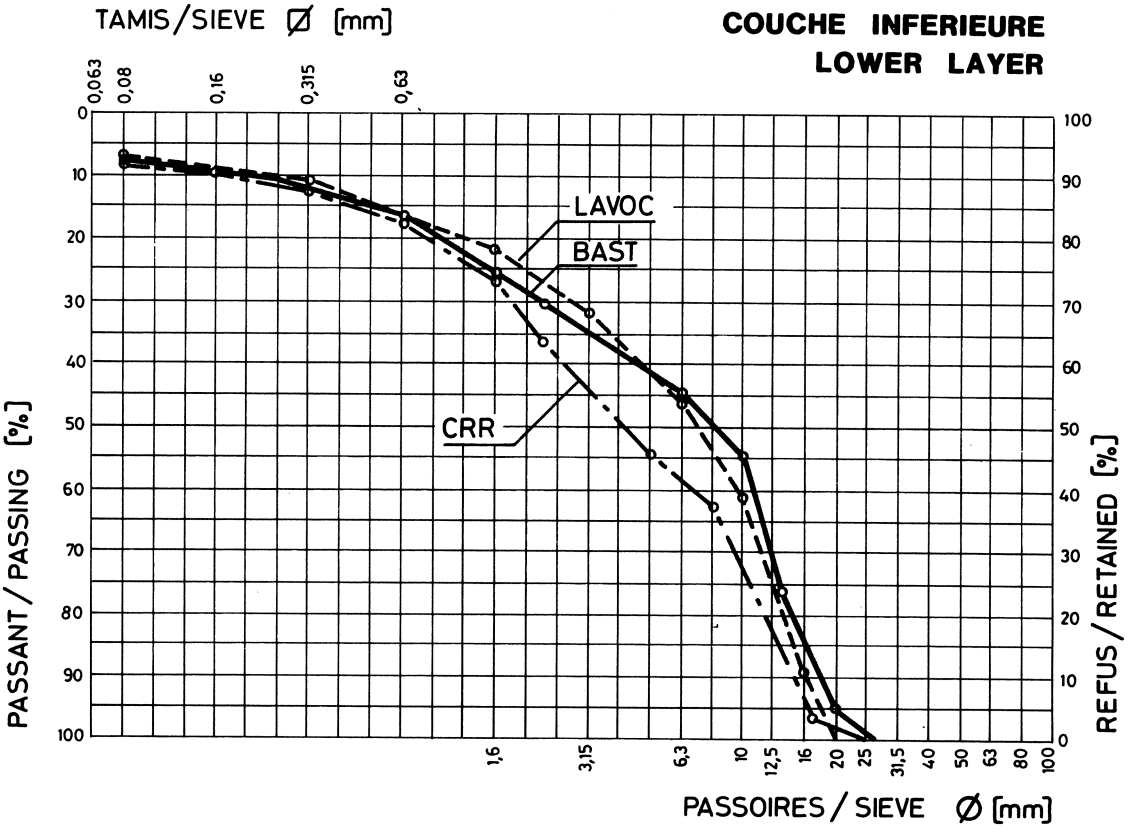


Figure IV.5 : Courbe granulométrique de la couche inférieure



IV.3.2 Liants

Le liant utilisé a été extrait des carottes par mise en solution dans un solvant puis séparé par distillation sous vide.Si l'on considère les liants obtenus par extraction, celui qui a été récupéré dans la couche supérieure par le CRR a une pénétration plutôt basse ($21 \cdot 10^{-1}$ mm).

Figure IV.6 : Teneur en liant

	CRR	BAST	LAVOC	Moyenne
Teneur en liant [% de la masse d'enrobé]				
couche sup.	3.99	3.70	3.92	3.87
inf.	4.27	3.60	3.79	3.89

Une étude complémentaire effectuée par le LAVOC sur ce liant fait état d'un comportement rhéologique étonnant, très visqueux à basse température et fluide à haute température.

Figure IV.7 : Caractéristiques des liants

	CRR	BAST	LAVOC	Moyenne
Température Anneau + Bille [°C]				
couche sup.	46.0	48.5	50.5	48
inf.	48.0	49.0	49.5	49
Pénétration à 25 °C [10^{-1} mm]				
couche sup.	21	56	51	43
inf.	45	55	43	48

IV.3.3 Modules

IV.3.3.1 Introduction

Deux laboratoires de recherche, CRR et BAST, ont déterminé les modules du béton bitumineux à l'aide de trois méthodes différentes. Les résultats obtenus présentent très peu de dispersion et décrivent le comportement de ces matériaux pour différents temps de chargement et différentes températures. Le CRR a également tiré des conclusions en ce qui concerne le comportement à la fatigue de ces matériaux bitumineux.

IV.3.3.2 Modules déterminés par le CRR (Belgique)

La détermination du module et du comportement à la fatigue a été étudiée sur des éprouvettes découpées dans des plaques provenant du revêtement du tronçon d'essai de Nardo et comprenant des matériaux bitumineux des couches de surface et de base.

Des mesures ont été menées en utilisant la machine de fatigue par flexion alternée du Centre de Recherches Routières (CRR) en collaboration avec le LAVOC à Lausanne.

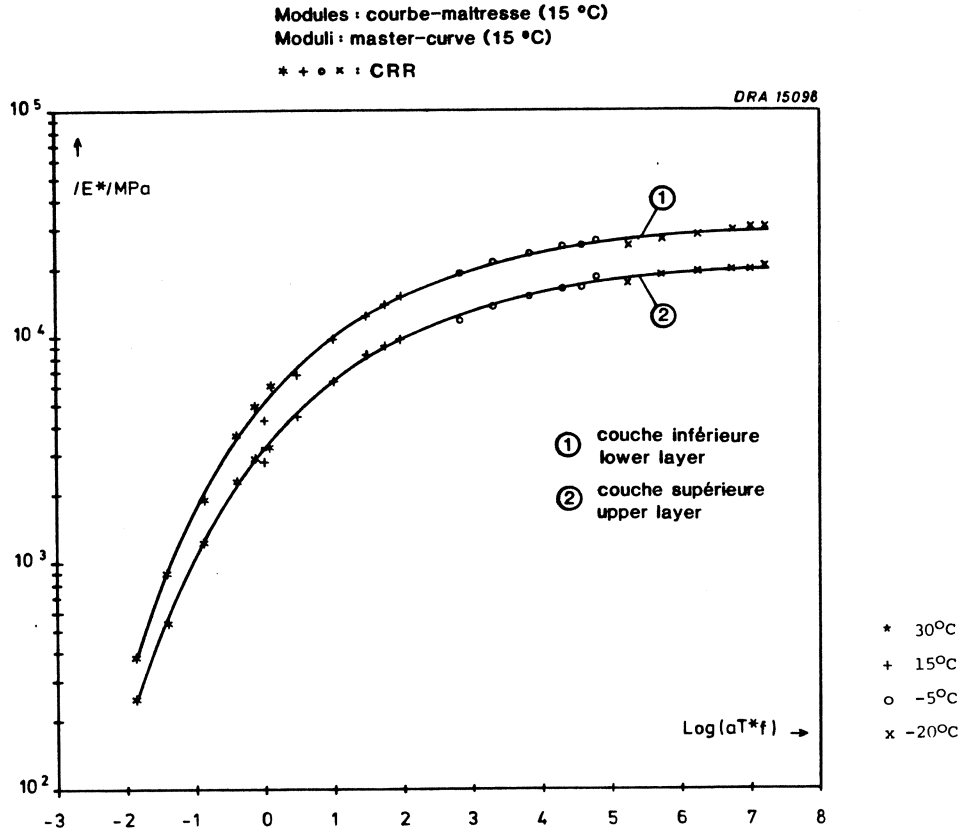
Les modules de chaque couche ont été déterminés en imposant une flexion sinusoïdale à des éprouvettes trapezoïdales encastrées à leur base. Les conditions d'essai retenues sont les suivantes :

-- fréquences: 1, 3, 10, 56, 91 Hz
-- températures: - 20°, - 5°, + 15°, + 30 °C

La figure IV.8 donne une synthèse des résultats obtenus: le diagramme représente les courbes maîtresses du module complexe |E*| à la température de référence de 15 °C pour les couches de surface et de base. Dans cette figure, le paramètre αT est donné par la relation expérimentale suivante :

$$\alpha T = \exp 2.5179 \cdot 10^4 \, (1/T - 1/Ts)$$

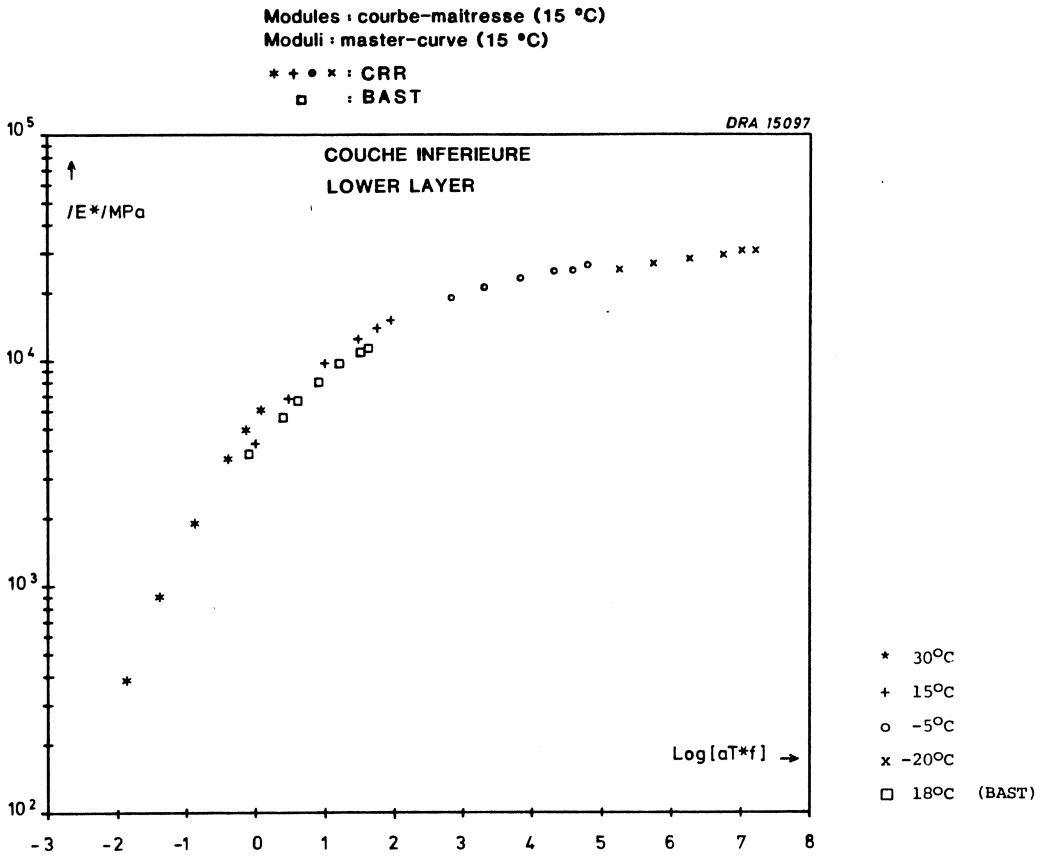
Figure IV.8 :



Etant donné leur composition différente, les deux couches ont également des modules différents : le module de la couche de base est 1,55 fois plus grand que celui de la couche de surface, quelle que soit la température et la fréquence.

La figure IV.9 donne la courbe maîtresse du module de la couche de base à la température de référence de 15 °C ainsi que les modules (valeurs moyennes) obtenus au BAST sur la base des essais de compression répétée. Il est important de remarquer l'excellente concordance des résultats obtenus par ces deux méthodes différentes.

Figure IV.9 :

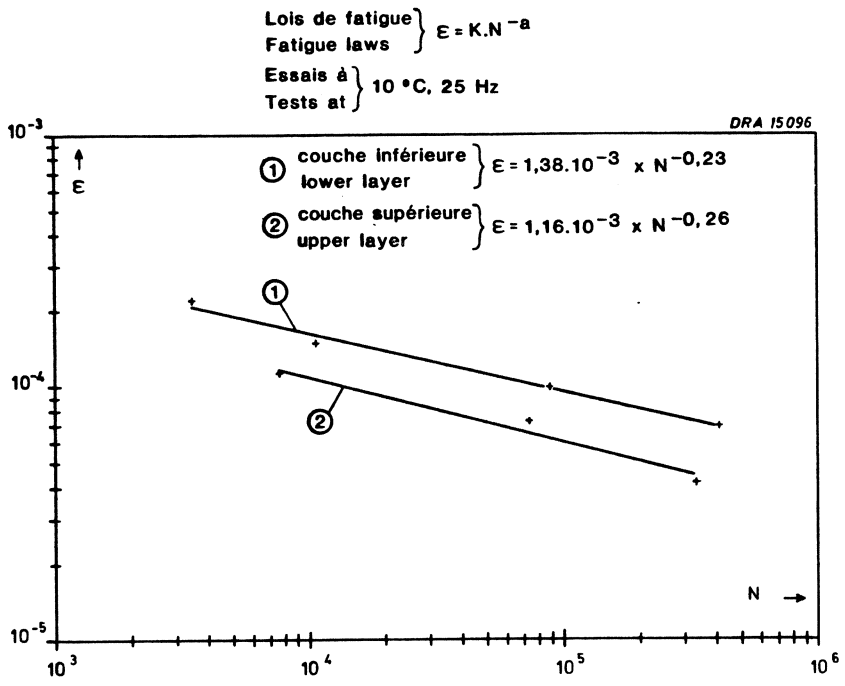


La figure IV.10 donne les lois de fatigue des deux couches qui sont de la forme $\epsilon = k \cdot N^{-a}$

où ϵ = la déformation entraînant la rupture après N chargements.

Ces lois ont été obtenues par des essais de flexion à déformation contrôlée sous une charge sinusoïdale à une température de 10 °C et à une fréquence de 25 Hz.

Figure IV.10 :



IV.3.3.3 Modules déterminés par le BAST (Allemagne)

Pour mesurer le module d'élasticité en laboratoire, les éprouvettes ont été soumises à une certaine charge et la déformation en résultant a été mesurée. En tenant compte d'un facture de forme (facteur du type de chargement et de la forme de l'éprouvette), le module d'élasticité peut être calculé à partir de cette charge et de cette déformation. Deux types de charge ont été utilisés au BAST :

1) Lors de l'essai de compression, une extrémité des éprouvettes cylindriques était collée sur un support et l'autre extrémité soumise à une charge sinusoïdale axiale. La déformation longitudinale (dans ce cas uniquement pour la couche de base) était mesurée à l'aide de quatre jauges de déformation.

2) Pour les essais de flexion, une extrémité des éprouvettes de section carrée (4 cm x 4 cm x 16 cm) a été collée sur un support et l'autre extrémité soumise à une charge sinusoïdale perpendiculaire. La déflexion était mesurée à l'aide d'une jauge de déformation.

Pour les deux types de chargement, la charge sinusoïdale avait une fréquence variant de 2 à 120 Hz, la température étant maintenue constante (± 0,2 %) au cours d'un essai et pouvant varier de - 20 °C à + 40 °C selon les essais. Les éprouvettes pour les essais de flexion sont fixées de telle façon que la direction de chargement corresponde à celle rencontrée dans la superstructure.

Résultats

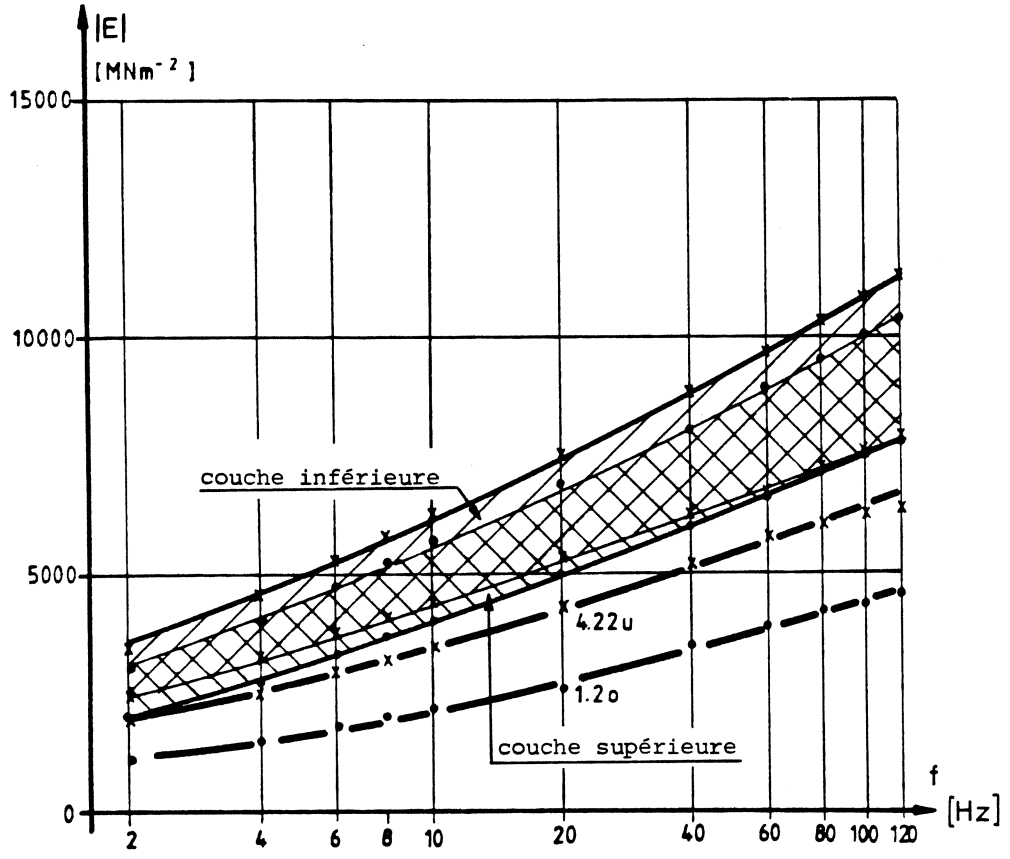
Quatre éprouvettes ont été découpées dans les carottes No 1, 3,4 6, 7, 8, 17 et 19 pour obtenir si possible suffisamment de résultats pour caractériser l'ensemble du tronçon.

En ce qui concerne la flexion, trois éprouvettes ont été soumises à l'essai dans un domaine de température variant de - 20 ° à + 40 °C, deux autres entre 0° et + 40 °C et le reste à 20 °C seulement.

En ce qui concerne la compression, une éprouvette a été soumise à l'essai dans un domaine de température variant de 0° à + 40 °C et quatre éprouvettes à 18 °C.

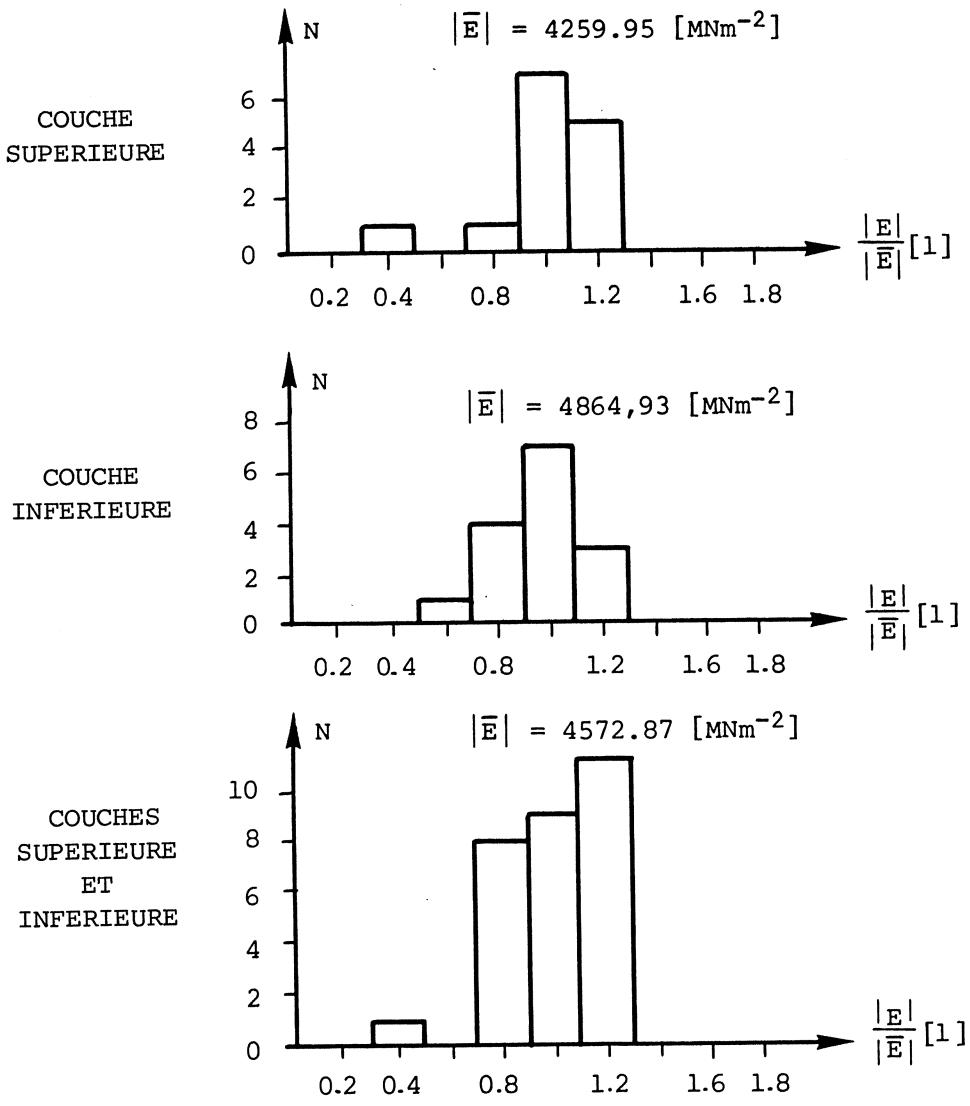
Si l'on considère l'essai de flexion, les valeurs de |E| (module complexe $|E| = \sqrt{E_R^2 + E_J^2}$) à la température de 20 °C sont données à la figure IV.11. Sur cette figure, il est possible de distinguer deux zones, l'une pour la couche de surface, l'autre pour la couche de base, zones qui diffèrent très peu l'une de l'autre. Les résultats obtenus sur deux éprouvettes présentant des valeurs relativement basses (éprouvettes 4.22 en bas et 1.2 en haut) ne sont pas reportés dans cette figure.

Figure IV.11 : Relation entre les modules |E| et les fréquences d'essais



En prenant par exemple les valeurs de $|E|$ à une fréquence de 8 Hz et 20 °C par rapport à $|\bar{E}|$ valeur moyenne correspondante, la distribution des rapports $|E|/|\bar{E}|$ pour les couches de surface et de base pour l'ensemble des deux couches est donnée à la figure IV.12.

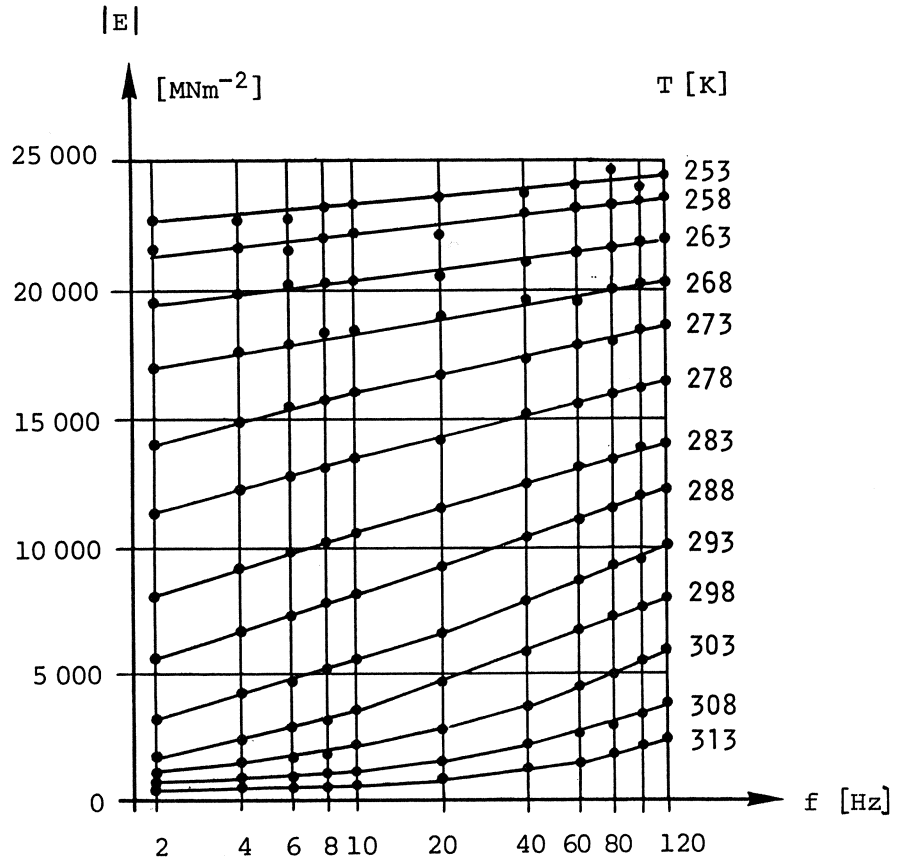
Figure IV.12 : Distribution des valeurs relatives des modules $|E|/|\bar{E}|$



La variation est plus grande pour la couche de surface que pour la couche de base. Le module complexe présente manifestement une limite supérieure puisque les distributions données dans la figure IV.12 ne sont pas symétriques.

A titre d'exemple, le module $|E|$ de l'éprouvette 3.2 u en fonction de la fréquence et de la température est donné à la figure IV.13.

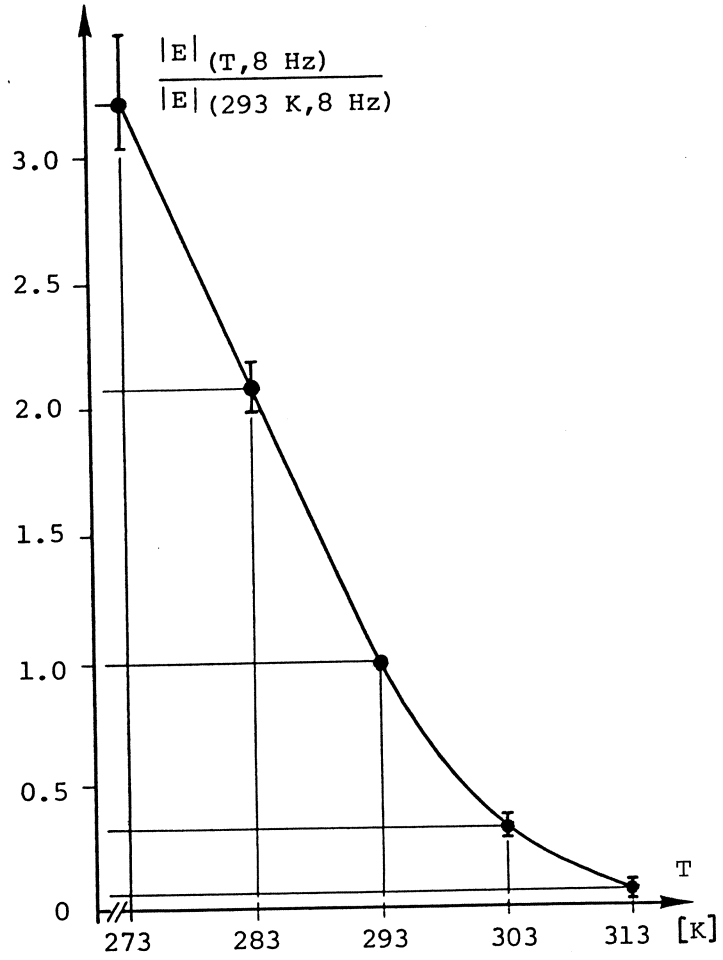
Figure IV.13 : Relation entre la fréquence et la température (exemple: échantillon 3.20 u)



A la fréquence de 8 Hz, le rapport entre le module d'élasticité à différentes températures et le module à la température de référence de 20 °C est donné à la figure IV.14. La relation est valable pour les deux couches. Il en est de même pour l'essai de compression.

Figure IV.14 : Relation entre le module |E| et la température, par rapport à une température de référence de 20 °C (293 K), pour les 2 couches et pour une fréquence d'essai de 8 Hz

T [°C]	T [K]	$\frac{\lvert E\rvert_{(T,8\ Hz)}}{\lvert E\rvert_{(293\ K,8\ Hz)}}$
15.0	288.0	1.54
18.0	291.0	1.23
20.0	293.0	1.00
24.0	297.0	0.65
28.0	301.0	0.41
30.0	303.0	0.32
32.0	305.0	0.26
35.0	308.0	0.18



IV.3.3.4 Conclusions

Parmi les résultats de la détermination du module d'élasticité des matériaux bitumineux de Nardo, deux d'entre eux présentent un intérêt particulier :

-- le module d'elasticité proprement dit, qui peut être utilisé pour le calcul des déformations sous l'effet du véhicule utilisé lors d'essais à l'aide de méthodes de calcul adéquates, et

-- la variation du module en fonction de la température de la couche de base.

L'influence de la température est donnée à la figure IV.14 et, comme indiqué précédemment, cela est valable pour les deux couches, l'influence de la fréquence étant faible.

Comme dans le cas des modules, les différences de composition des mélanges des deux couches influencent le comportement à la fatigue: pour un allongement donné, la durée de vie (nombre de cycles à la rupture) est environ 10 fois plus grande pour la couche inférieure (couche de base) que pour la couche supérieure (couche de surface). Cela illustre le rôle important de la teneur en vides sur la résistance à la fatigue et la nécessité à la fois d'une formulation adéquate ainsi que d'un bon compactage.

IV.4 CONTROLE DE L'HOMOGENEITE

Les tests de chargement dynamique entrepris sur le tronçon d'essai de Nardo avec deux matériels différents, un déflectomètre à boulet Dynatest 8000 et le vibreur lourd de la BAST, avaient pour but principal de vérifier l'homogénéité des couches anciennes de la superstructure (la couche de fondation en grave concassée reposant sur l'infrastructure rocheuse).

Ces essais ont été effectués parce qu'il n'avait pas été possible de réaliser l'essai Benkelmann sur la grave concassée et le béton bitumineux. Par une analyse appropriée de la courbe des déflexions mesurée lors de l'utilisation des deux appareils, l'influence relative et donc les modules des différentes couches peuvent être calculés. En ce qui concerne les modules de béton bitumineux déterminés par un chargement dynamique, cette information complétera les caractéristiques déjà mentionnées aux paragraphes IV.2 et IV.3 sur la qualité et l'homogénéité du matériau en place.

IV.4.1 Essais au déflectomètre à boulet

IV.4.1.1 Description de l'essai et résultats

L'après-midi du 11 avril et le matin du 12 avril 1984, la Societa Autostrade a mis à disposition son déflectomètre à boulet (Dynatest 8000) pour effectuer des essais. Ceux-ci ont été entrepris avec une plaque d'un diamètre de 300 mm et la plupart d'entre eux à un niveau de contrainte (σ_o) d'environ 0,7 MPa, ce qui correspond à une charge totale d'environ 50 kN, c'est-à-dire un peu moins que la charge d'un jumelage de l'essieu arrière des camions. Les déflexions ont été mesurées aux distances suivantes du centre de la plaque: 0 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm, 900 mm, 1'200 mm et 1'500 mm. Etant donné la présence de la roche à une profondeur indéterminée, les déflexions mesurées à 1'200 mm et 1'500 mm du centre de la plaque n'ont pu être utilisées pour le calcul des modules des couches de la superstructure.

L'après-midi du 11 avril, un essai au déflectomètre à boulet a été réalisé sur la zone de chacune des équipes (température moyenne du revêtement 23.2 °C).

Le matin du 12 avril (température moyenne du revêtement 15,5 °C), le déflectomètre à boulet a été mis à la disposition de toutes les équipes. En principe, trois essais ont été effectués sur chacune des zones; cependant pour l'équipe no 7, huit essais ont été réalisés aux emplacements des jauges 131, 121, 111, 101 (groupe 1) et 133, 123, 113, 103 (groupe 3).

Le 12 avril, sans doute à la suite d'un malentendu, aucun essai n'a été entrepris sur les zones des équipes Nos 1 et 2. Les positions approximatives des essais du 12 avril sont indiquées à la figure IV.15. Les résultats des essais sont donnés aux figures IV.16, IV.17 et IV.18. Pour chaque essai, trois lâchers ont été exécutés, mais seule la contrainte en MPa et les déflexions en µm du dernier lâcher, cela uniquement à la distance de 900 mm du centre de la plaque, sont indiquées dans les tableaux.

Figure IV.15a :

Cores and "falling weight" layout
Plan de carottage et "falling weight"

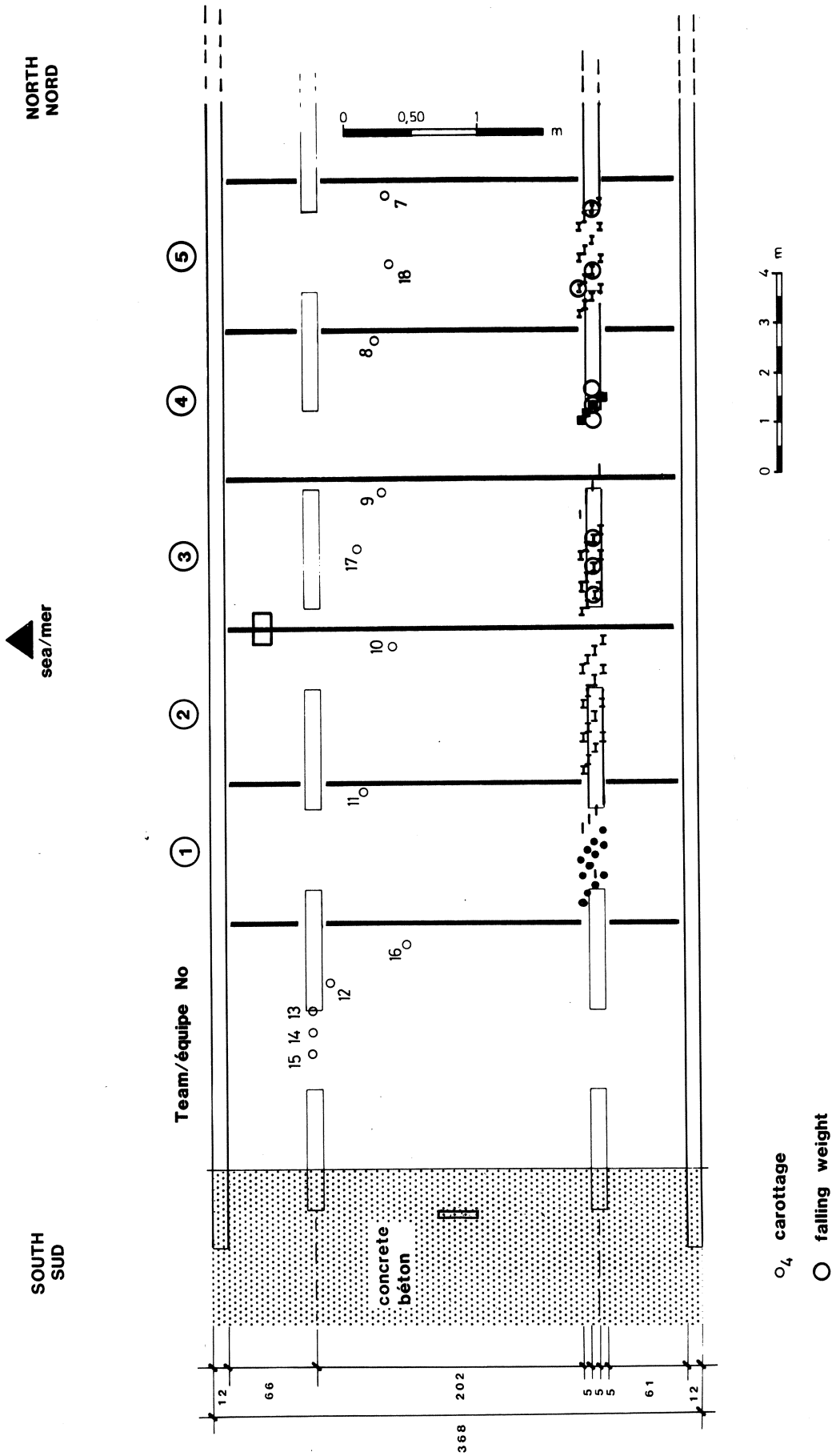


Figure IV.15b : **Cores and "falling weight" layout**
Plan de carottage et "falling weight"

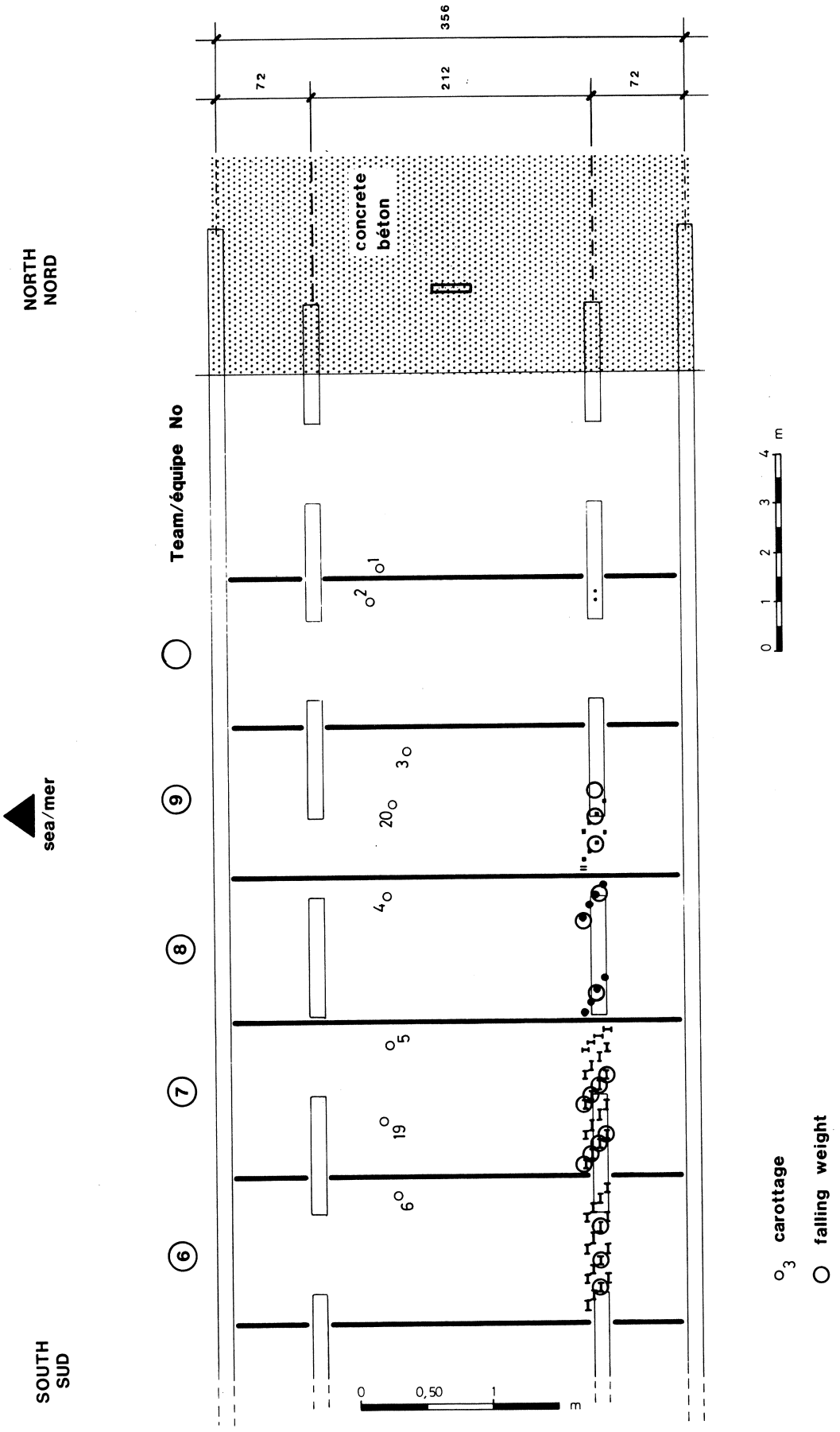


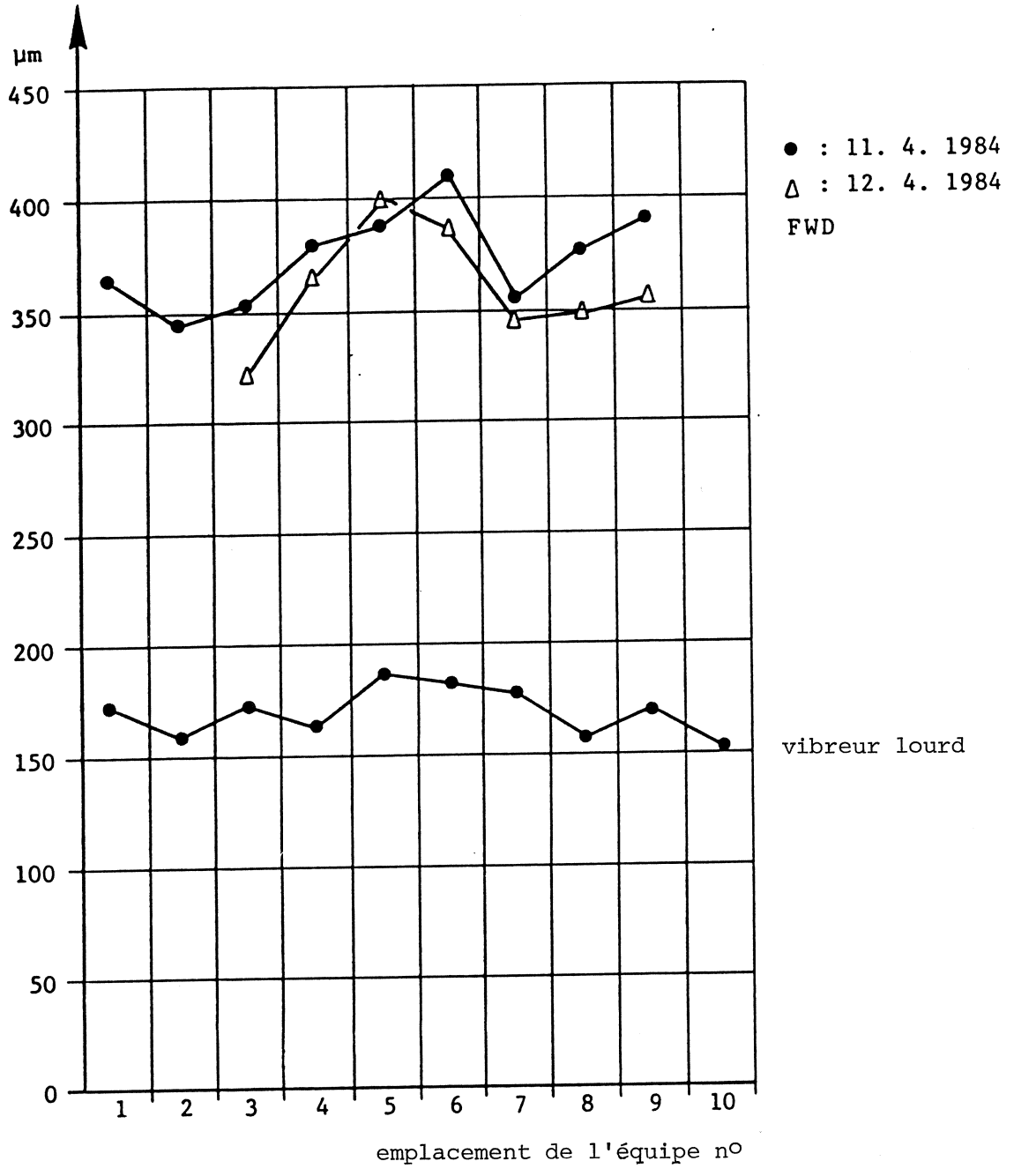
Figure IV.16 : Mesures au FWD, 11 avril (après-midi)
Température de la chaussée enregistrée par l'opérateur du FWD: 23.2 °C

équipe	contrainte	déflexion en (µm) à une distance du centre de:					
	MPa	0	300	450	600	900	(mm)
1	0.716	364	190	112	65	23	
2	0.725	344	180	110	64	23	
3	0.707	352	192	120	73	24	
4	0.714	379	214	128	74	22	
5	0.712	389	217	134	79	25	
6	0.702	409	230	145	88	25	
7	0.711	355	209	131	81	25	
8	0.702	376	209	134	86	31	
9	0.708	389	227	143	91	34	

Figure IV.17 : Mesures au FWD, 12 avril (matin)
Température de la chaussée enregistrée par l'opérateur du FWD: 15.5 °C

équipe	position	contrainte	déflexion en (µm) à une distance du centre de:					
		MPa	0	300	450	600	900	(mm)
	1	0.716	327	202	136	89	33	
3	2	0.722	330	196	133	87	31	
	3	0.735	305	197	134	88	33	
	1	0.730	361	227	148	93	30	
4	2	0.728	366	226	147	92	30	
	3	0.725	364	219	142	88	26	
	1	0.716	392	236	157	101	35	
5	2	0.712	398	239	160	105	37	
	3	0.714	403	243	162	105	35	
	1	0.712	381	240	164	106	37	
6	2	0.706	396	249	167	111	38	
	3	0.709	379	237	162	106	38	
	1	0.697	341	214	147	96	35	
	2	0.701	336	212	144	95	35	
	3	0.702	337	206	144	93	33	
7	5	0.709	330	205	139	91	34	
	6	0.709	350	208	140	91	33	
	7	0.707	353	211	142	92	34	
	8	0.707	355	211	141	92	35	
	1	0.702	364	220	150	101	42	
8	2	0.699	366	222	152	101	41	
	3	0.713	313	203	140	92	38	
	1	0.712	355	232	160	107	44	
9	2	0.708	354	233	158	106	43	
	3	0.710	357	222	151	102	41	

Figure IV.18 : Déflexions maximales mesurées lors des essais de chargement dynamique (résultats du vibreur lourd BAST extrapolés pour une charge de 50 kN)



IV.4.1.2 Calcul des modules

Etant donné la faible profondeur de la roche gréseuse, une version spéciale du programme ELMOD a été utilisée pour le calcul des modules. Cette version calcule d'abord la profondeur équivalente de la roche et considère que le matériau sous ce niveau est indéformable.

Les matériaux situés au-dessus de la roche gréseuse ont été assimilés à un système tricouche. Ces couches sont constituées par le béton bitumineux, la grave et le sol de fondation. L'épaisseur de la couche de béton bitumineux a été déterminée sur des carottes prélevées dans le tronçon d'essai. L'épaisseur moyenne, calculée sur six carottes provenant des zones 1 à 6, est de 120 mm avec une erreur standard de 2,6 mm. L'épaisseur calculée sur la base des six éprouvettes provenant des zones 7 à 9 est de 136 mm avec une erreur standard de 2,7 mm.

Lors du calcul du module (et également pour un calcul des déformations), une épaisseur de béton bitumineux de 120 mm a été utilisée pour les zones 1 à 6, et de 135 mm pour les zones 7 à 10. Pour toutes les équipes, l'épaisseur de la couche en grave a été fixée à 170 mm.

Les résultats du calcul effectué avec ELMOD sont donnés aux figures IV.19 et IV.20.

Figure IV.19 : Modules et épaisseur équivalents calculés avec ELMOD, 11 avril (après-midi) 23.2 °C

Equipe	E1, MPa	E2, MPa	E3, MPa	He, mm
1	3167	352	123	1239
2	3473	390	124	1219
3	4056	329	104	1192
4	4637	214	98	1141
5	4158	248	95	1171
6	4202	219	80	1123
7	4535	191	91	1159
8	3050	313	92	1253
9	3593	236	90	1283

E1 représente le module de la couche de béton bitumineux
E2 représente le module de la couche de grave
E3 représente le module du sol d'infrastructure qui ici est constitué par un remblai en grave placé sur la roche gréseuse.

Figure IV.20 : Modules et épaisseur équivalents calculés avec ELMOD, 12 avril (matin) (15.5 °C)

Equipe	Position	E1, MPa	E2, MPa	E3, MPa	He, mm
	1	5909	328	93	1244
3	2	6751	286	93	1276
	3	8626	296	95	1286
	1	6940	209	81	1181
4	2	6470	203	84	1187
	3	6034	212	84	1139
	1	5259	242	78	1225
5	2	5053	251	76	1236
	3	5187	228	73	1200
	1	6202	237	72	1230
6	2	5898	231	68	1217
	3	5962	260	74	1249
	1	5164	257	82	1286
	*2	5422	247	82	1271
	3	4990	280	82	1241
7	4	5136	237	78	1219
	*5	5280	268	88	1283
	6	4436	255	89	1258
	*7	4449	249	89	1273
	8	4230	266	91	1299
	1	4152	287	89	1397
8	2	4268	265	86	1367
	3	6333	282	94	1375
	1	5716	236	81	1383
9	2	5920	216	81	1366
	3	4749	280	84	1356

Tous les modules sont exprimés en MPa et représentés à la figure IV.20 en fonction de la position des essais. La dernière colonne indique la profondeur équivalente de la roche gréseuse (He) en mm. La profondeur équivalente est calculée grâce à la formule suivante :

$$He = 0.8 \times H_{bit.mix} \times \sqrt[3]{E1/E3} + 0.8 \times H_{\substack{grave \\ concas.}} \times \sqrt[3]{E2/E3} + H_{remblai}$$

Les modules du béton bitumineux peuvent être comparés avec ceux déterminés par le BAST par des essais de compression sur des éprouvettes. A 18 °C, le BAST a mesuré des valeurs allant environ de 7'000 MPa à 9'000 MPa pour une fréquence de 20 Hz.

IV.4.2 Mesures au vibreur lourd

Le vibreur lourd du BAST a été utilisé sur les neuf zones du tronçon d'essai de Nardo pour mesurer les déflexions d'une manière assez semblable à celle de la méthode "Dynaflect". La fréquence de vibrations utilisée était de 8 Hz +/- 0,1 Hz. L'amplitude de la charge était de 2'150 N. La masse du vibreur était de 20'000 N, et la charge appliquée à la surface de la chaussée à l'aide d'une plaque de chargement d'un diamètre de 30 cm. Cette variation de la fréquence de +/- 0,1 Hz entraîne une erreur dans l'amplitude de la charge pouvant atteindre +/- 2,5 %, la force variant avec le carré du nombre de tours étant donné l'excentricité du vibreur.

La déflexion verticale était mesurée sur la plaque et à des distances de 30, 60, 90 et 120 cm de l'axe de la plaque à l'aide de géophones. Les géophones avaient été calibrés en laboratoire pour des fréquences de 8 Hz.

L'erreur maximale mesurée lors de la détermination de la courbe de déflexion est donc de +/- 3,5 %. Le vibreur était positionné sur la ligne jaune Est au milieu de chacune des zones et la courbe de déflexion était mesurée dans trois directions, Nord, Ouest et Sud.

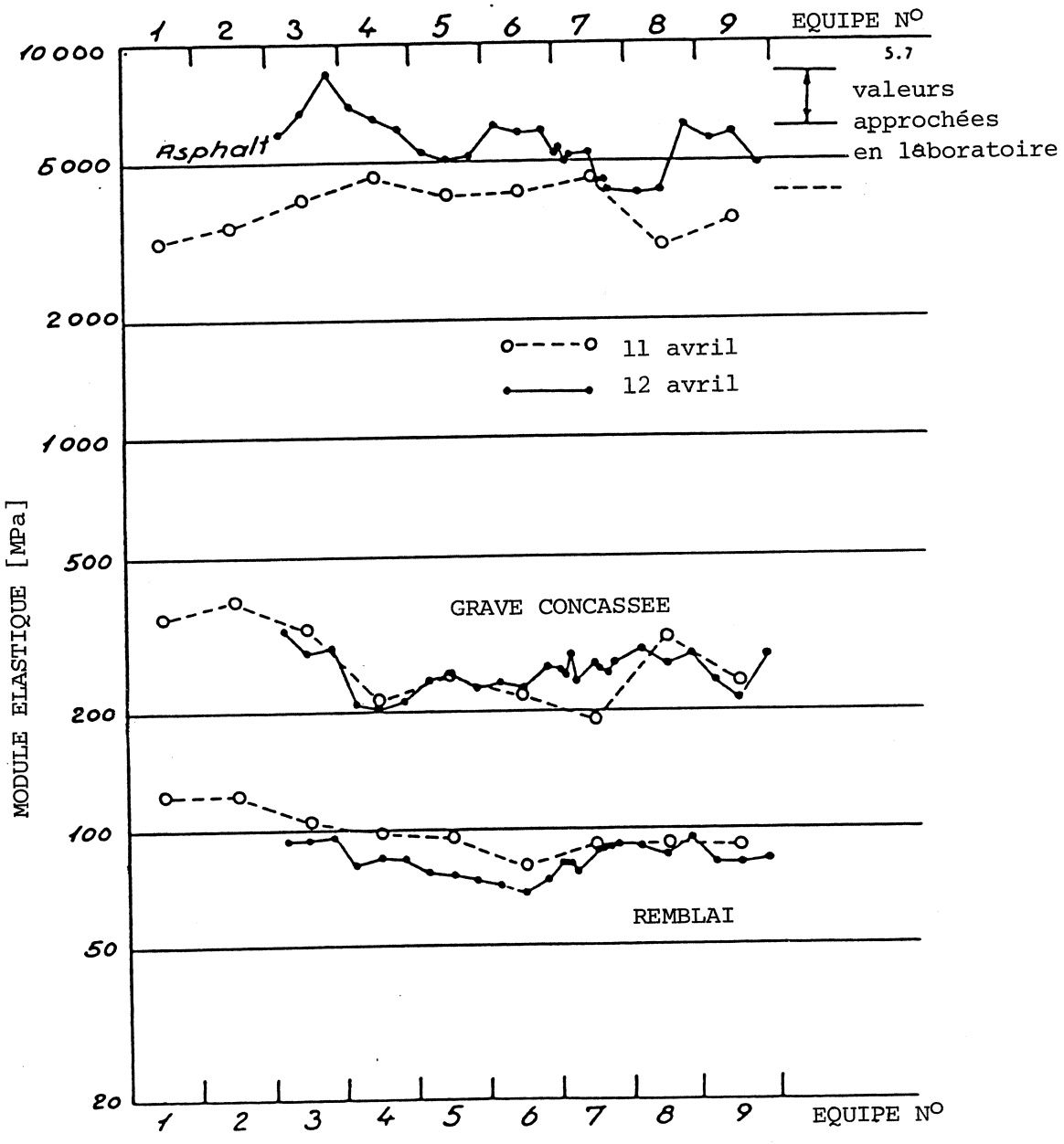
Les résultats donnés à la figure IV.21 découlent d'une extrapolation linéaire pour une charge de 50 kN, cela afin d'avoir des valeurs du même ordre de grandeur que celles mesurées avec le déflectomètre à boulet. Dans ce cas, les déflexions mesurées avec le vibreur lourd sont nettement plus basses que celles mesurées avec le déflectomètre à boulet. Cependant, il faut se souvenir que la charge réelle du vibreur lourd est nettement plus basse et que la présence d'un remblai entre la roche et la superstructure, ainsi que les différences de position des mesures peuvent avoir entraîné cette faible corrélation entre les deux méthodes d'essai. Toutefois, ces deux méthodes montrent que la capacité portante de l'ensemble de la superstructure n'est pas homogène.

Les essais du BAST ont été effectués seulement sur la couche inférieure du béton bitumineux. Les essais entrepris au CRR ont montré que le module de la couche supérieure atteint 60 à 65 % de la valeur de celui de la couche inférieure. En retenant cette valeur de 65 % et des épaisseurs de 50 mm et 80 mm pour les couches supérieures et inférieures, le module de l'ensemble des 2 couches atteint 5'970 à 8'110 MPa. Le module au déflecteur à boulet varie de 4'200 MPa à 8'600 MPa, la température étant très proche de 15,5 °C.

A 23 °C, le BAST a obtenu un module d'environ 5'000 MPa, soit un module pour l'ensemble des deux couches d'environ 4'270 MPa, alors que l'essai au déflectomètre à boulet a donné 3'900 MPa.

Il est raisonnable de penser que les essais au déflectomètre à boulet donnent des valeurs légèrement plus basses que les essais en laboratoire, les essais au déflectomètre prenant en compte les défauts de compactage ou d'adhésion entre les couches de béton bitumineux, ce qui n'est pas le cas des essais de laboratoire.

Figure IV.21 : Module élastique d'après l'essai au FWD



Chapitre V

CONDITIONS D'ESSAI

V.1 DEFINITIONS

Le terme "conditions d'essai" recouvre les paramètres ayant une influence directe sur les passages des charges, en particulier:

-- la masse et les caractéristiques géométriques de la charge,
-- la vitesse de passage de chaque charge,
-- la distribution transversale des passages des charges,
-- la température de l'air et du béton bitumineux durant les périodes de charge.

Les trois derniers paramètres sont de nature variable ainsi les méthodes de mesures et les données récoltées sont présentées. Les effets de quelques-unes de ces variations sont discutés au vu de leur importance sur les résultats des mesures de déformation.

V.2 CHARGE: MASSE ET CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES

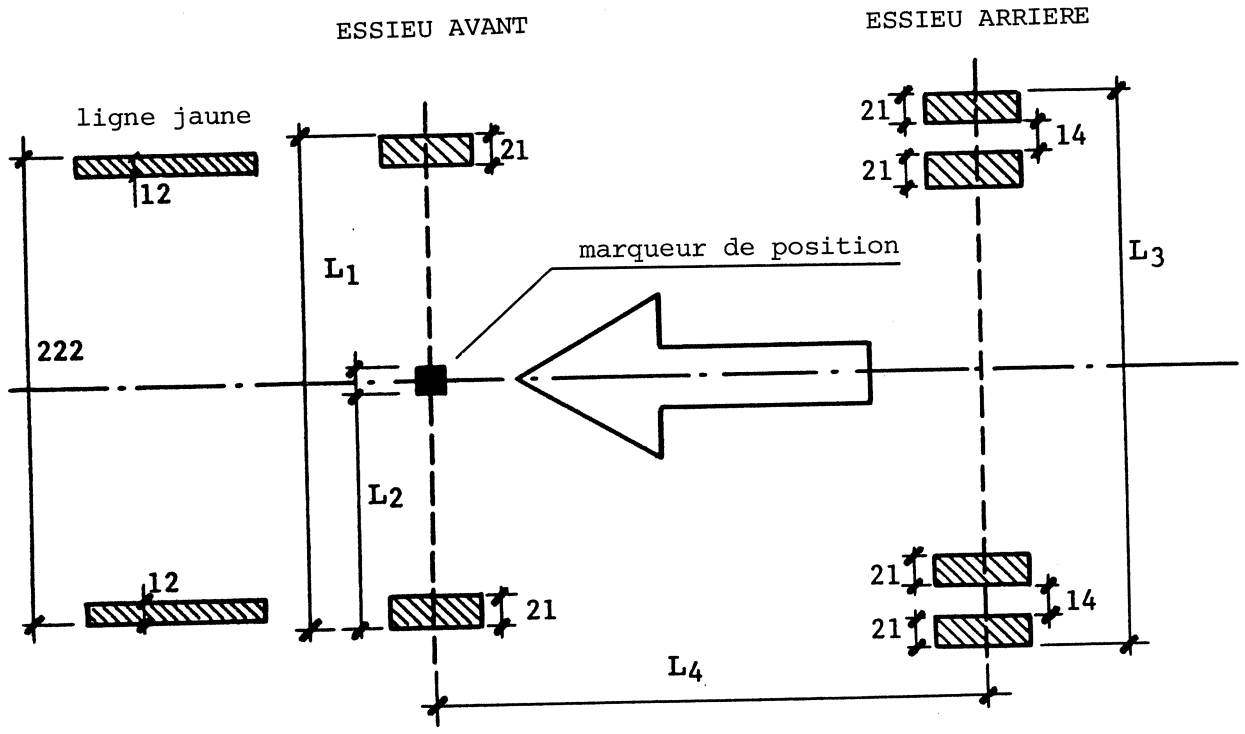
Trois camions ont été mis à disposition par la direction de la piste (SASN) pour le programme de charge de l'OCDE. Les camions étaient désignés par les lettres A, B, et C correspondant à l'ordre de passage durant tout le programme des essais. Comme indiqué au chapitre 2, il faut se souvenir que la circulation des camions se faisait du sud en direction du nord le lundi 9 avril et le mercredi 11 avril, et du nord en direction du sud le mardi 10 avril.

Les véhicules A et C étaient identiques, cependant le véhicule B avait une voie avant plus étroite et un plus grand empattement. Les caractéristiques géométriques des trois véhicules ont été mesurées sur place et sont données à la figure V.2. Les charges par essieu (masse en kg) et la pression des pneumatiques sont données à la figure V.1 ci-après.

Figure V.1 : Masse et pression des pneumatiques des véhicules d'essai

Camion		A	B	C
Masse, essieu avant	kg	5500	6000	5500
Masse, essieu arrière	kg	11600	12000	11600
Pression, pneus avant	bar	7.25	8.00	7.25
Pression, pneus arrière	bar	8.00	8.00	8.00

Figure V.2 : Caractéristiques géométriques des camions



[cm]	CAMION A	CAMION B	CAMION C
L 1	230	209	230
L 2	112 - 120	112 - 119	110 - 118
L 3	239	242	239
L 4	345	380	345

V.3 VITESSE DES CAMIONS

La vitesse des véhicules de charge avait été fixée à 30 km/h pour le programme d'essai. Le module E des couches bitumineuses liées change avec la vitesse de charge et par conséquent, les déformations mesurées à la surface inférieure de la couche de base bitumineuse changent également. Connaître la vitesse des véhicules n'est pas directement nécessaire pour la comparaison des déformations mesurées par les différentes équipes qui emploient des méthodes de mesures différentes. Cependant, si la dispersion des résultats d'essai est prise en compte, les variations de la vitesse des véhicules de charge deviennent alors importantes. Pour cette raison, les vitesses des trois véhicules de charge A, B et C ont été mesurées à chaque passage.

A cet effet, on a utilisé deux barrières lumineuses espacées de 10 m et placées à la fin de la section de mesure (comprenant en particulier les zones des équipes 8 et 9). Toutefois, il n'a pas été vérifié que la vitesse mesurée pouvait être appliquée à toute la section d'essai, mais on peut assurer que les variations mesurées sur ce secteur sont représentatives de toute la section. L'équipement de mesure, décrit à la figure V.4, permet la détermination d'une vitesse à plus ou moins 0.25 km/h. La valeur moyenne et les variations pour tous les véhicules et tous les passages sont données à la figure V.3 et les valeurs détaillées des vitesses sont données à l'annexe B.1. La figure V.5 montre la distribution de la vitesse de chaque véhicule à tous les passages.

Figure V.3 : Valeur statistique pour tous les passages

Véhicule		A	B	C
Moyenne	[km.h-1]	31.6	32.3	30.6
Déviation standard	[km.h-1]	1.7	1.7	1.8
Coefficient de variation	[%]	5.4	5.2	6.0
Nombre de valeurs		77	80	85

Figure V.4 : Schéma de l'équipement de mesure de la vitesse des camions

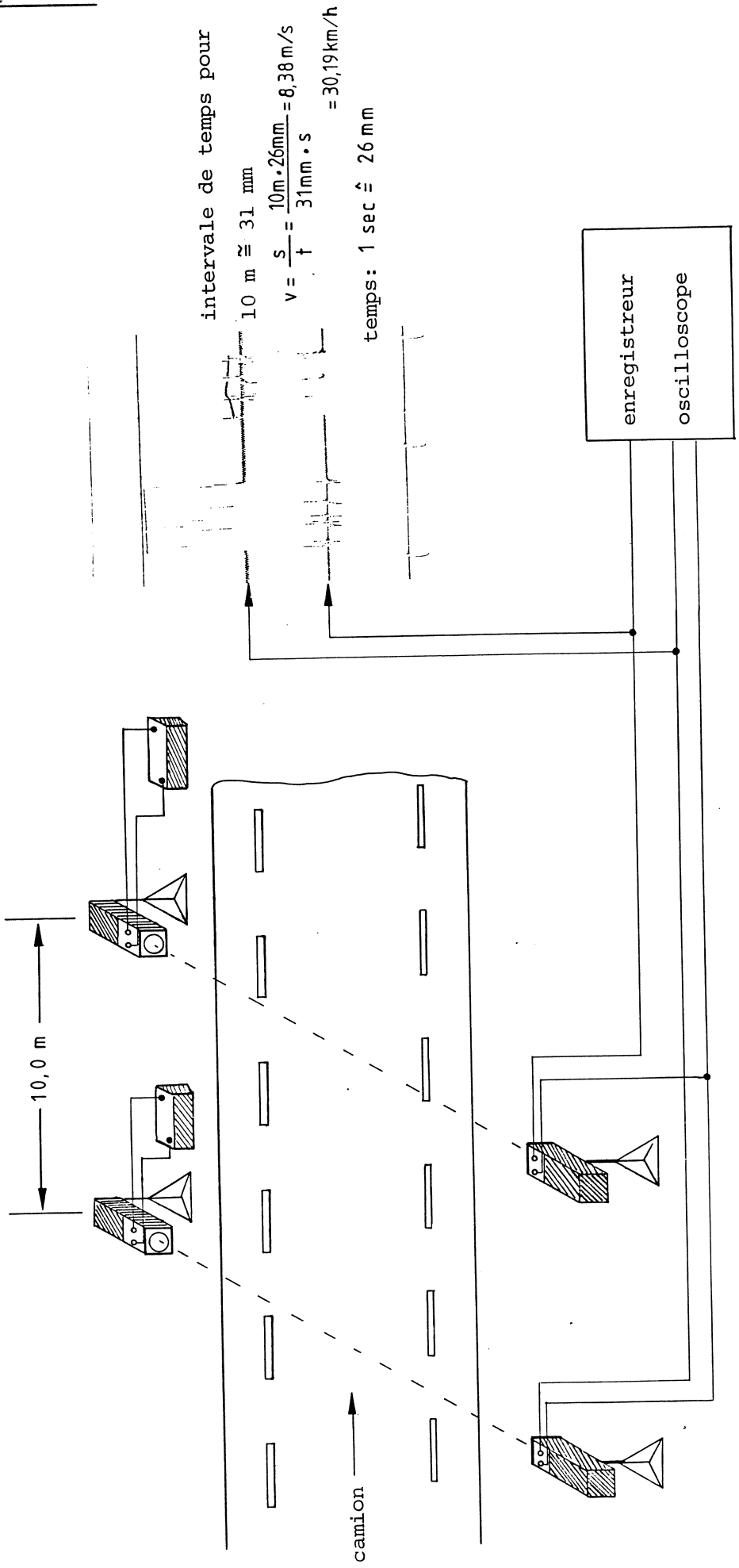
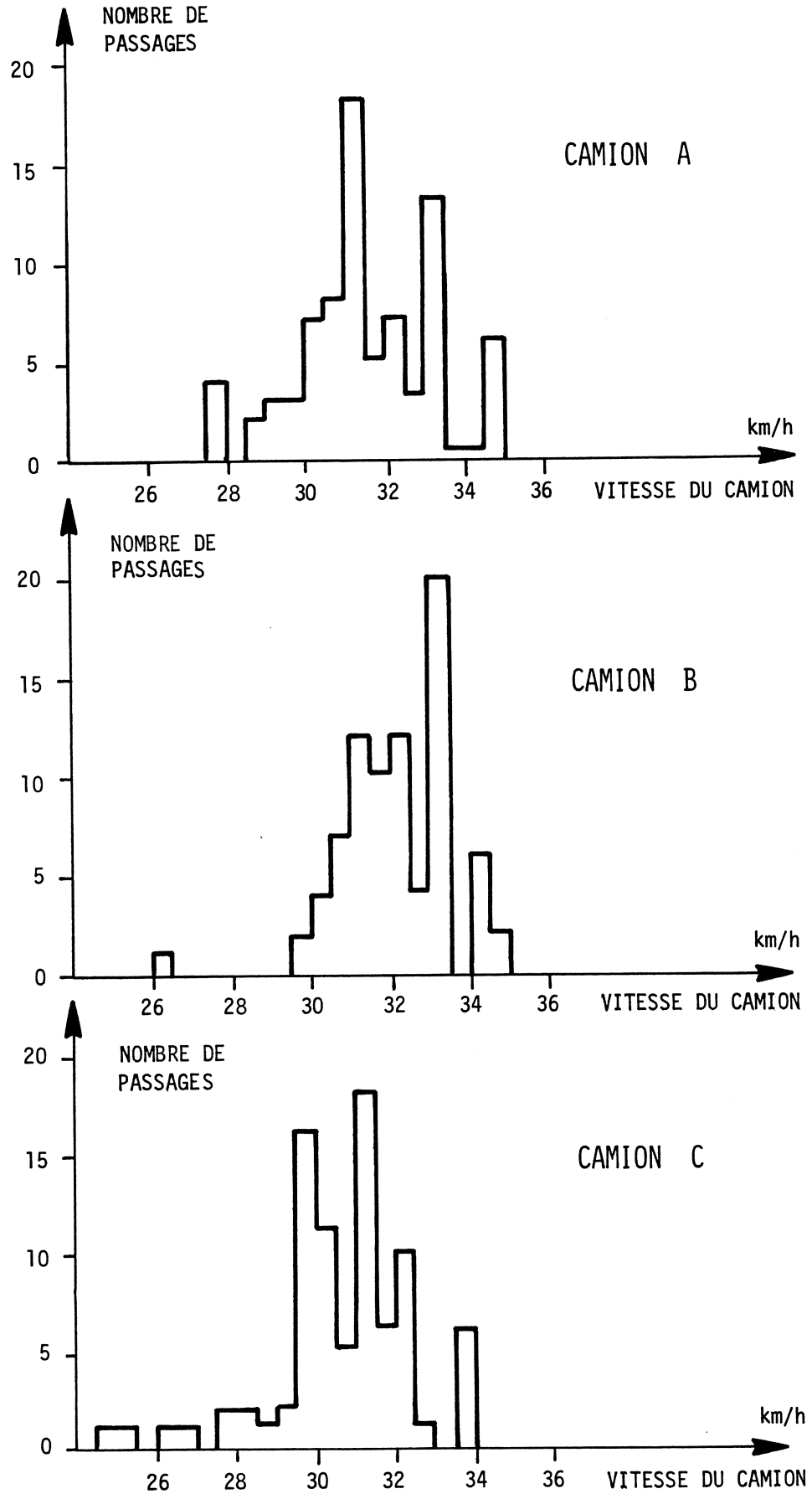


Figure V.5 : Classes de fréquence de la vitesse des camions (tous les passages)



V.4 DISTRIBUTION TRANSVERSALE DES PASSAGES DE CHARGE

La position transversale des véhicules a été mesurée aux deux extrémités de la section d'essai (au sud avant la zone de l'équipe No 1, au nord après la zone de l'équipe No 9). Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un système composé de contacts magnétiques placés au centre de la chaussée. Les contacts sont activés par une bande de métal fixée plus ou moins au centre de l'essieu avant de chaque véhicule. Le système permet le contrôle de la distribution transversale dans une plage de plus ou moins 200 mm avec une résolution de 25 mm.

La "couverture" donnée à la figure V.6 sur la ligne d'implantation des jauges est une fonction des caractéristiques géométriques des véhicules et de la position de la bande métallique sur l'essieu avant (voir figure V.2) pour chaque passage "central". Un passage est dit "central" lorsque la distance entre la bande métallique et la ligne médiane de la chaussée est de 0. Tenant compte de ces deux positions théoriques idéales, on peut s'attendre à trouver la valeur maximale de la déformation pour l'essieu arrière vers l'extérieur du profil en travers de la chaussée (lignes 0 et 1).

Sur la base des positions enregistrées pour chaque passage des véhicules aux deux extrémités de la section d'essai, 6 histogrammes de distribution transversale des passages de roues ont été établis (figure V.7). Les histogrammes donnent le nombre de passages de pneumatiques cumulés à des intervalles de 25 mm (largeur d'un pneumatique = 8 intervalles = 200 mm).

Comme supposé par la position théorique, la distribution pour la roue arrière (pour laquelle la comparaison des mesures de déformation a été faite) est quelque peu excentrée vers l'extérieur.

Figure V.6 : "Couverture" théorique de la position des jauges

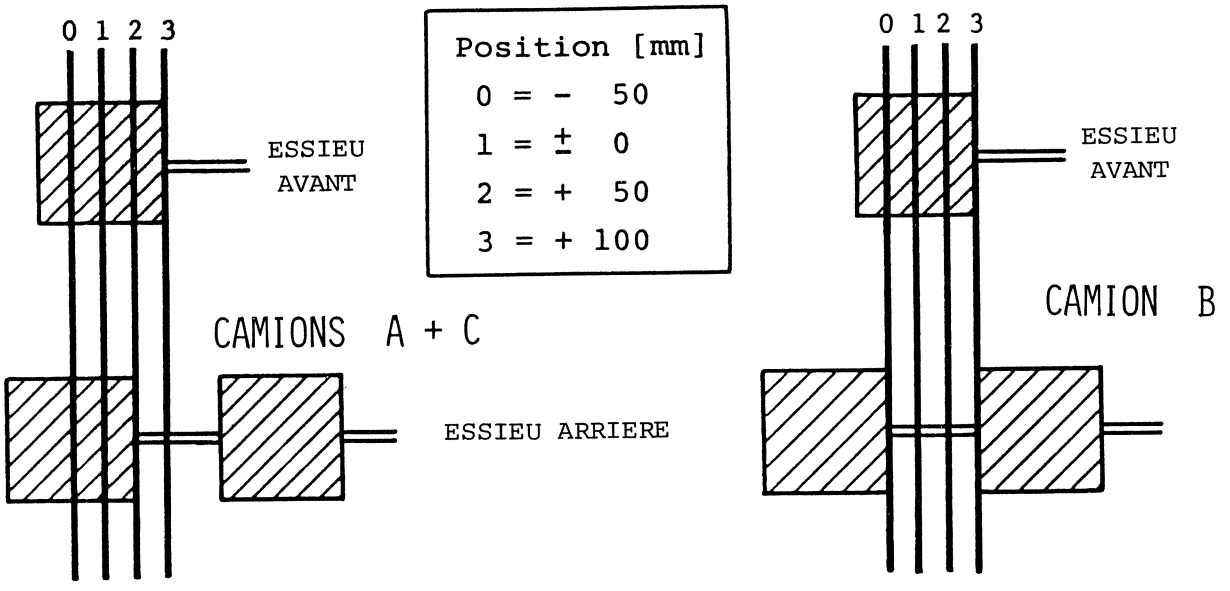
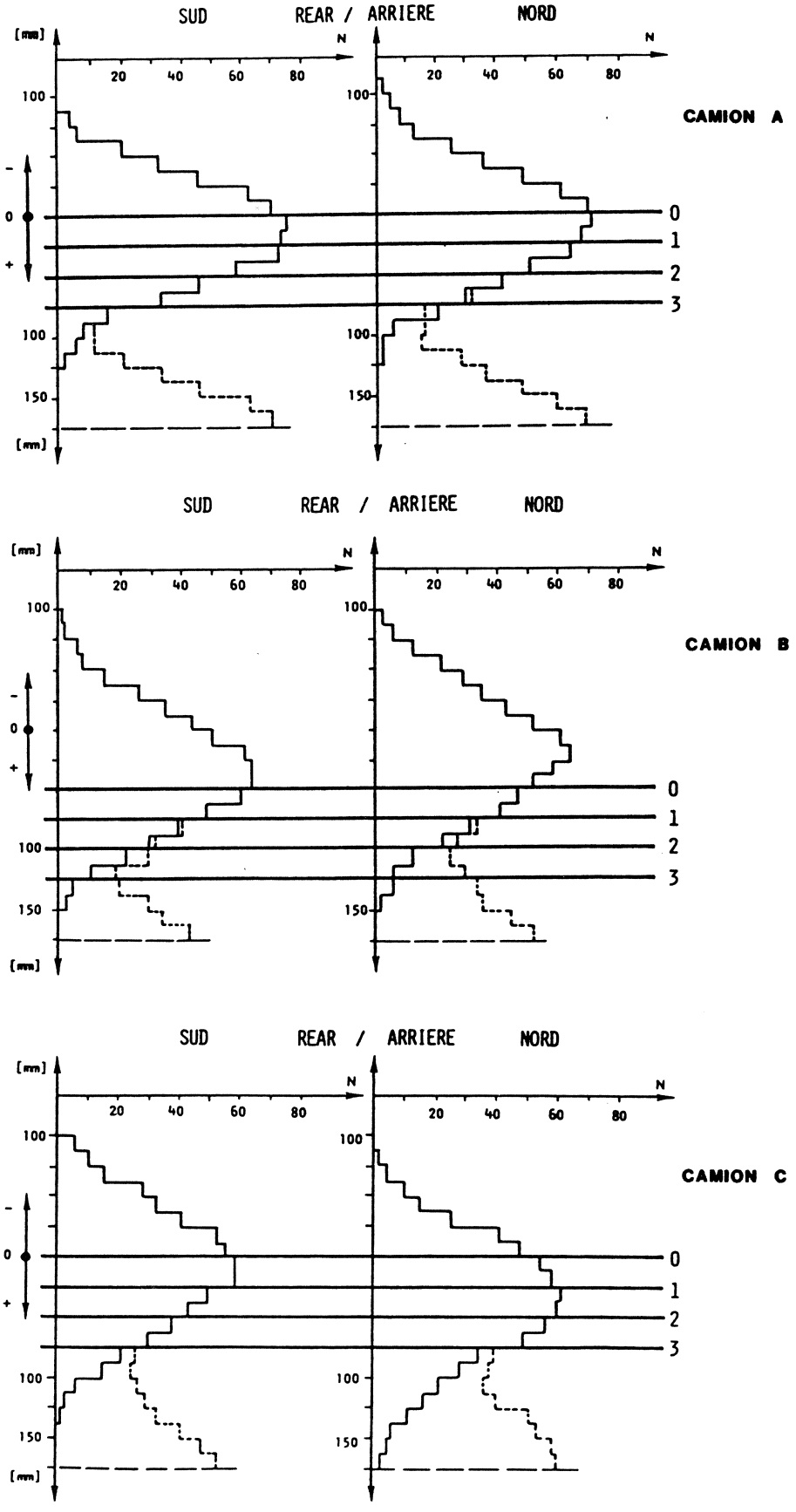


Figure V.7 : Histogrammes des passages cumulés pour l'essieu arrière



V.5 TEMPERATURES

Les températures dans les couches bitumineuses ont été mesurées par les équipes Nos 1, 3 et 9 sur leurs zones d'essai. Chaque équipe a travaillé avec la méthode et l'équipement qu'elle utilise habituellement, en particulier:

a) équipe No 1 : des thermo-couples ont été placés à une profondeur nominale de - 13 et - 5 cm dans un trou fait dans les couches bitumineuses puis rempli d'un melange bitumineux. Les capteurs étaient connectés à un enregistreur à à 4 canaux pré-programmés pour obtenir une sortie numérique des résultats.

b) équipe No 3 : les thermomètres à résistance type Pt 100 ont été protégés protégés par un tube en acier de 6 cm rempli de silicone. La connection entre entre les 3 câbles et le tube de protection a été scellée par un un tube en caoutchouc thermo-rétractable. Chaque point de mesure (- 13 cm; - 5 cm; à la surface; sous abri) était équipé de 2 capteurs. enregistreur à 40 canaux a été utilisé à 10 % de sa capacité, soit 4 canaux. Les valeurs de températures des 4 capteurs ont été enregistrées sur papier toutes les 15 minutes.

c) équipe No 9 : les thermomètres à résistance Ni 100 étaient protégés par un par un tube de cuivre rempli par une colle spéciale (HBM X60) et équipés de câbles isolés au Teflon. Les capteurs ont été placés par 2 à la surface de la fondation granulaire, entre les 2 couches bitumineuses et à un endroit ombragé pour la mesure de la température de l'air. Un capteur supplémentaire était placé aussi près que possible de la surface de la chaussée.

L'équipe No 9 présentait une méthode supplémentaire de mesure particulièrement adaptée pour instrumenter une route après sa construction. Une carotte préparée en laboratoire et contenant 4 thermomètres est placée dans un trou carotté. L'espace libre entre le trou et la carotte est ensuite rempli avec un mélange de bitume et de filler.

La position transversale des jauges de température des équipes No 3 et No 9 correspond à la ligne jaune sur la chaussée, par contre les capteurs de l'équipe No 1 sont placés très près du bord de la couche bitumineuse.

Tous les résultats des mesures de température sont inclus dans les annexes B2 et B3 et partiellement représentés graphiquement (figure V.8).

L'analyse de ces résultats montre quelques importantes différences entre les températures mesurées par les 3 équipes (plus de 10 °C entre l'équipe No 1 et l'équipe No 3). Ces différences ont été constatées durant les essais de Nardo, ainsi des tests comparatifs entre les différents systèmes ont pu être effectués. Dans un même récipient d'eau, les 3 systèmes donnaient des valeurs différentes de 0.7 °C seulement; les systèmes pouvaient donc être considérés comme suffisamment précis. Des mesures supplémentaires de contrôle avec les capteurs de l'équipe No 3 et No 9, faites dans des trous de 5 cm de profondeur sur les 2 zones d'essai des équipes, ont montré une très bonne concordance entre les 2 systèmes. Ils montrent également l'existence d'une différence de

température de 3 °C à un même instant entre les 2 zones.

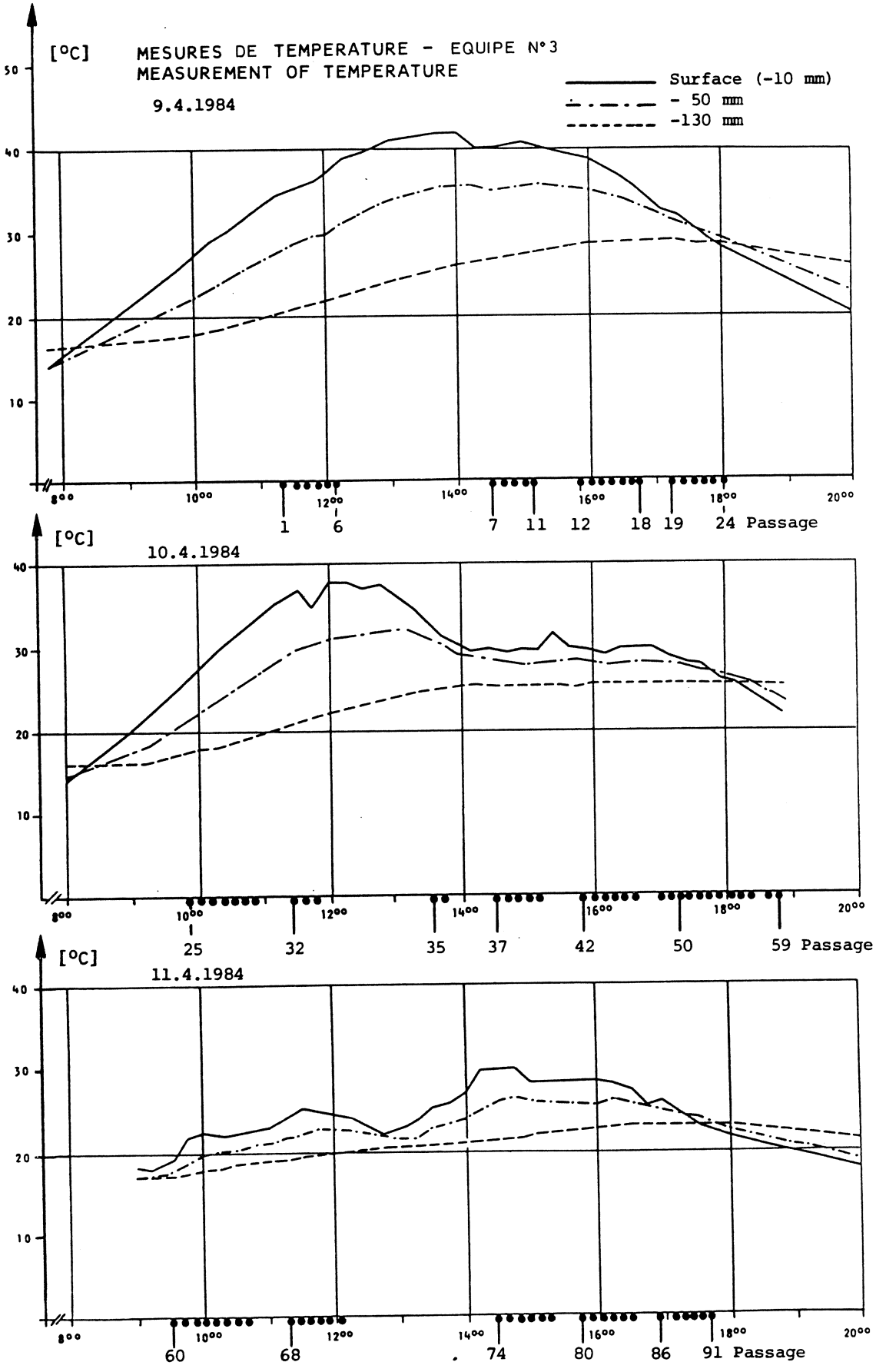
Différents facteurs peuvent être la cause d'une telle différence et donc des écarts enregistrés par différents systèmes de mesure.

Comme montré au chapitre V.2, quelques importantes variations sont le fait de l'épaisseur des couches bitumineuses. Certaines jauges de température placées à la base des couches ne sont pas nécessairement à la même profondeur. Les 12 mm de différence sur l'épaisseur totale entre les zones No 3 et No 9 sont en fait responsables de la plus grande part des différences de température sur les 2 zones.

La compacité du matériel bitumineux peut aussi avoir une influence sur les valeurs des températures mesurées, la conductibilité thermique dépendant aussi de la compacité. Les valeurs données par l'équipe No 9 pour les jauges de température encastrées dans une carotte préparée en laboratoire (avec une masse volumique plus élevée que le matériel de la chaussée d'essai) montrent toujours des valeurs de température plus élevées. Du point de vue de la compacité du matériau et de la distribution de la température, les résultats donnés par l'équipe No 1 avec les jauges insérées dans le bord de la chaussée sont discutables.

Les différentes conditions d'exposition au vent peuvent mener à des différences de température dans certains cas. Les conditions de vent au cours des essais ont varié dans le temps et ne peuvent ainsi pas être tenues pour responsables de certaines différences systématiques.

Figure V.8 : Mesures de températures par l'équipe No 3



Chapitre VI

RESULTATS DES MESURES

Comme indiqué au chapitre III, chaque pays participant a installé des jauges de déformation dans le revêtement, selon les schémas des figures III.14 et III.15.

En plus des mesures de déformation entreprises sous trafic, d'autres paramètres significatifs ont également été enregistrés; il s'agissait de la température du revêtement (mesurée à différentes profondeurs par les équipes 1, 3 et 9), de la vitesse des véhicules et de leur position transversale sur les sections d'essai.

Les techniques utilisées pour ces mesures sont décrites au chapitre V et les résultats en sont donnés en annexe à ce rapport ainsi que les mesures de déformation enregistrées par les équipes participantes.

VI.1 ANALYSE DES RESULTATS

Le but de ces essais était de comparer les instruments et les techniques utilisés par les différents pays pour mesurer les déformations horizontales engendrées dans le revêtement par le passage d'un essieu chargé.

Etant donné la variation des déformations mesurées, provenant à la fois de la position transversale du véhicule, de la température du revêtement (qui elle-même varie en fonction du moment et de la position le long du tronçon d'essai) et également des inhomogénéités (chapitre IV) du revêtement le long de la chaussée expérimentale, une première phase d'analyses a été entreprise dans laquelle on a tenté d'exposer les complications introduites par ces variables. Les résultats de cette analyse ont été représentés graphiquement afin de mettre en relief les différences et les variations. Trois interprétations possibles des résultats sont décrites en détail dans les paragraphes VI.1.1 à VI.1.3. Une comparaison des températures du revêtement mesurées par chacune des trois équipes a été entreprise et est décrite dans le paragraphe VI.1.4.

VI.1.1 Variation de la déformation mesurée en fonction du numéro de passages

Pour chaque équipe (et pour chacune d'elle jusqu'à 4 groupes de jauges),

la variation de la déformation a été déterminée en fonction du nombre de passages.

Par passage, on entend le passage de 3 camions A, B et C. De façon à minimiser la variation due à la position transversale des véhicules, seul l'essieu arrière de ces camions est pris en considération. Ainsi, pour un groupe donné pouvant aller jusqu'à 4 jauges, il y avait donc 12 mesures de déformation par passage.

Dans les figures annexes B4 à B17, chacune de ces mesures de déformation (ainsi que leur valeur moyenne) est représentée pour chaque numéro de passage. Le nombre de jauges fonctionnant à un moment donné est également noté sur ces graphiques.

Les essais ont été effectués sur une période de 3 jours; les valeurs de l'annexe B indiquent donc la variation de la déformation mesurée au cours d'une journée, variation qui est en partie fonction de la température du revêtement (température dont l'influence sera prise en considération ultérieurement). Les graphiques ne tiennent pas compte de la position transversale des véhicules au cours des 91 passages. On peut toutefois admettre que cette variable soit négligeable pour chaque pays, compte tenu de la faible longueur de tronçon qui lui est attribuée. Par contre, pour comparer les résultats entre différents pays (leur groupe de jauges étant éloigné sur le tronçon d'essai) cette supposition est moins vraisemblable.

VI.1.2 Variation de la déformation maximale enregistrée en fonction de la température du revêtement

Pour inclure l'effet de la température du revêtement et minimiser les effets de la position transversale des véhicules, une deuxième interprétation des résultats a été appliquée.

Il est admis que la déformation maximale enregistrée pour un groupe de jauges (quelle que soit la position de la jauge correspondante par rapport à l'axe du trafic) est donnée par la jauge située directement sous la roue.

Des mesures de la température du revêtement sont données pour chaque passage d'un véhicule; il est donc possible d'attribuer à un numéro de passages une température T caractéristique du revêtement. Dans cette optique T a été défini de la façon suivante :

$$T = [2T(-13) + T(-5)]/3$$

ou T(-13) et T(-5) sont les températures mesurées à 13 cm et 5 cm de profondeur par l'équipe No 3. Une table des valeurs calculées de T ainsi que des températures réelles mesurées au cours des essais, est donnée aux annexes B2 et B3.

La moyenne des déformations maximales enregistrées pour chacun des véhicules A, B et C est donc reportée en fonction de la température caractéristique pour un numéro de passage donné.

Généralement, la relation entre la déformation dans un revêtement bitumineux et la température du revêtement n'est pas linéaire. Cependant, dans un domaine étroit de température, on peut admettre la linéarité. Pour des raisons pratiques, une régression linéaire a été effectuée sur les données reportées de chaque groupe de jauges de chaque pays, afin d'obtenir les coefficients de régression et les coefficients de corrélation indiqués dans les figures VI.2 à VI.10.

Figure VI.1 : Définition de la valeur de déformation choisie pour l'analyse des données

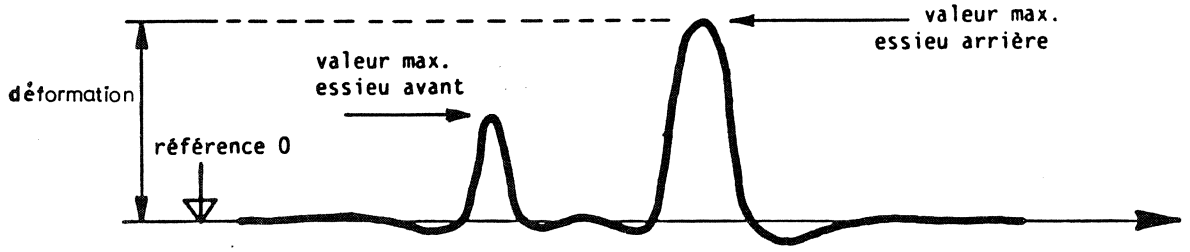


Figure VI.2 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 1

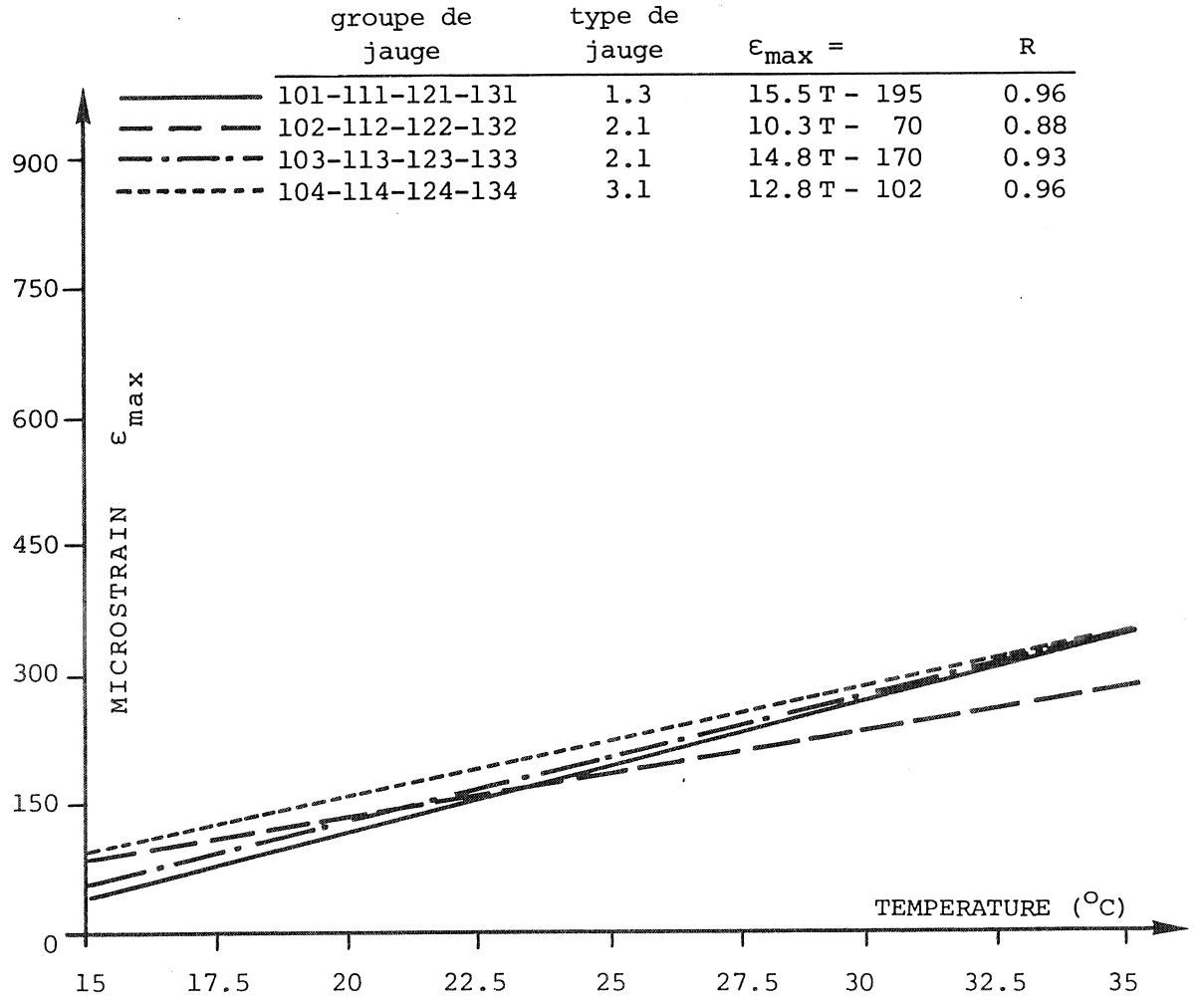
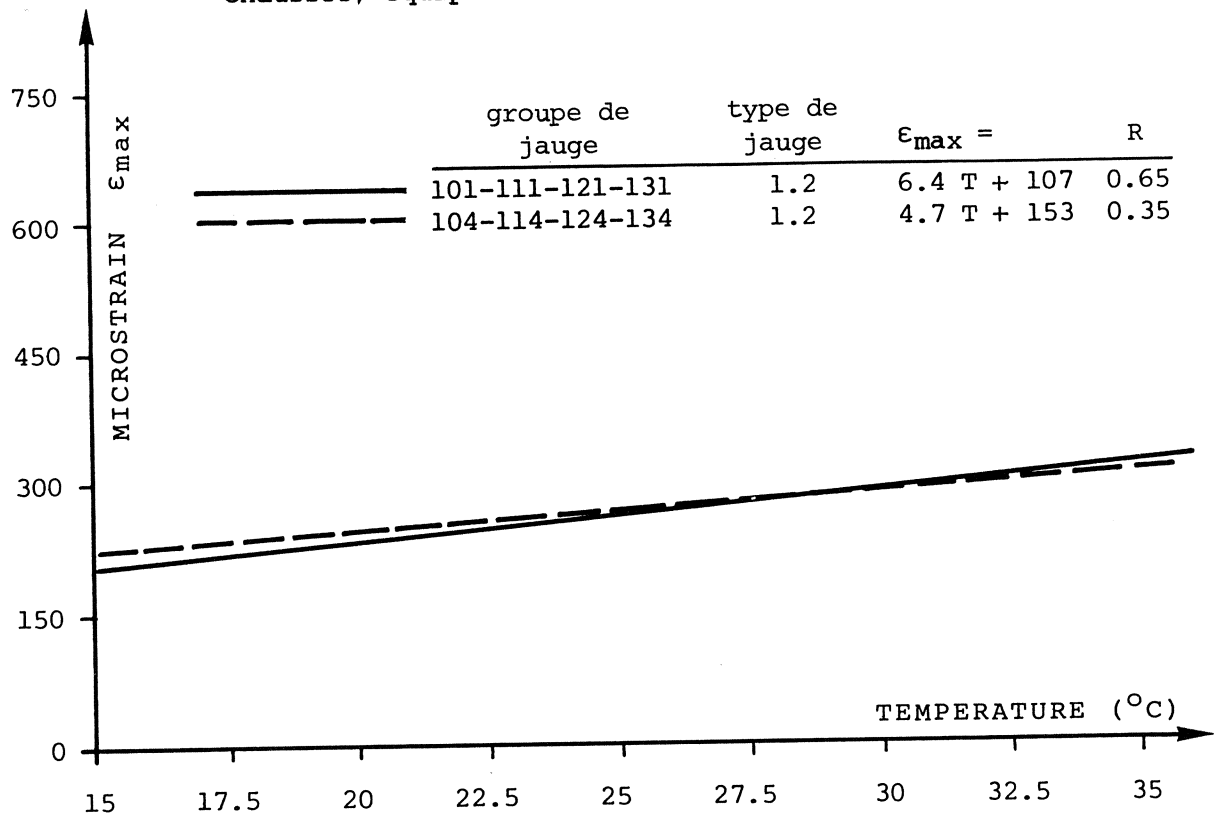
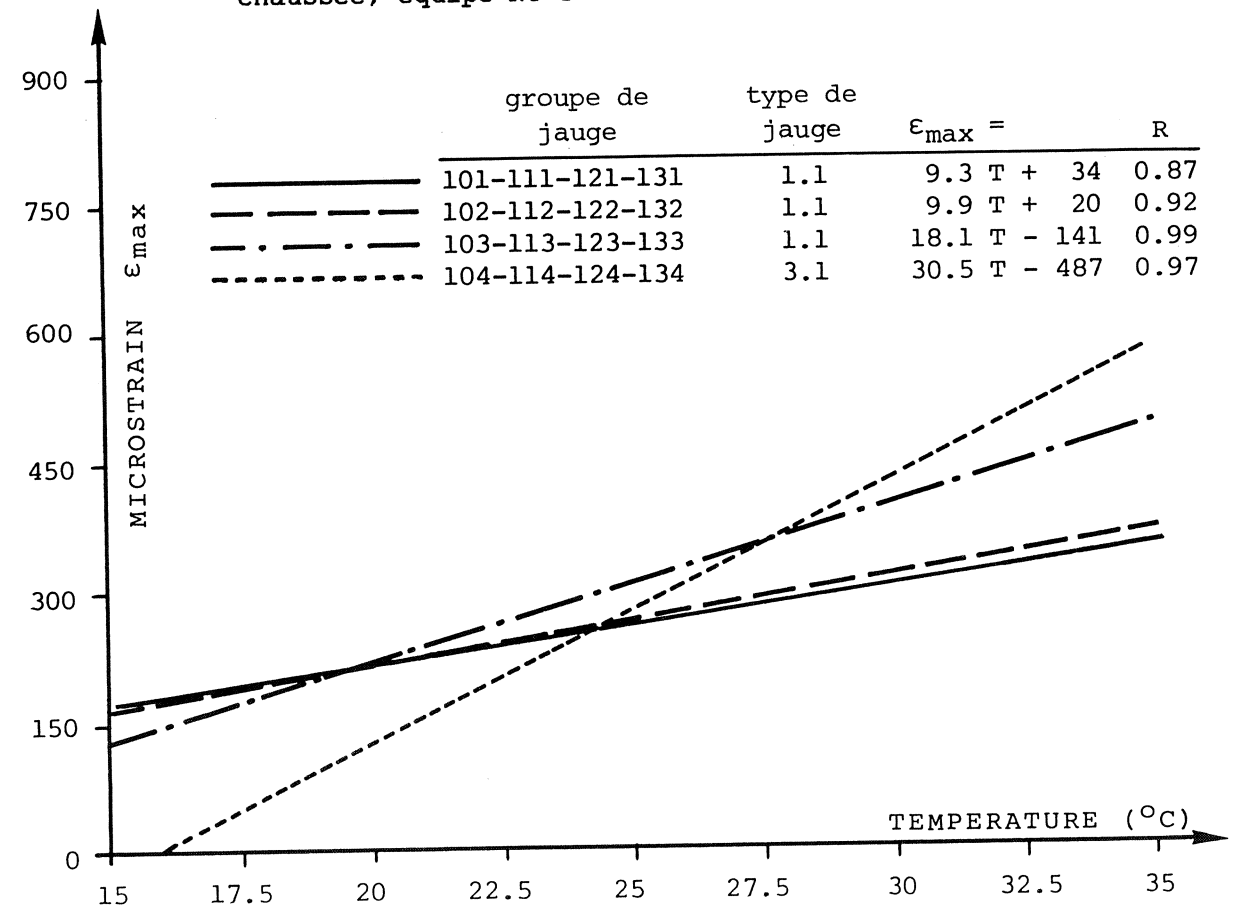


Figure VI.3 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 2



groupe de jauge	type de jauge	ε_{max} =	R
101-111-121-131	1.2	6.4 T + 107	0.65
104-114-124-134	1.2	4.7 T + 153	0.35

Figure VI.4 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 3



groupe de jauge	type de jauge	ε_{max} =	R
101-111-121-131	1.1	9.3 T + 34	0.87
102-112-122-132	1.1	9.9 T + 20	0.92
103-113-123-133	1.1	18.1 T - 141	0.99
104-114-124-134	3.1	30.5 T - 487	0.97

Figure VI.5 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 4

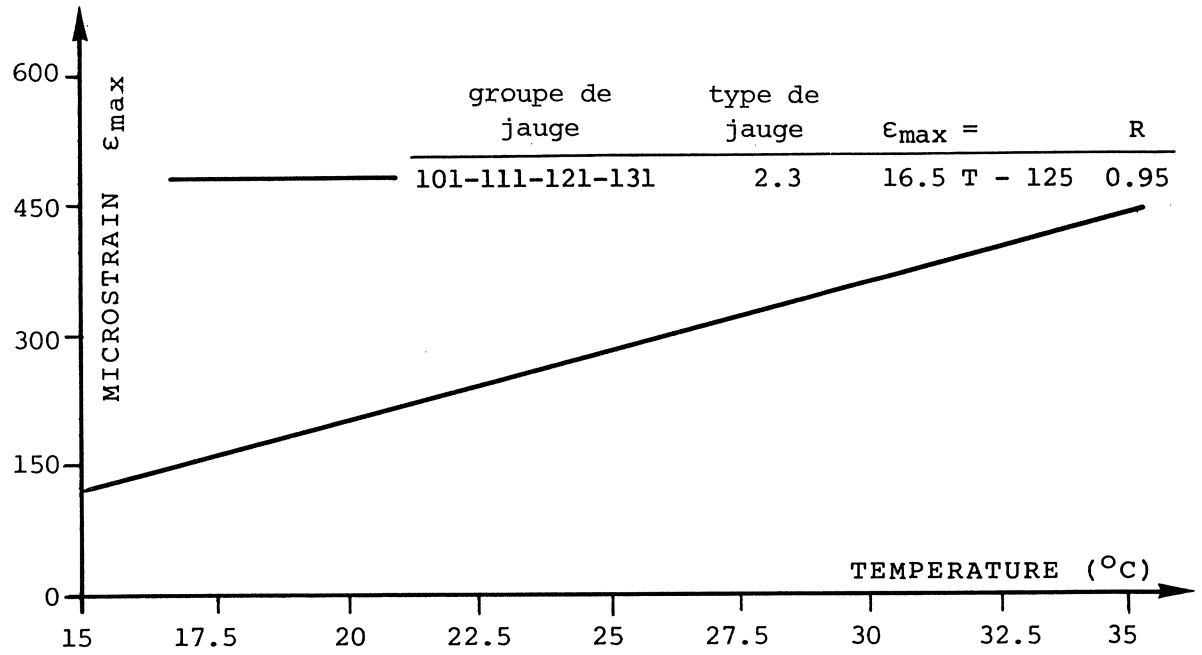


Figure VI.6 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 5

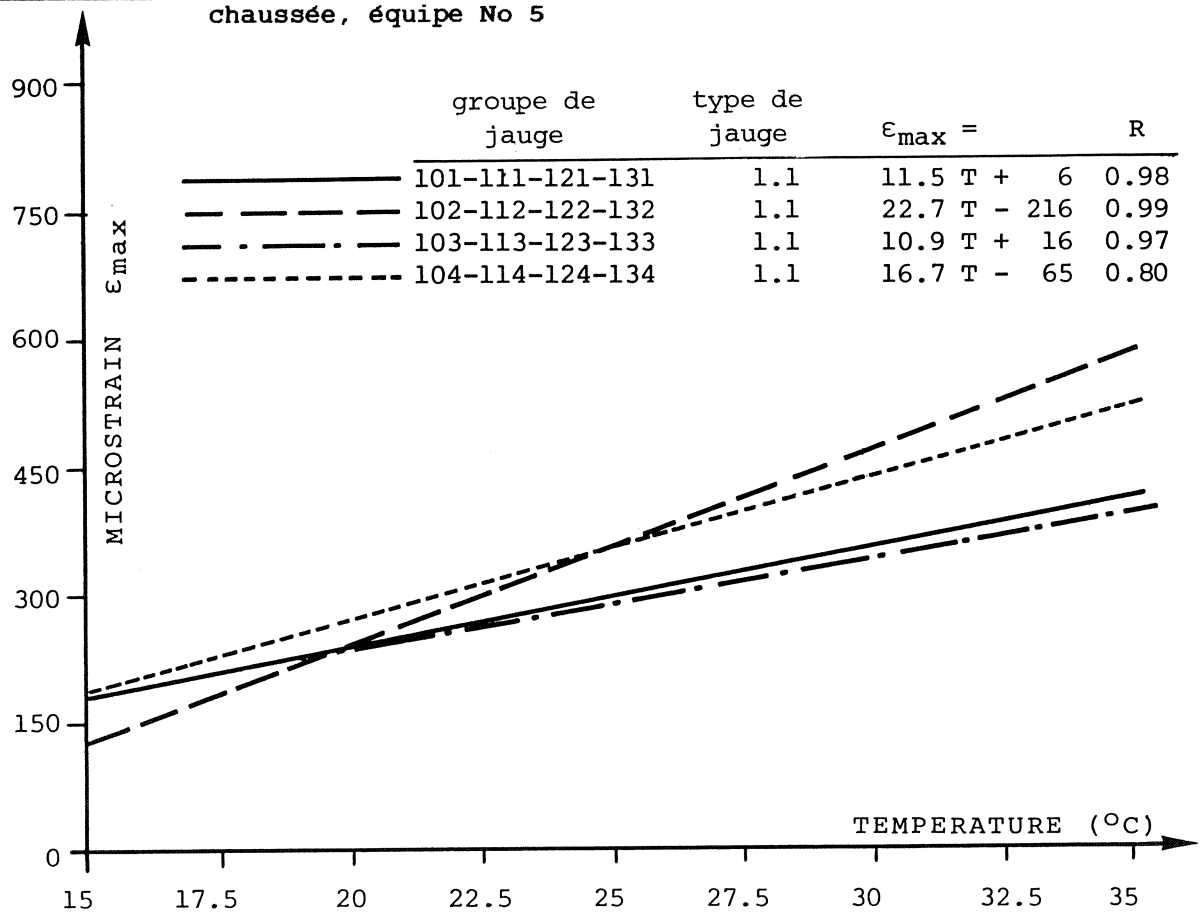
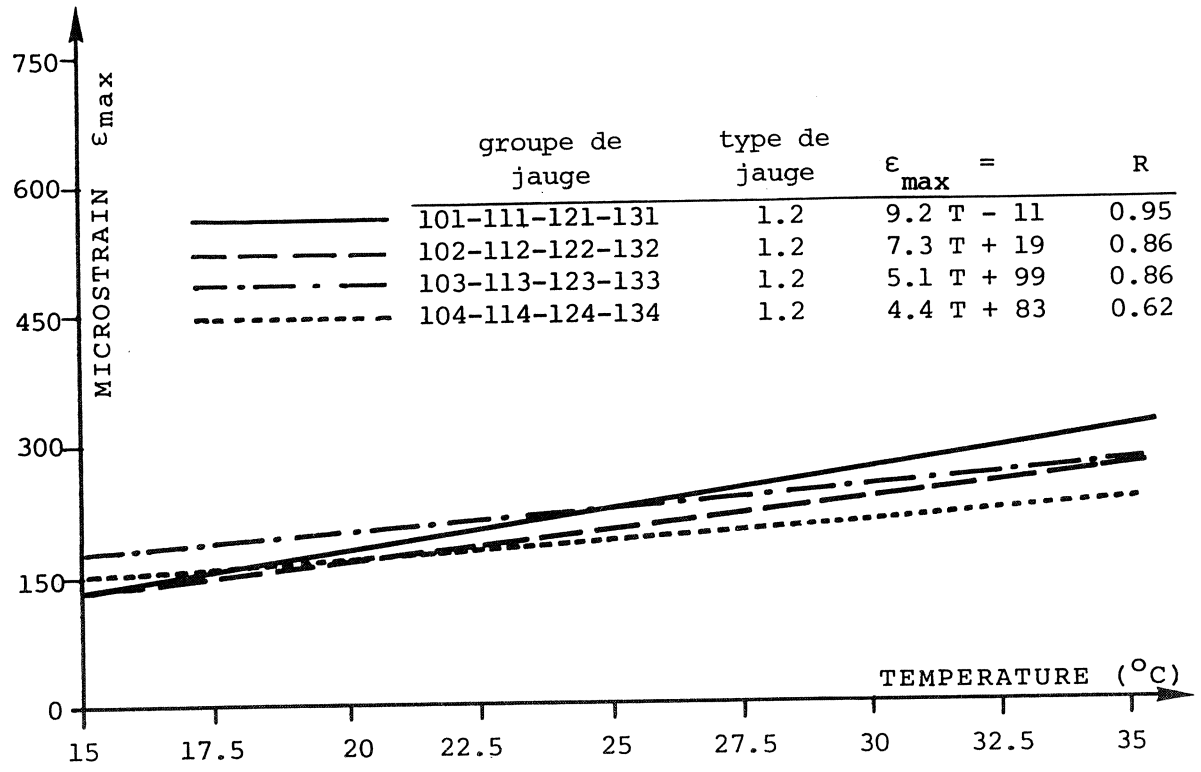
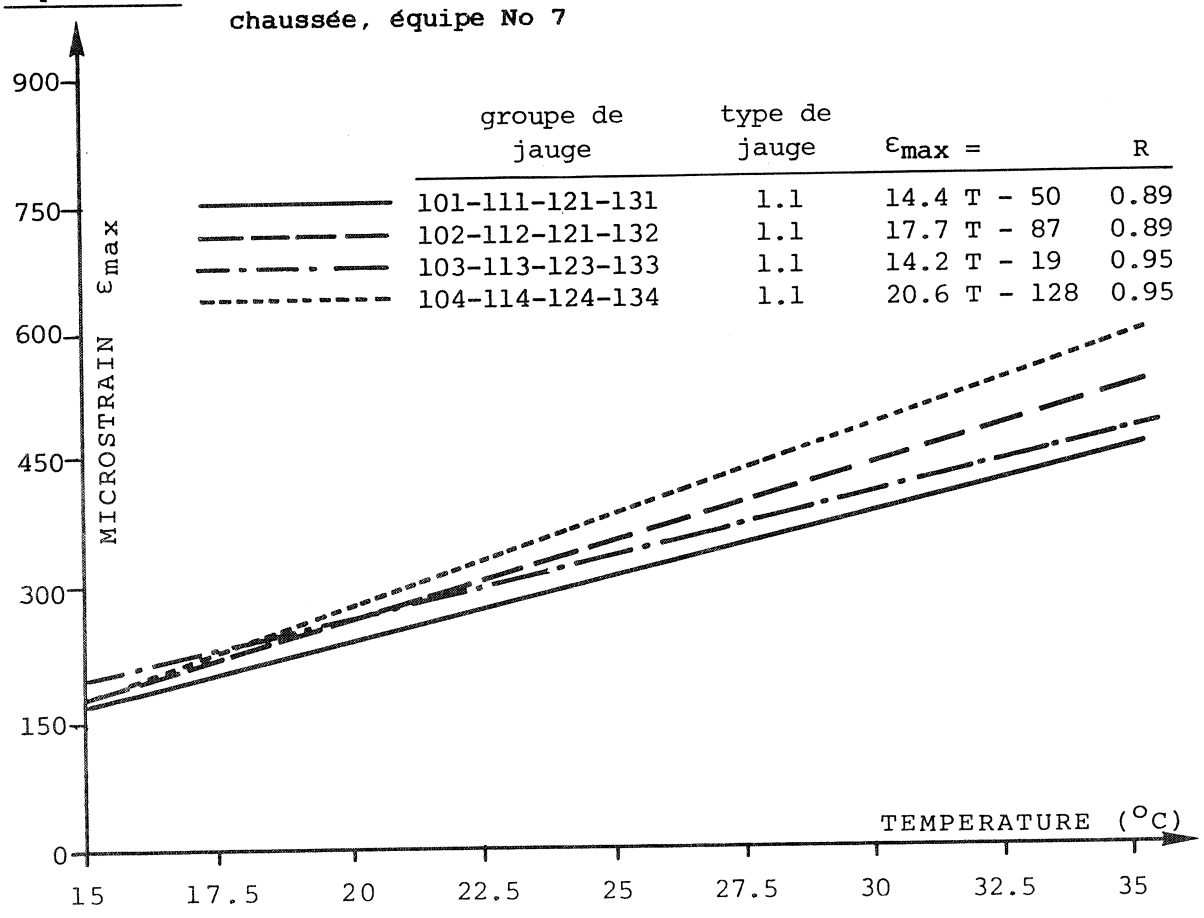


Figure VI.7 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 6



groupe de jauge	type de jauge	ε_{max} =	R
101-111-121-131	1.2	9.2 T - 11	0.95
102-112-122-132	1.2	7.3 T + 19	0.86
103-113-123-133	1.2	5.1 T + 99	0.86
104-114-124-134	1.2	4.4 T + 83	0.62

Figure VI.8 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 7



groupe de jauge	type de jauge	ε_{max} =	R
101-111-121-131	1.1	14.4 T - 50	0.89
102-112-121-132	1.1	17.7 T - 87	0.89
103-113-123-133	1.1	14.2 T - 19	0.95
104-114-124-134	1.1	20.6 T - 128	0.95

Figure VI.9 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 8

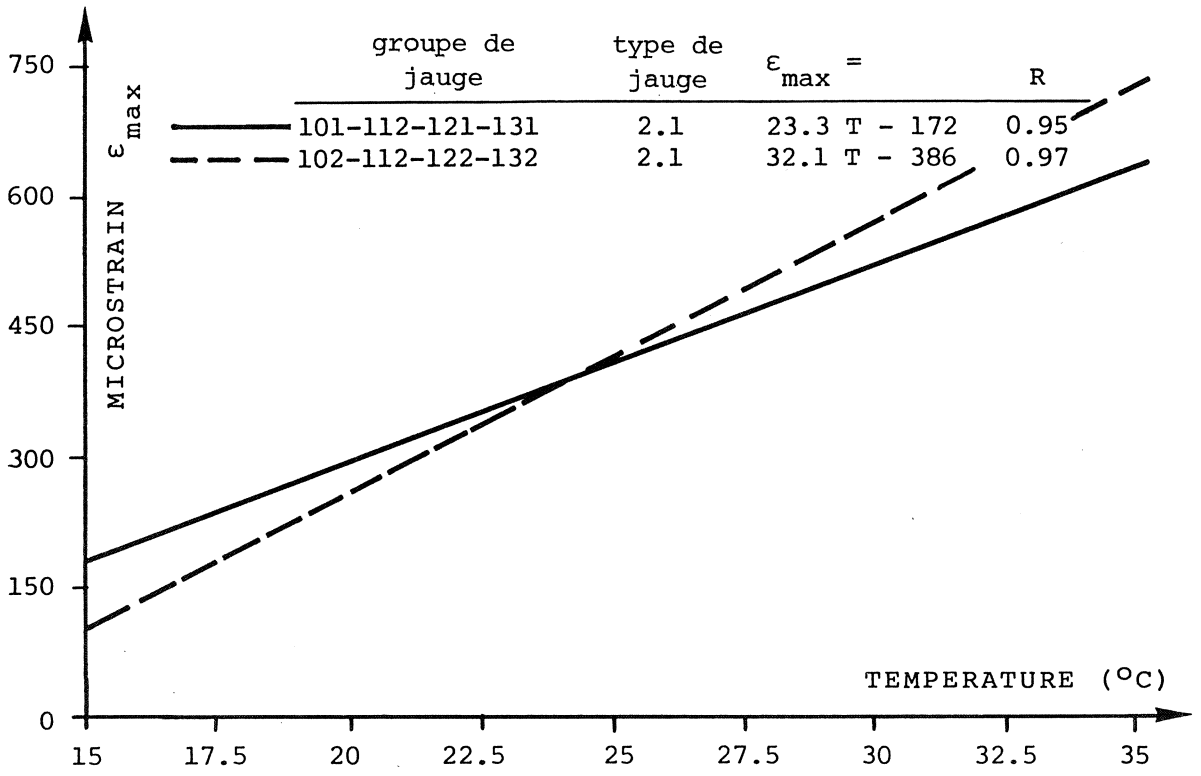
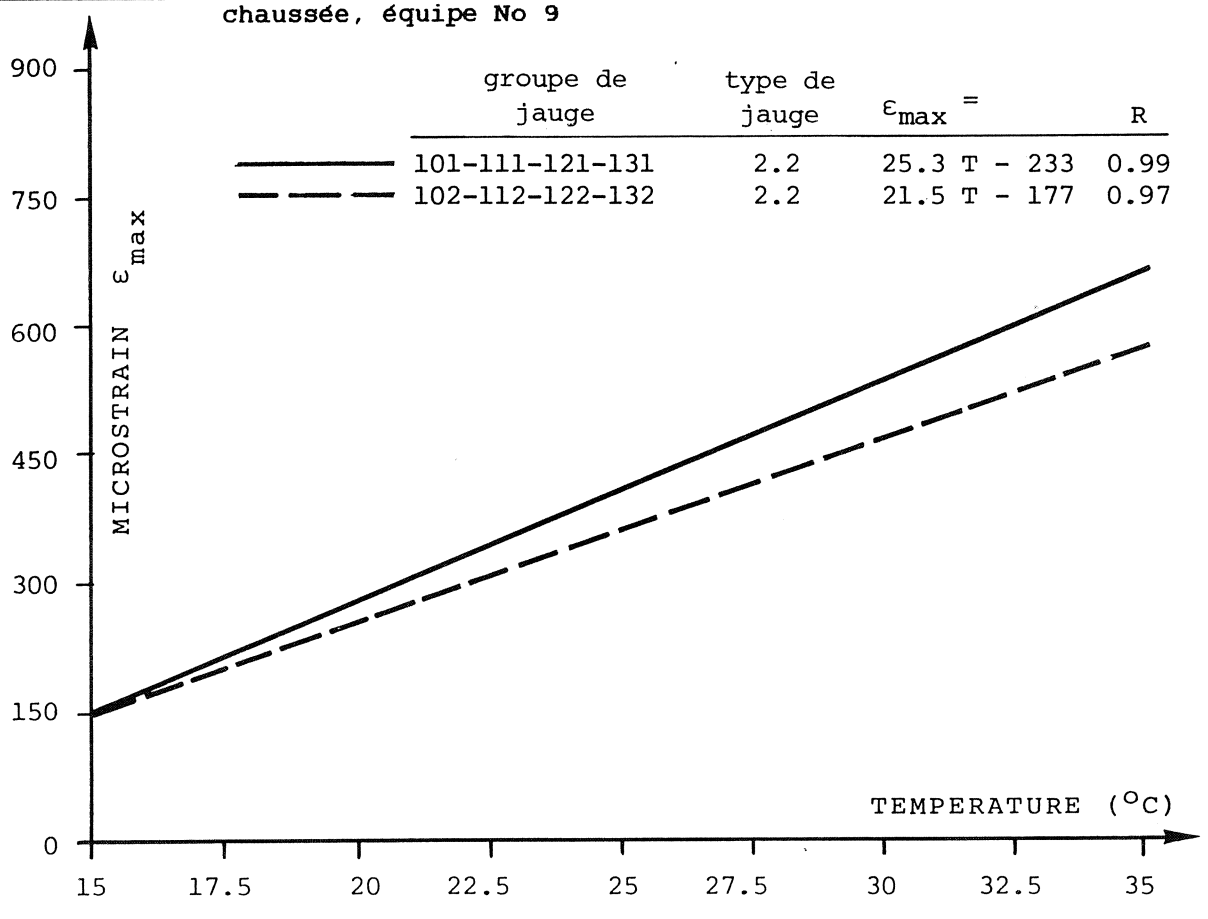


Figure VI.10 : Relation entre la déformation mesurée et la température de la chaussée, équipe No 9



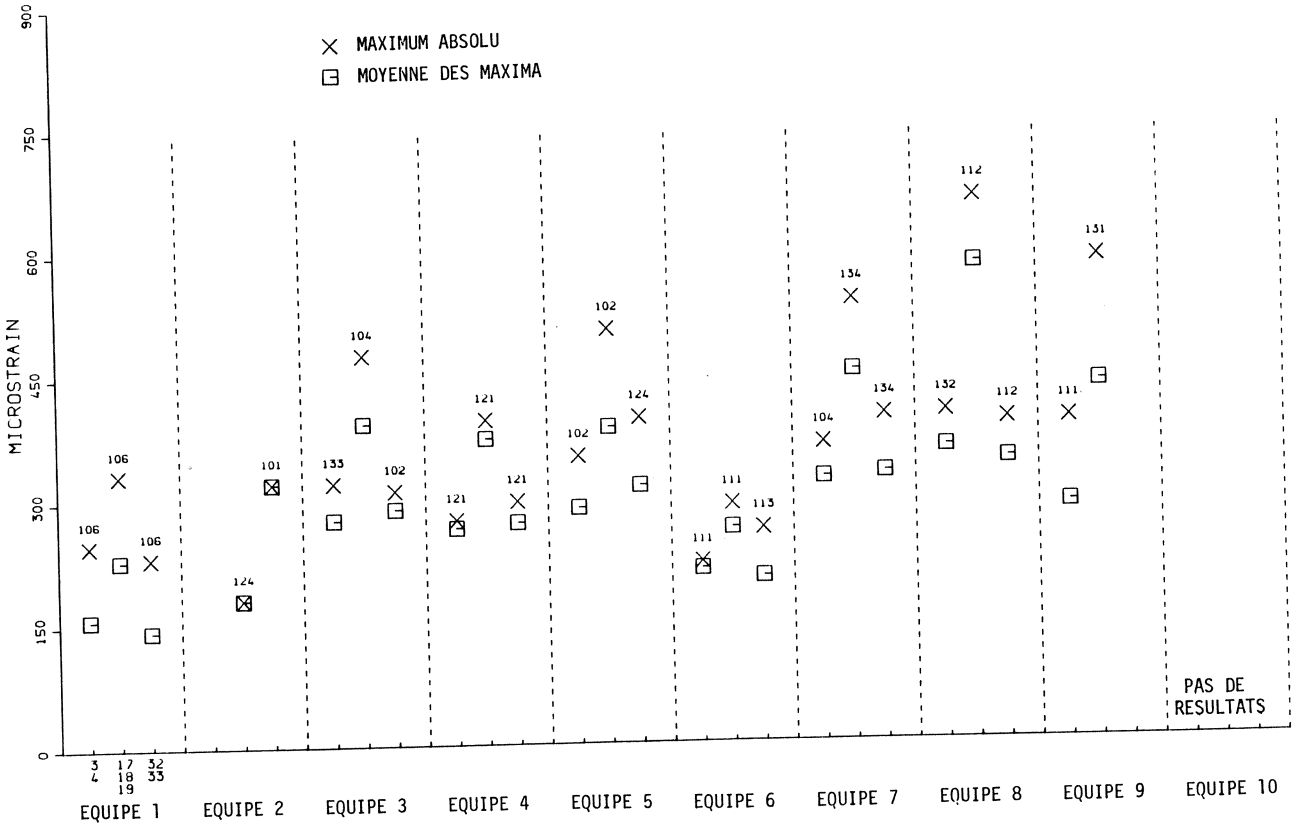
VI.1.3 Variation de la déformation à température constante

Pour terminer la première phase d'analyse des mesures de déformation, il a été décidé d'exclure si possible la variation de la déformation en fonction de la température du revêtement et d'observer les effets d'une variation dans la position transversale des véhicules circulant sur les sections d'essai.

Une étude des températures mesurées indique que pour les passages (3, 4) (17, 18, 19) et (32, 33) les niveaux de température sont très différents, mais que la variation des températures pour des passages consécutifs est très faible.

La déformation maximale absolue, correspondant à ces passages consécutifs, enregistrée pour les camions A. B et C, ainsi que la moyenne des déformations maximales enregistrées pour chaque camion, ont été représentées dans un graphique en fonction de la position longitudinale de la jauge, pays par pays, le long du tronçon d'essai. La figure VI.11 montre l'étendue des maximas ainsi mesurés et permet de différencier les trois groupes de passage (3,4) (17, 18, 19) et (32, 33).

Figure VI.11 : Variation d'allongement maximale en fonction de la position sur la piste



VI.1.4 Corrélation entre les températures mesurées

Finalement, les mesures de température ayant été faites par trois équipes (1, 3, 9) à des points distants parfois les uns des autres de 40 mètres, une comparaison entre ces observations a été entreprise.

Comme cela a déjà été indiqué, la température caractéristique T du revêtement a été définie comme une fonction des mesures faites par l'équipe No 3; deux autres fonctions ont donc été introduites :

$$T(a) = [2T(-13a) + T(-5a)]/3$$

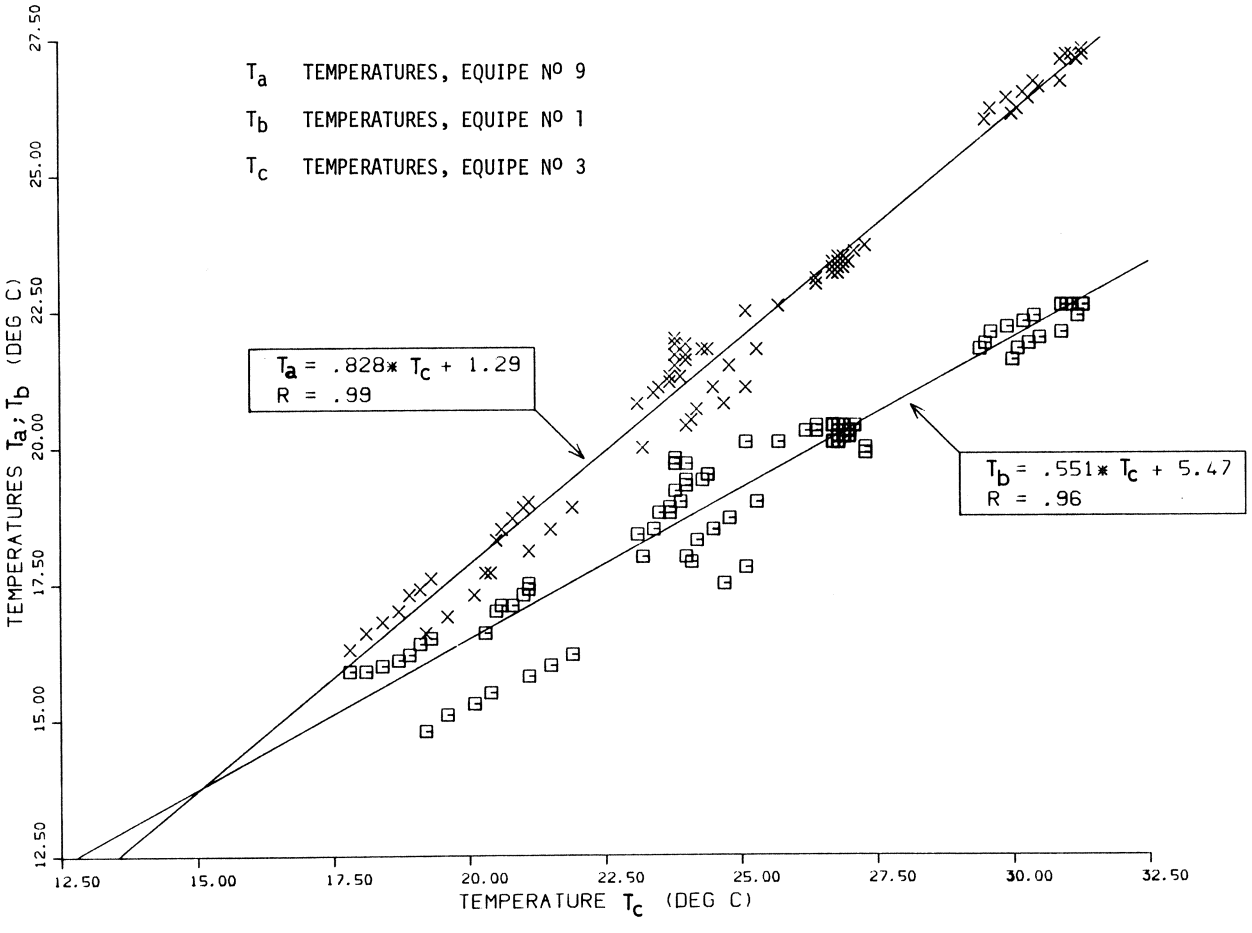
où T(-13a) et T(-5a) sont les températures mesurées à des profondeurs de 13 cm et 5 cm par l'équipe No 9 et

$$T(b) = [2T(-13b) + T(-5b)]/3$$

où T(-13b) et T(-5b) sont les températures mesurées à des profondeurs de 13 cm et 5 cm par l'équipe No 1.

La figure VI.12 représente T(a) et T(b) en fonction de T, ainsi que les coefficients de régression linéaire des corrélations correspondantes.

Figure VI.12 : Variation des températures équipe par équipe



VI.1.5 Remarques sur la première phase de l'analyse

Les analyses faites jusqu'ici sont basées sur les données mesurées et permettent d'identifier des différences dans les niveaux de déformations mesurées entre les groupes de jauges employées par un groupe donné, ou pour n'importe quel groupe de jauges.

La grande dispersion des mesures obtenues sous des conditions nominales de température, de vitesses de véhicules, etc.. est vraisemblablement due à la combinaison de nombreux facteurs, en particulier la répétabilité de la mesure et, plus importante, la position transversale de la roue chargée sollicitant les jauges. Ce dernier effet est particulièrement difficile à prendre en compte, les mesures de la position transversale ayant été faites seulement au début et à la fin du tronçon d'essai, et cela avec une précision de plus ou moins 5 cm.

De la même manière, bien que les variations de la température journalière soient connues, les résultats n'ont pas été corrigés pour une température standard et la dispersion des résultats pour un groupe de jauges donné peut en résulter.

Jusqu'à présent, on n'a pas encore fait dans cette analyse une distinction entre les différents types de jauges ou les méthodes de mise en place. Ces différences sont en réalité masquées par les effets d'autres facteurs et une analyse complémentaire est nécessaire pour les identifier.

Dans l'ensemble, les résultats tendent à montrer que les mesures obtenues par la plupart des équipes sont du même ordre de grandeur avec, cependant, toutes les valeurs d'une équipe dans la partie inférieure du domaine, et celles d'une autre équipe toujours dans la partie supérieure.

En raison de la dispersion des résultats, il est impossible de tirer autre chose que cette conclusion très générale. Cela étant entendu, il a été décidé que les résultats devaient être soumis à une analyse plus détaillée décrite dans le paragraphe VI.2 suivant.

VI.1.6 Résultats des jauges BISON

Des mesures avec la paire de jauges BISON n'ont été exécutées que durant les deux premiers jours du programme des essais, soit au total pour 22 passages de véhicules (voir résultats dans l'annexe B/18). Pour aider à contrôler les jauges un oscilloscope portable à mémoire a été connecté à la sortie du boitier des BISON et un calibrage direct du voltage de sortie par rapport à l'amplitude a été déterminé. Les variations du voltage lors de chaque passage ont été relevées manuellement, converties en variations d'amplitude et les déformations ont été estimées en utilisant la relation liant l'amplitude à la déformation contenue dans le manuel de l'installation BISON. Une analyse détaillée des données n'est pas possible au vu du nombre réduit de valeurs particulières et des différents facteurs contribuant à la dispersion des résultats. Une comparaison des mesures montre une tendance à obtenir des valeurs de déformation plus élevées que celles obtenues par mesure directe.

VI.2 ANALYSE COMPLEMENTAIRE DES RESULTATS

Le but principal de cette seconde étape d'analyse était de réduire ou d'éliminer les effets des variables indépendantes intervenant lors de la collecte des données, en particulier la température du revêtement et la position transversale du véhicule. Les paragraphes suivants décrivent les différentes parties de l'analyse et leur raison d'être.

VI.2.1 Correction des résultats en fonction d'une température standard du revêtement

Ne serait-ce qu'à cause de la variation journalière de la température du revêtement, il est difficile de comparer les valeurs obtenues avec différents groupes de jauges ou par différentes équipes.

Des mesures effectuées par trois équipes ont montré des différences de température le long du tronçon d'essai et de faibles différences du taux de la variation de la température au cours de la période d'essai.

Il est plus facile d'effectuer des comparaisons avec des résultats présentés à une température standard unique. Pour cette raison, une analyse a donc été entreprise, dans laquelle les résultats antérieurs (voir paragraphe VI.1.2) ont été utilisés pour convertir les déformations mesurées en déformation à 24 °C, température qui a été choisie comme étant proche du milieu de l'intervalle de variation des températures du revêtement observées au cours des essais.

VI.2.2 Variation de la déformation en fonction du type de jauge

Dans une partie précédente de ce rapport (chapitre III), les différentes jauges utilisées au cours des essais ont été classées en plusieurs catégories, selon leur mode de fabrication et leur mode de mise en place.

Une analyse a donc été entreprise pour déterminer s'il existe des différences dans le fonctionnement des diverses catégories de jauges de déformation. Les données mentionnées au paragraphe VI.2.1 ont été séparées pour chaque groupe de jauges selon la catégorie des jauges. Les valeurs correspondant à tous les groupes de jauges d'une catégorie donnée ont été rassemblées comme indiqué dans l'exemple des figures VI.13 et VI.14. Dans ces graphiques, les déformations mesurées au cours de chacune des trois journées d'essai ont été corrigées à la température standard et reportées séparément. La moyenne et l'écart type de la déformation pour les jauges de chaque équipe ont été notés sur ces graphiques.

Dans ces graphiques, une partie de la dispersion des résultats provient des variations de la position transversale des véhiculess circulant sur les jauges. Comme indiqué précédemment, la déformation maximale enregistrée pour une groupe de jauges représente probablement la déformation presque exactement sous la roue. Les exemples des figures VI.15 et VI.16 représentent donc les moyennes des déformations maximales à la température standard pour chacun des véhicules A, B et C (ainsi que les maxima) en fonction du numéro de passage.

Des différences entre les caractéristiques de charge des véhicules A, B et C peuvent expliquer une partie des différences observées dans les déformations mesurées. Pour chaque jauge d'une équipe donnée, la déformation maximale absolue enregistrée lors de chaque passage a donc été relevée, puis corrigée pour la température standard de 24 °C et reportée en fonction du numéro de passages, comme indiqué dans les figures VI.17 à VI.35. La moyenne et l'écart type du maximum absolu ont également été notés sur chaque graphique.

Figure VI.13 : Exemple de variation des déformations, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 1.1

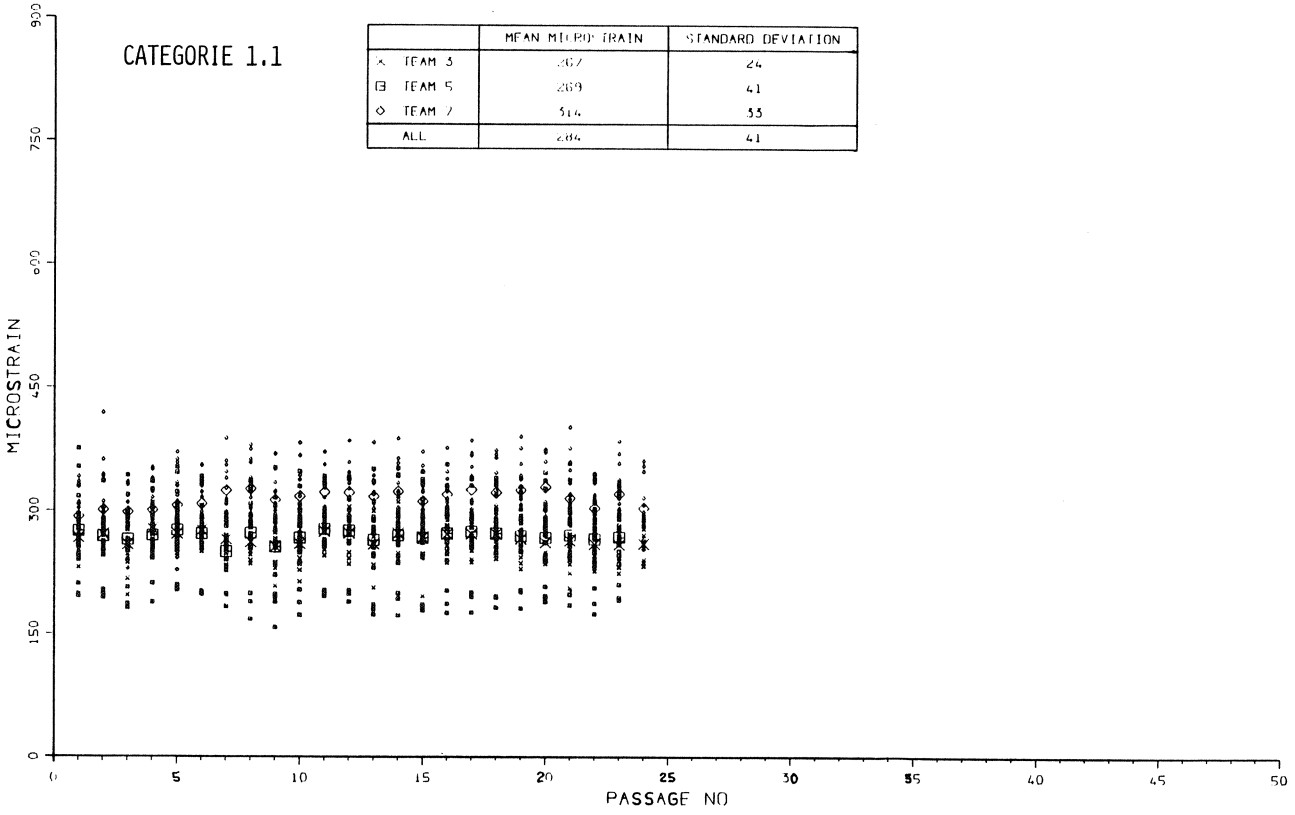


Figure VI.14 : Exemple de variation des déformations, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 2.1

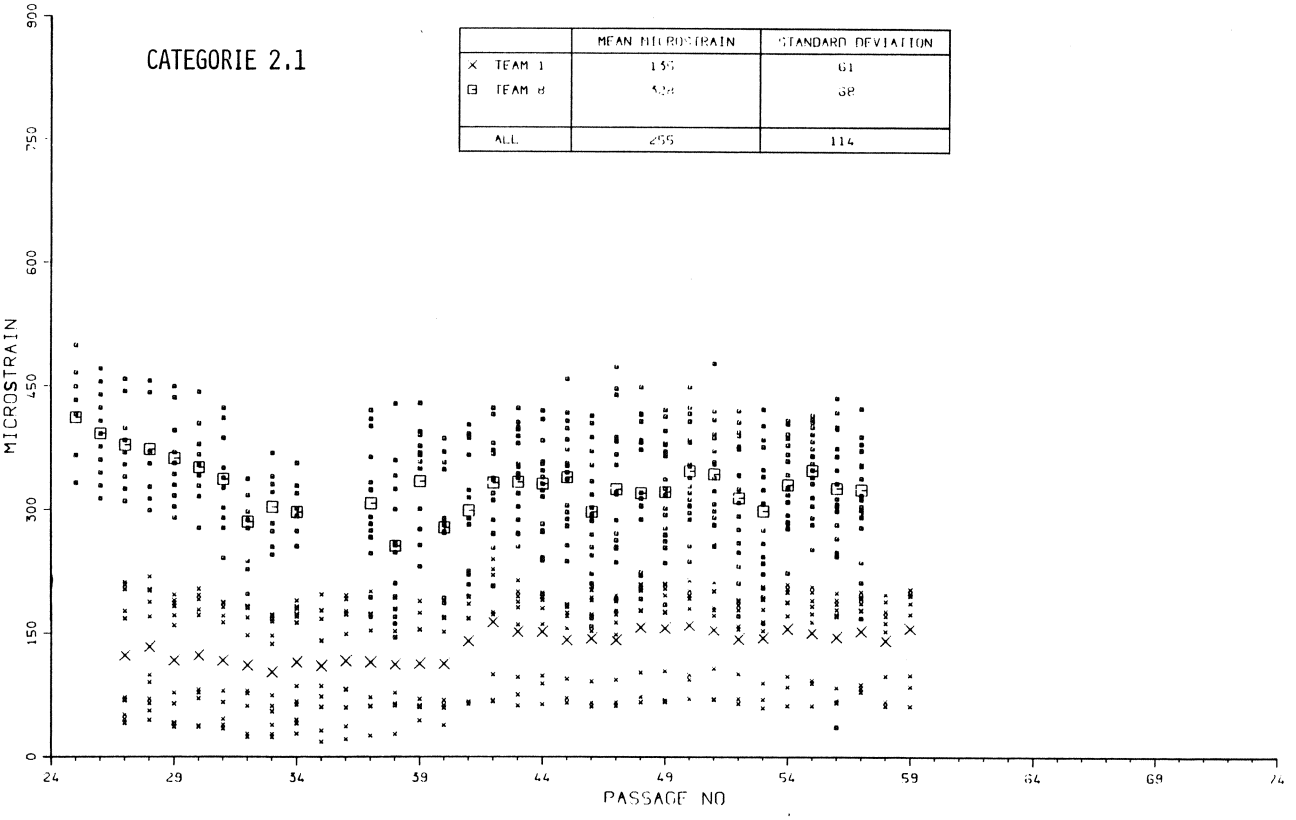


Figure VI.15 : Exemple de variation des déformations maximales, ramenées à 24 °C, pour chacun des véhicules et pour les jauges de la catégorie 1.1

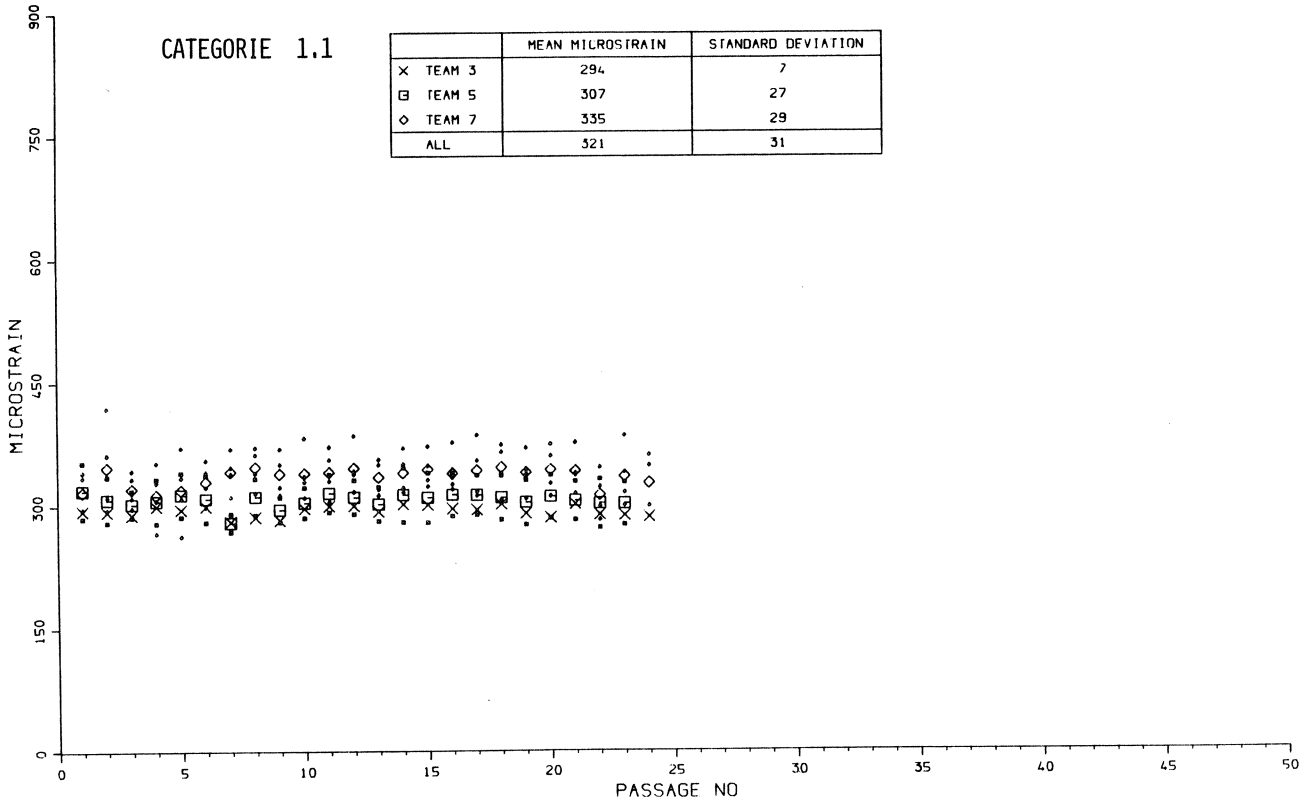


Figure VI.16 : Exemple de variation des déformations maximales, ramenées à 24 °C, pour chacun des véhicules et pour les jauges de la catégorie 2.1

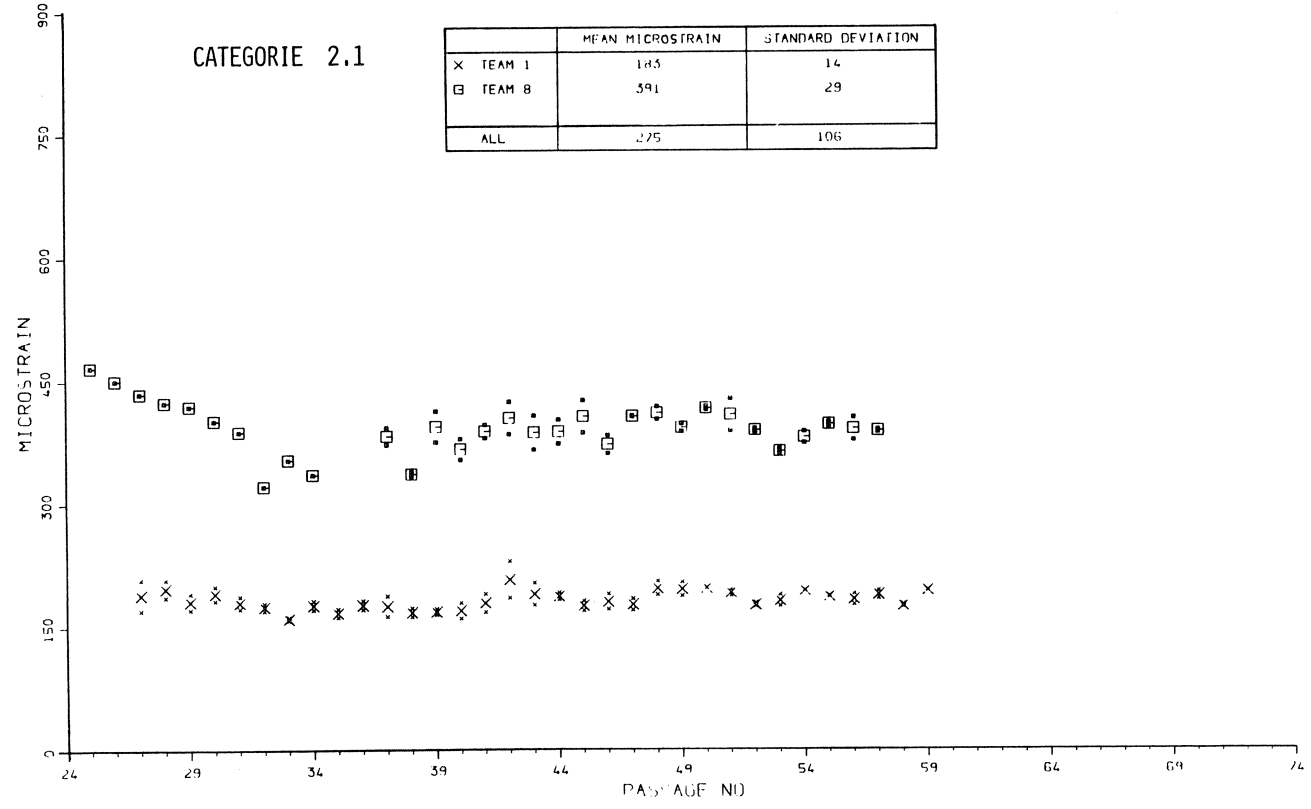


Figure VI.17 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 1.1

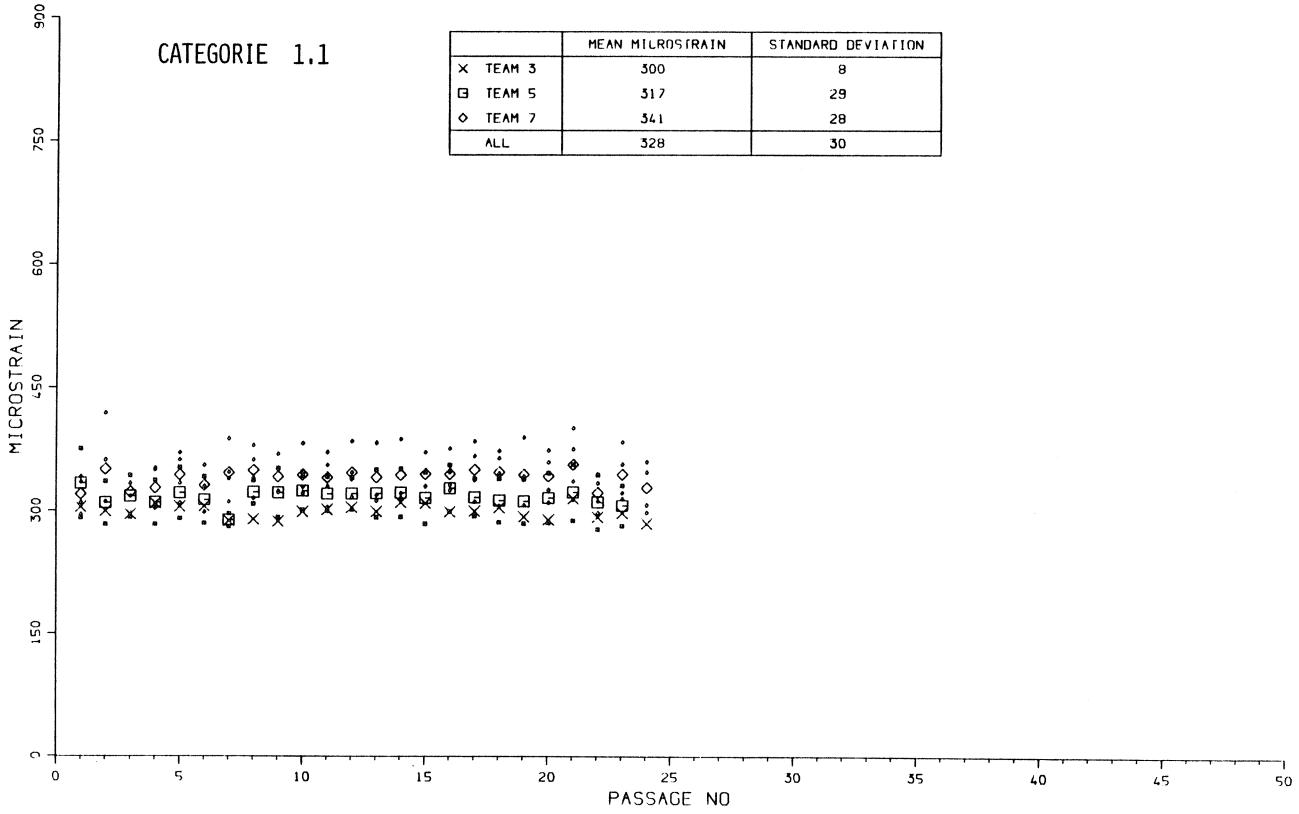


Figure VI.18 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 1.1

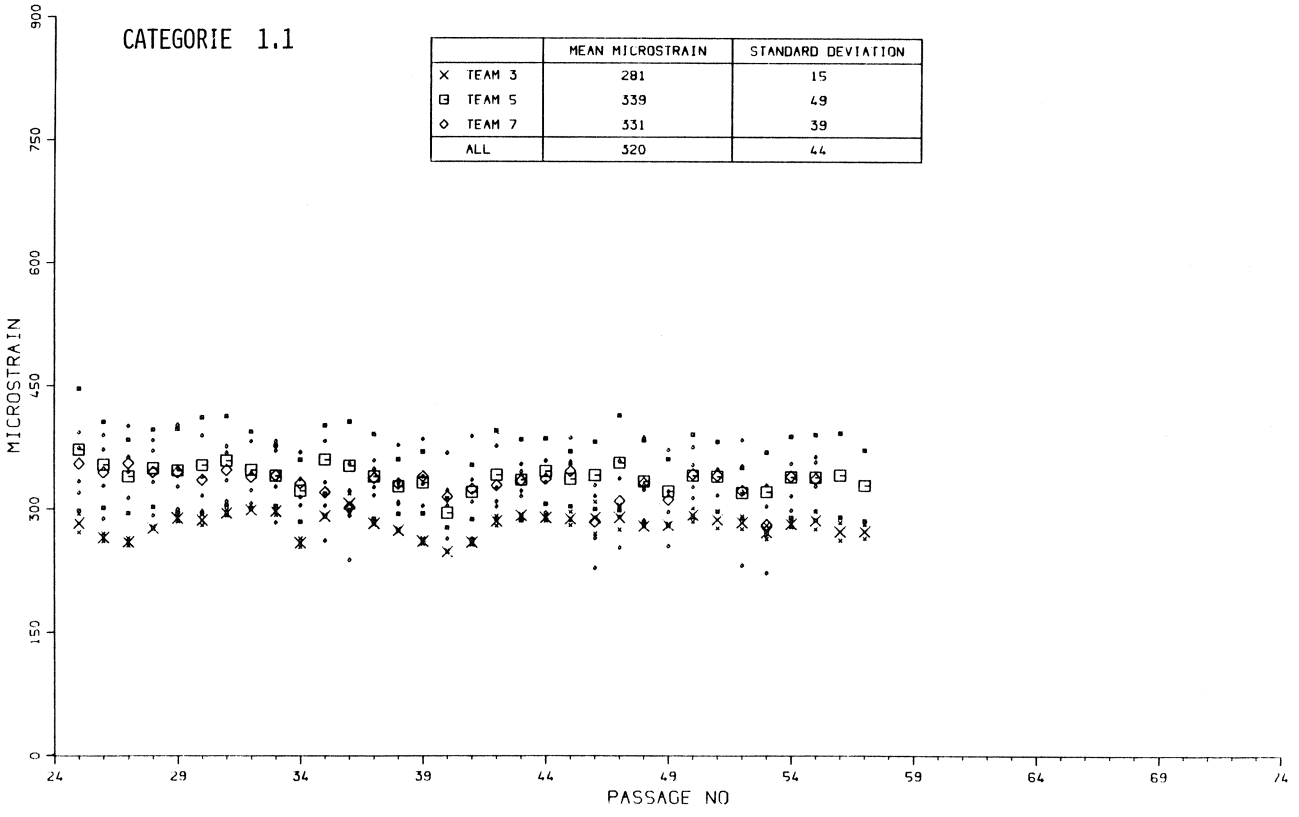


Figure VI.19 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C pour les jauges de la catégorie 1.1

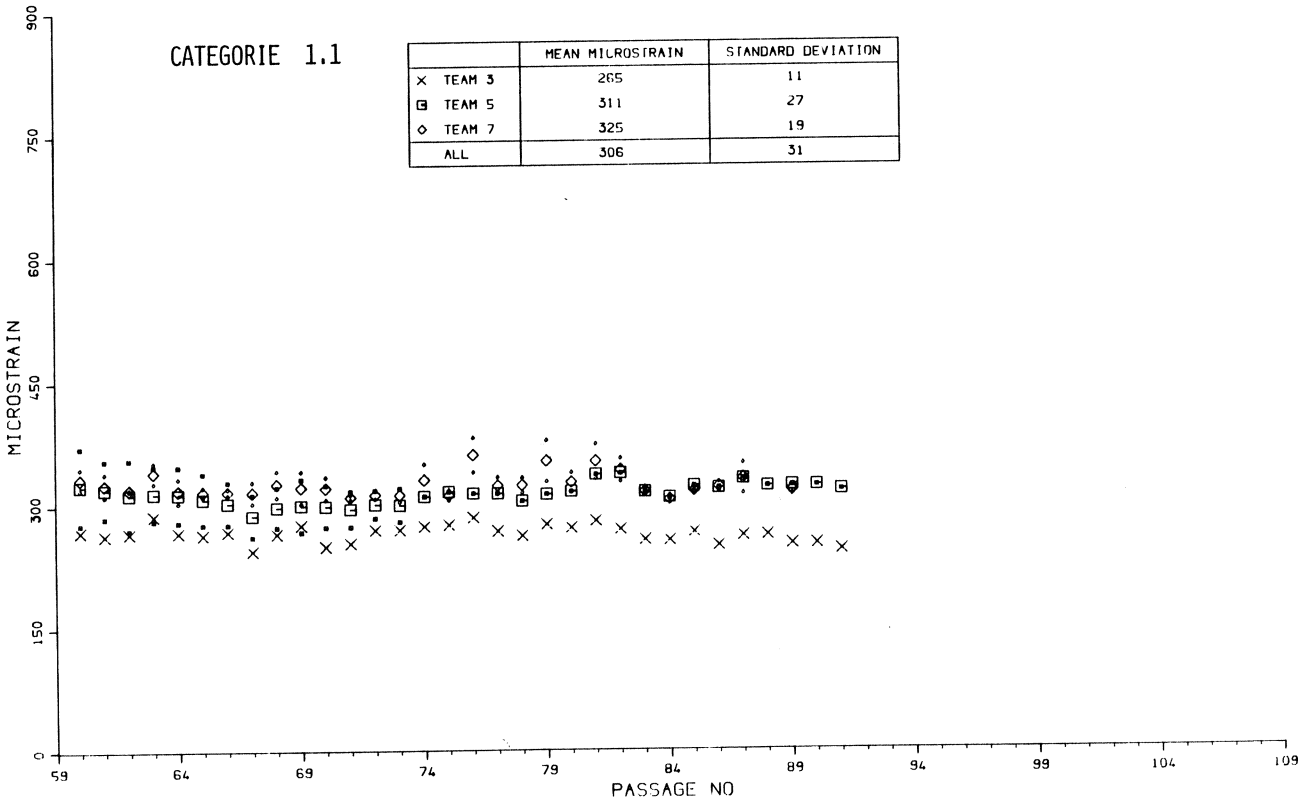


Figure VI.20 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 1.2

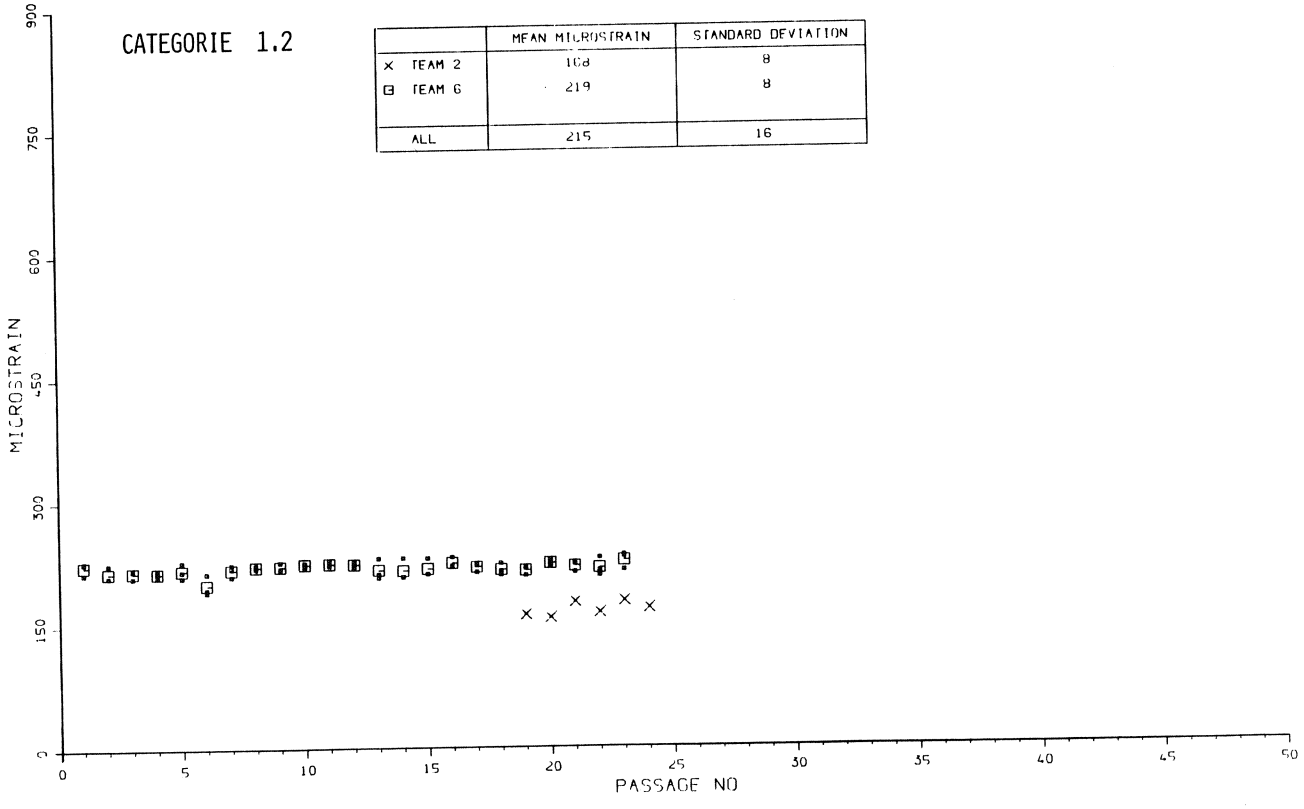


Figure VI.21 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 1.2

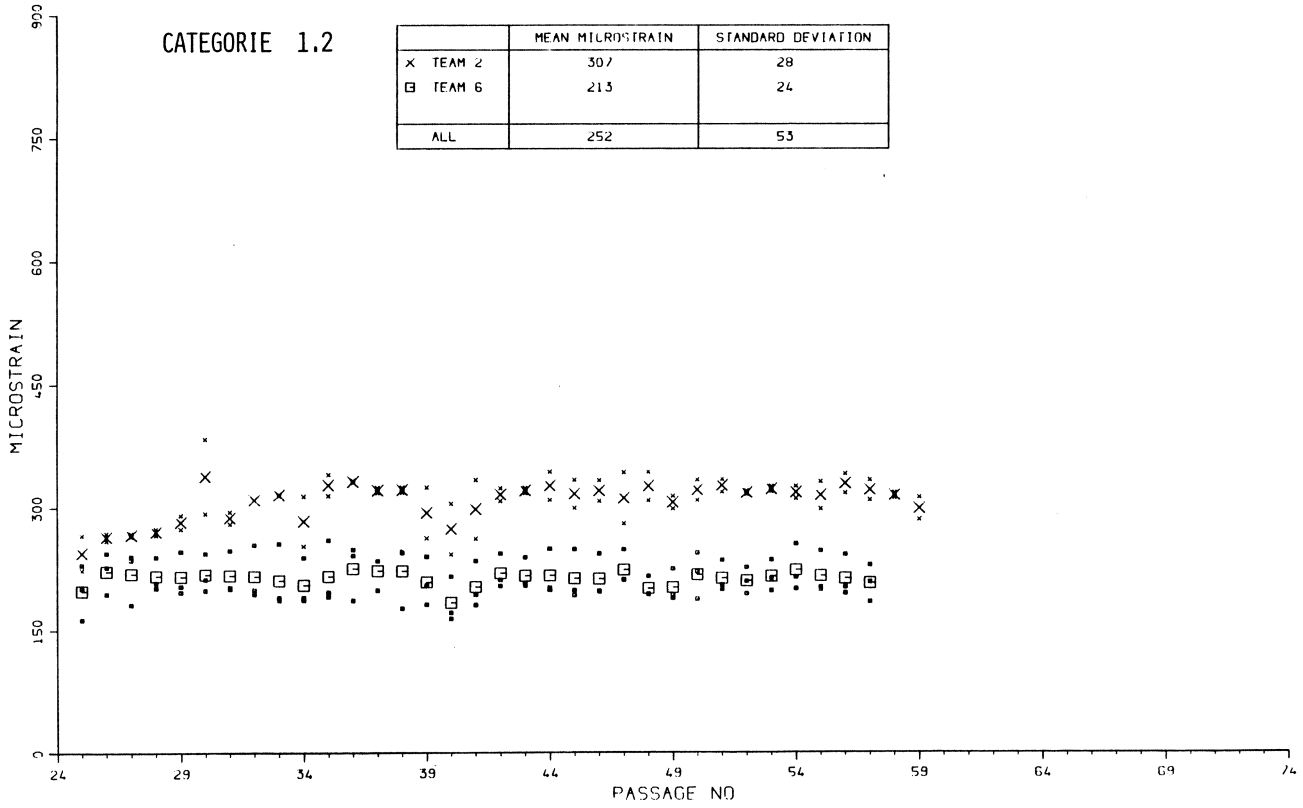


Figure VI.22 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 1.2

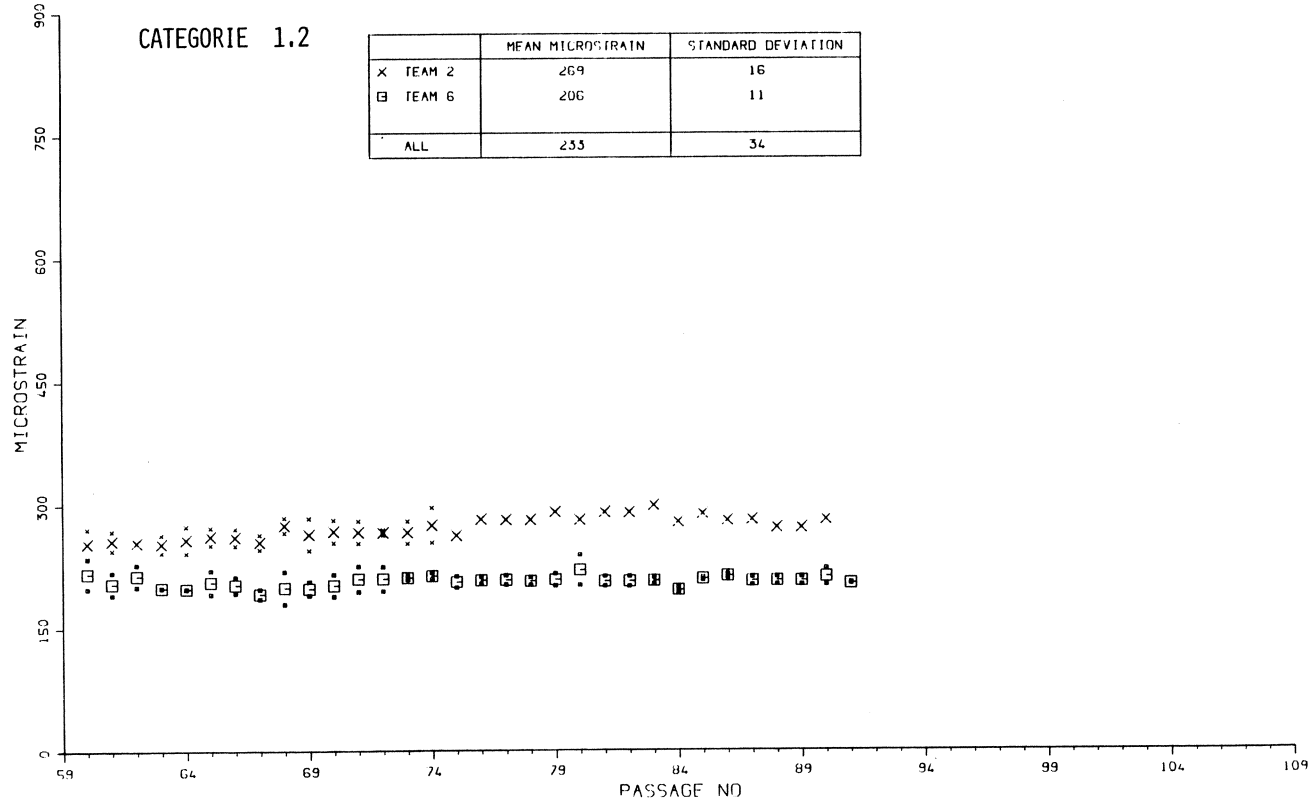


Figure VI.23 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 1.3

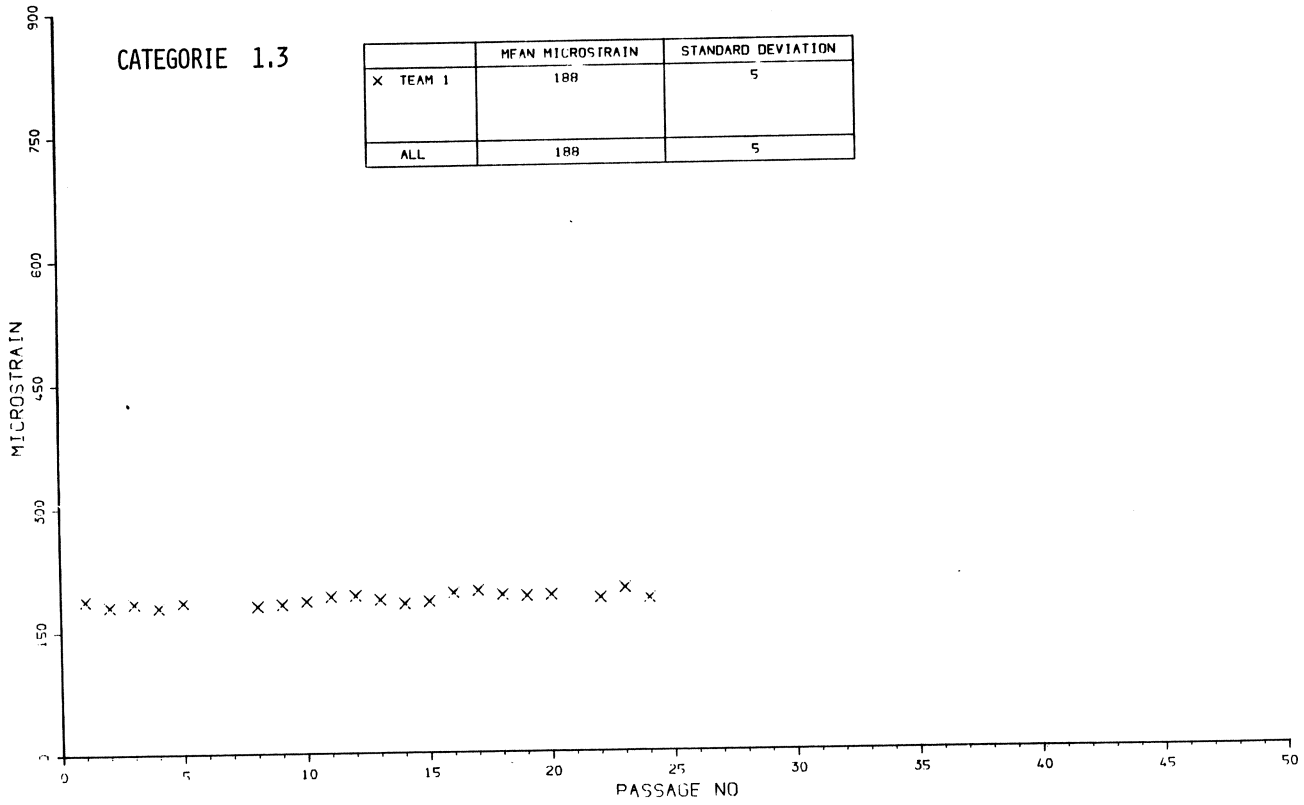


Figure VI.24 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 1.3

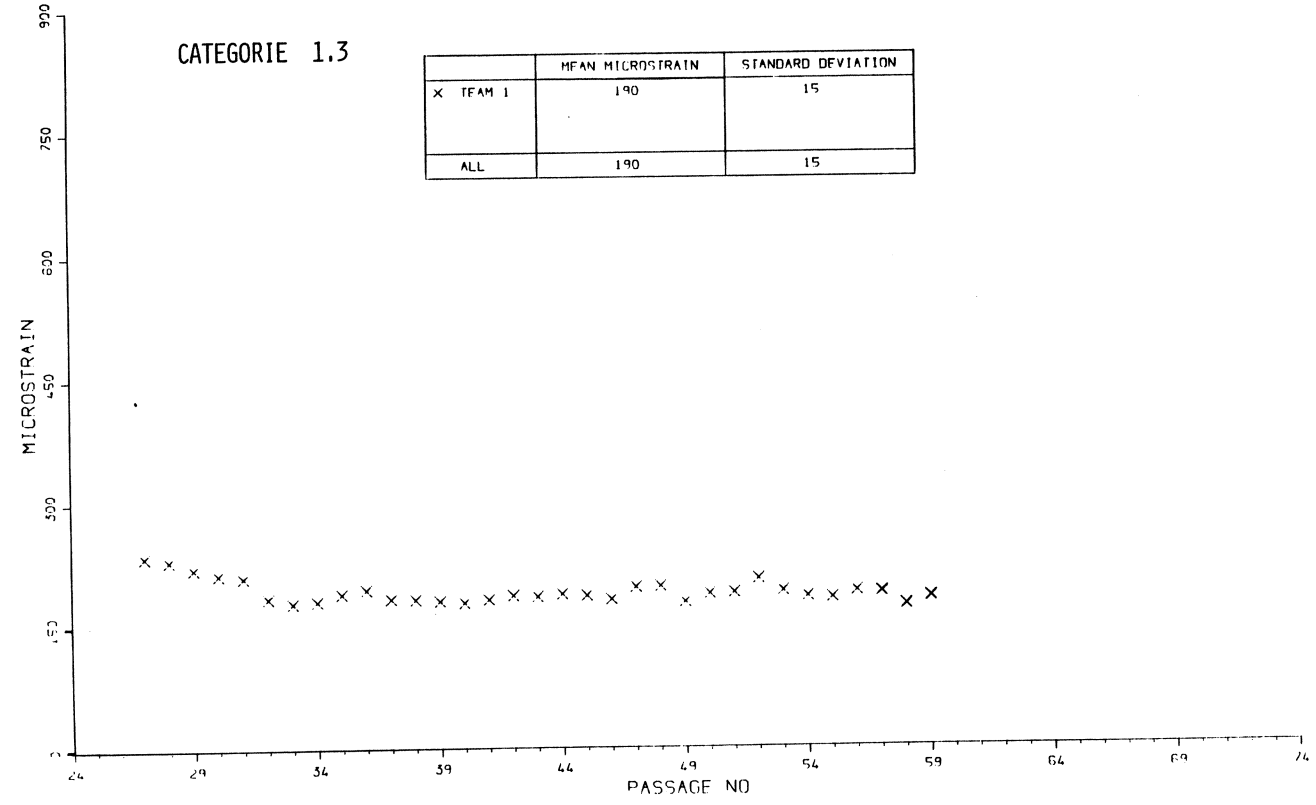


Figure VI.25 : **Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 2.1**

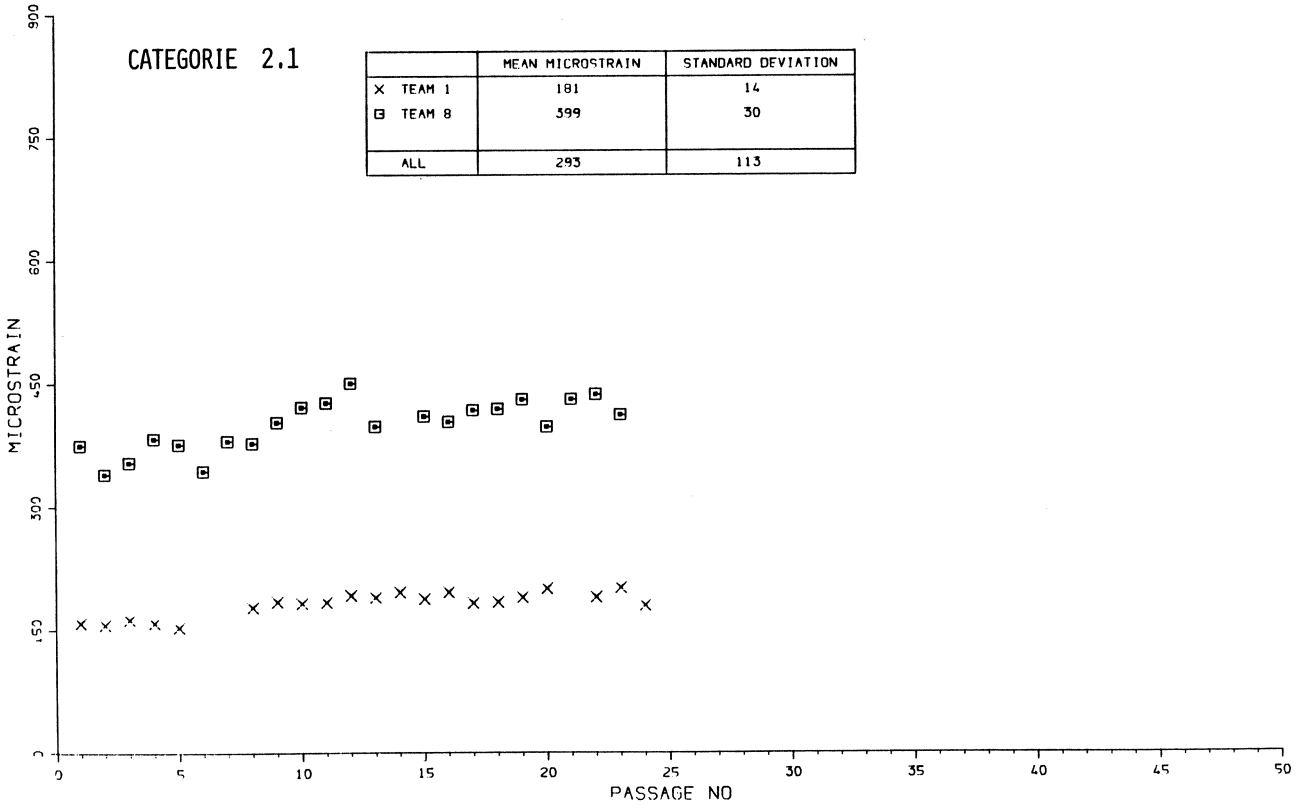


Figure VI.26 : **Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 2.1**

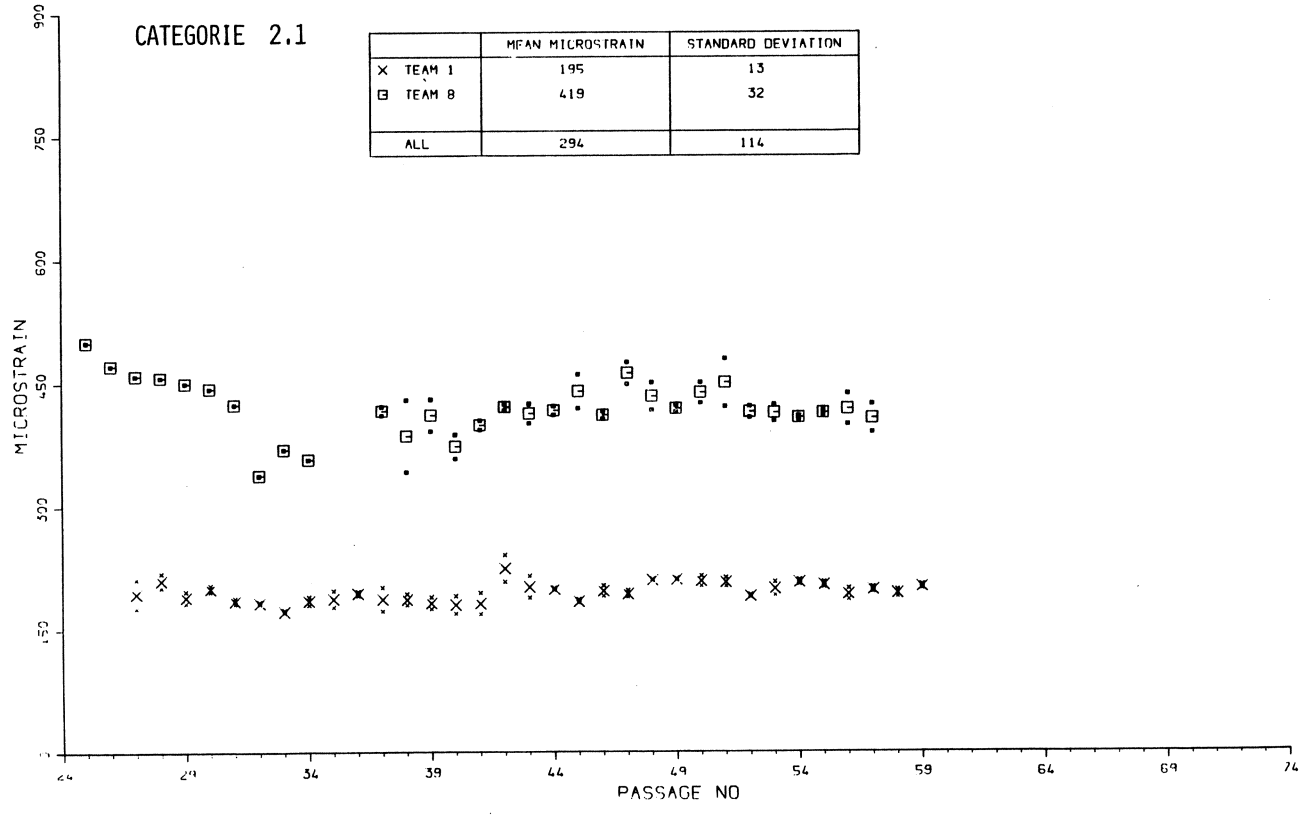


Figure VI.27 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 2.1

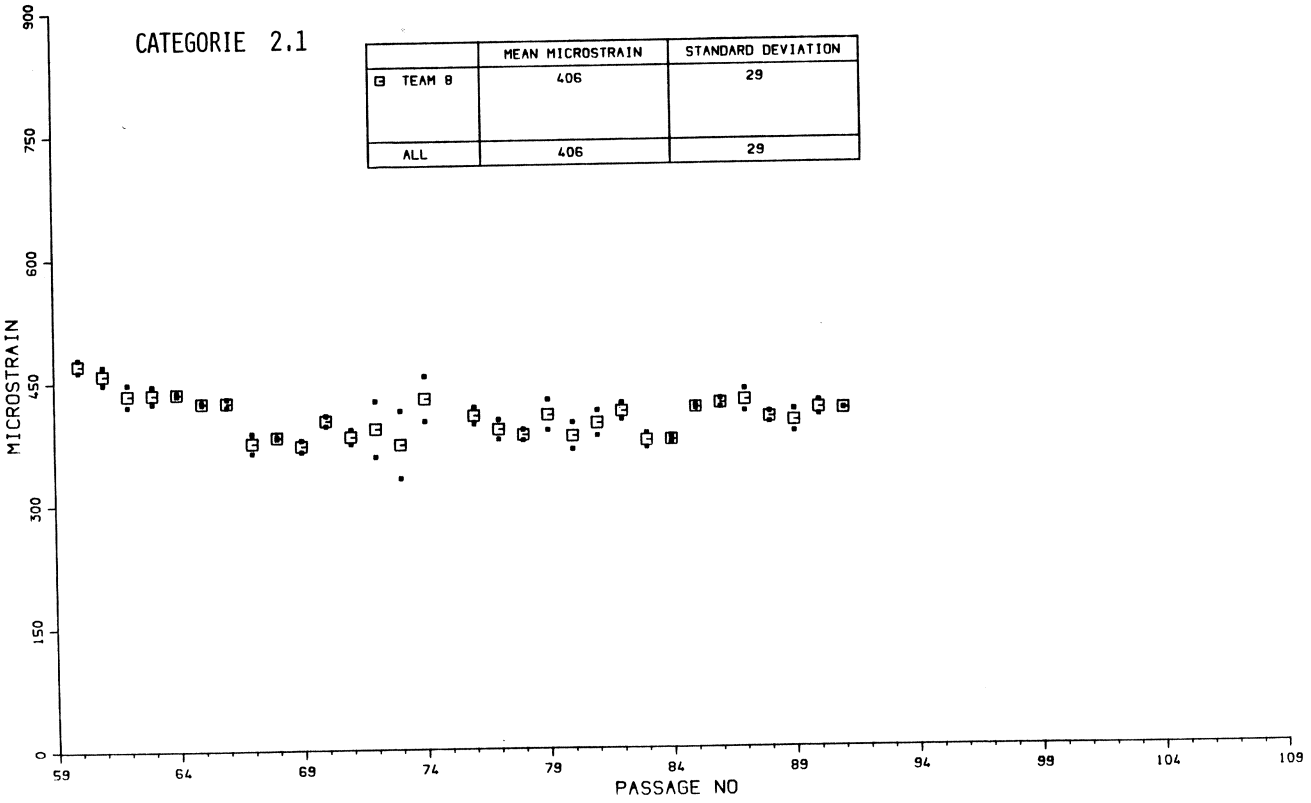


Figure VI.28 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 2.2

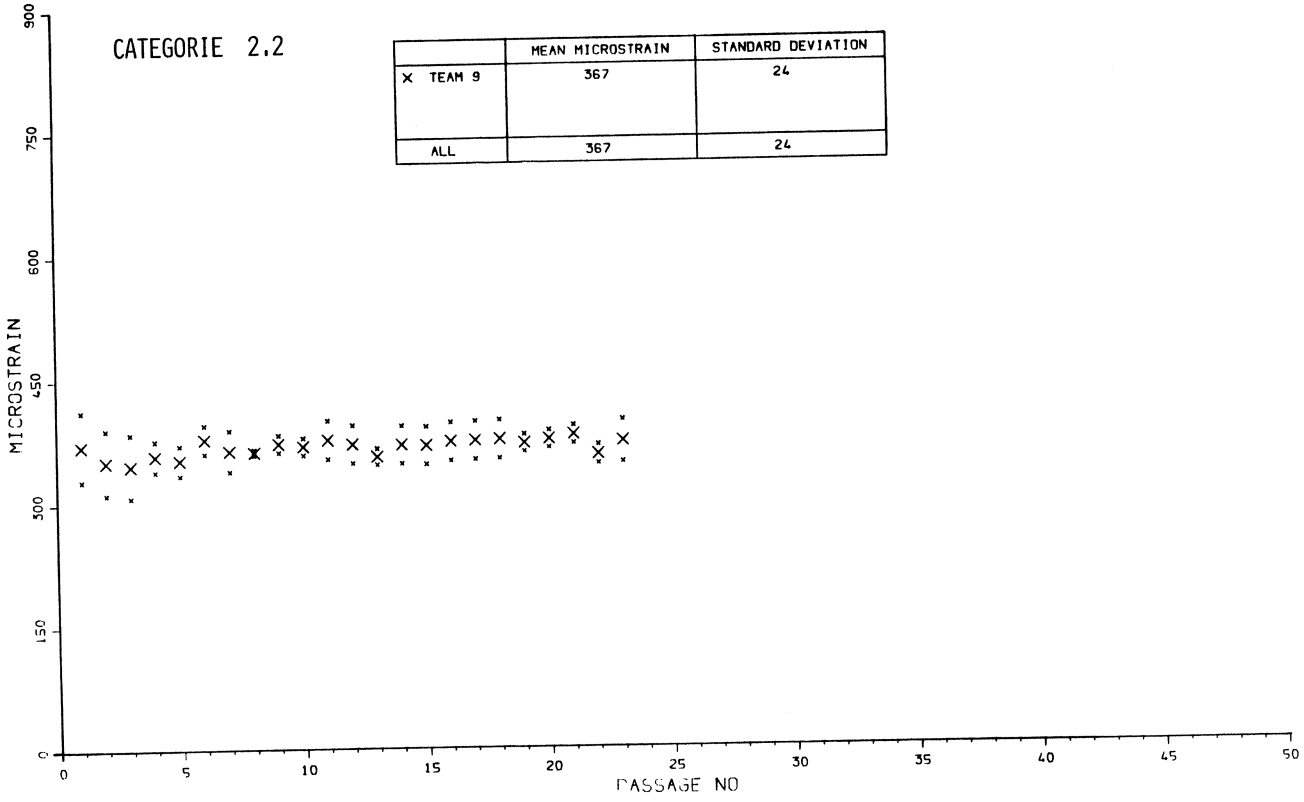


Figure VI.29 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C pour les jauges de la catégorie 2.2

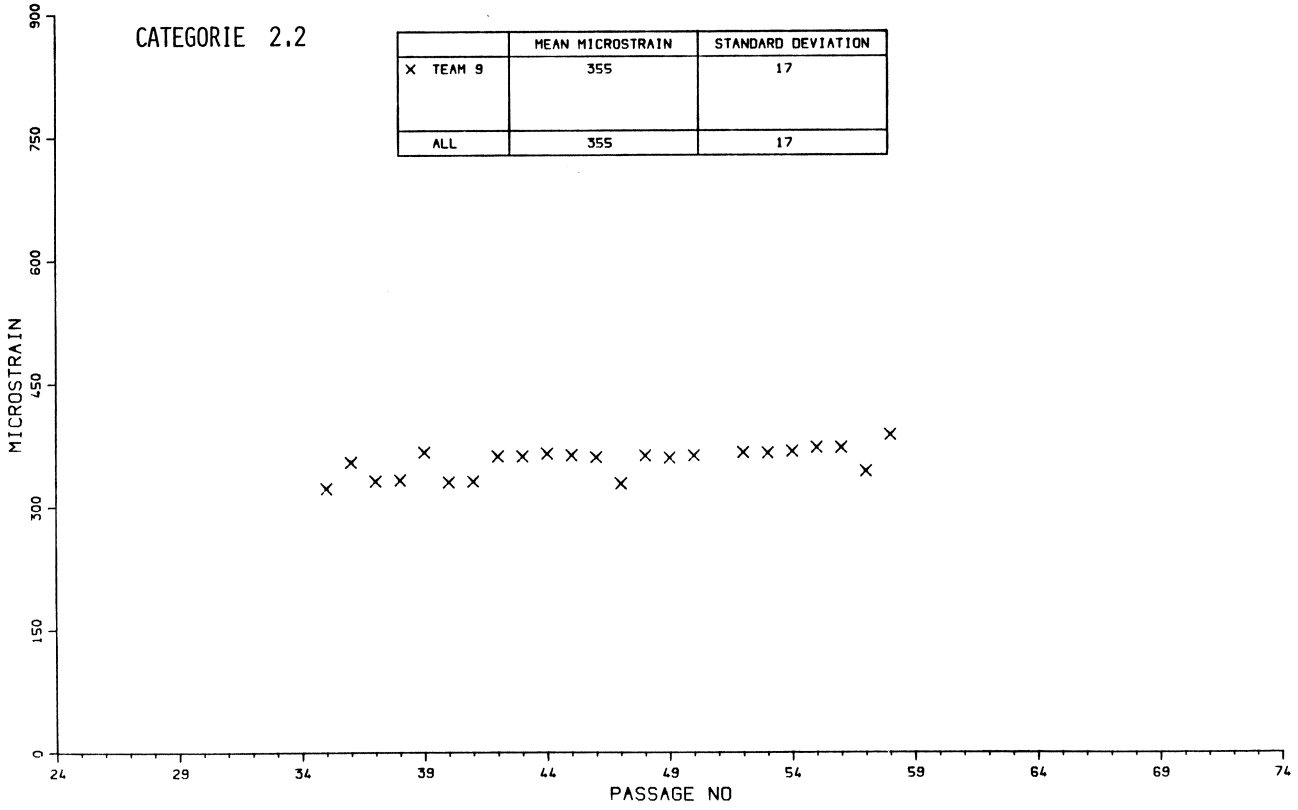


Figure VI.30 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 2.2

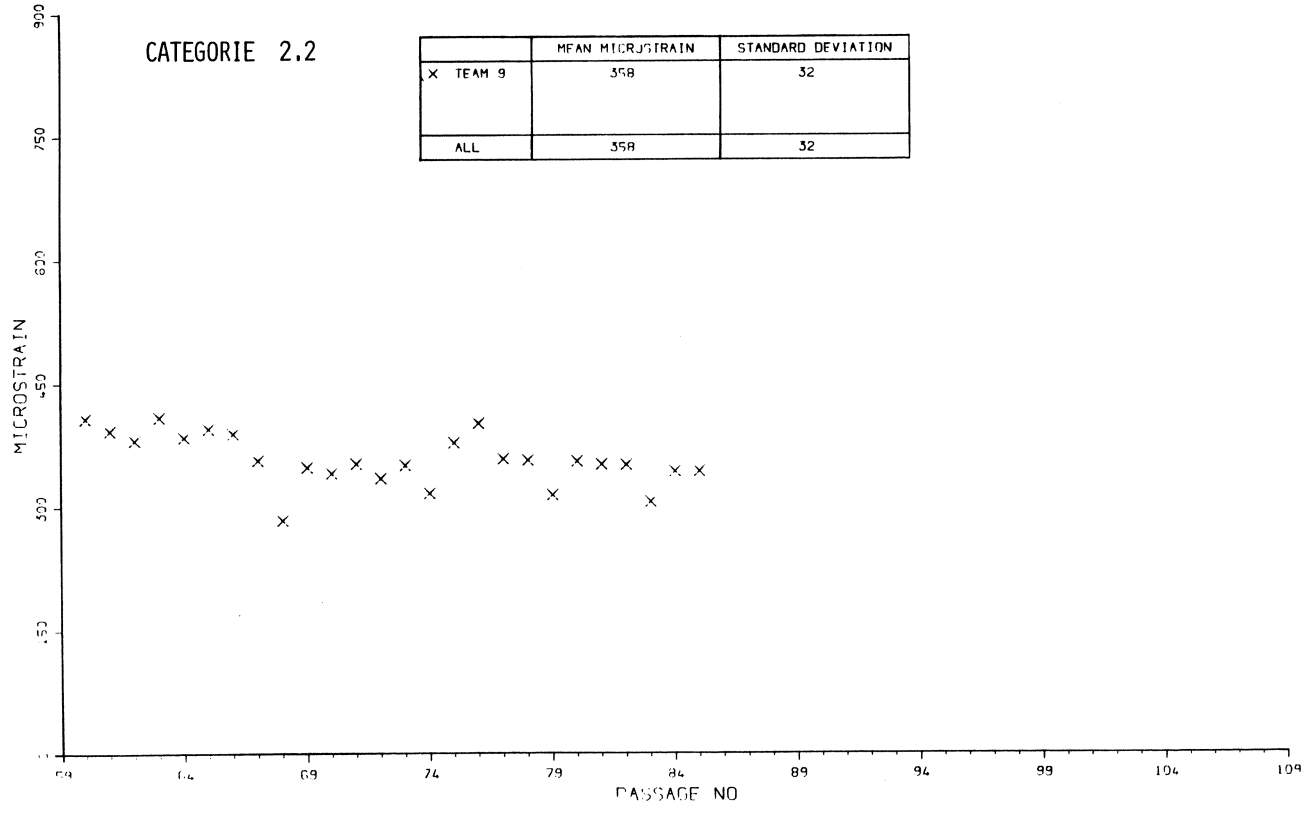


Figure VI.31 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 2.3

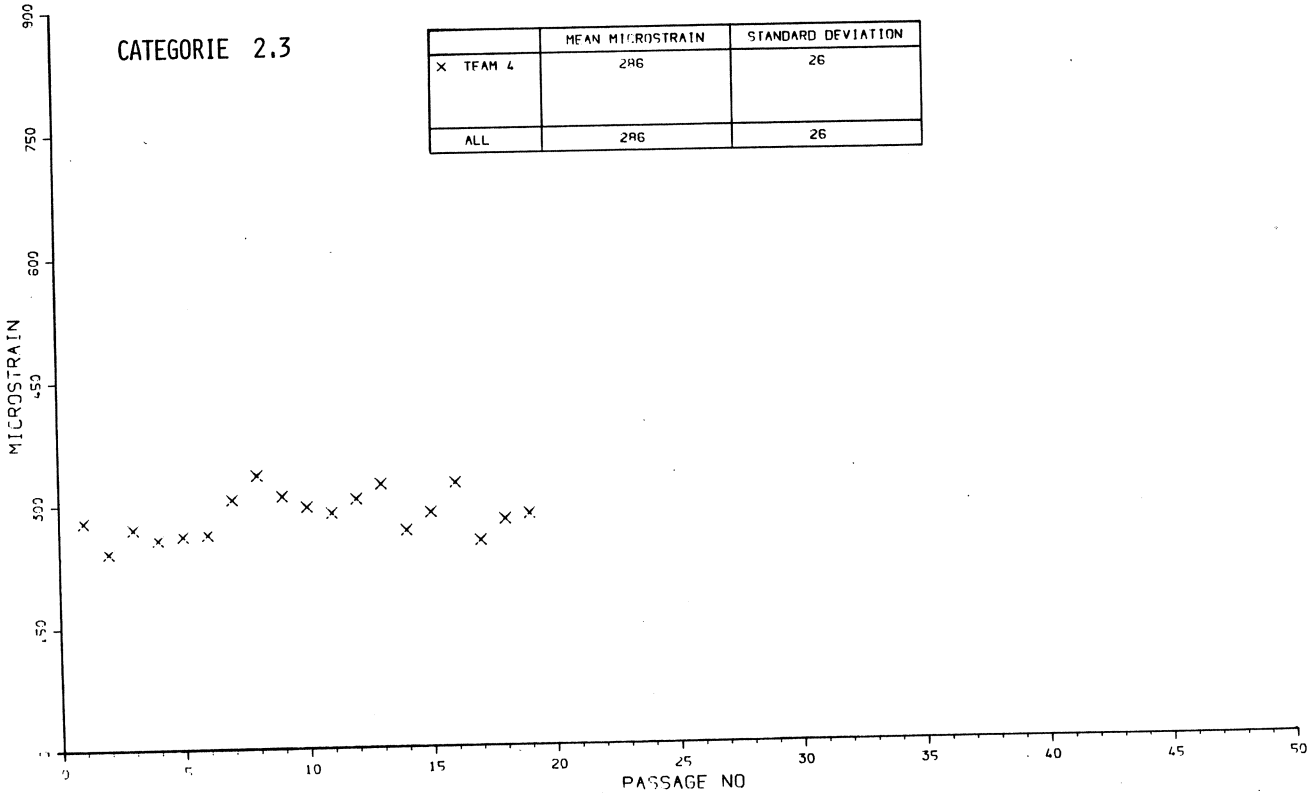


Figure VI.32 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 2.3

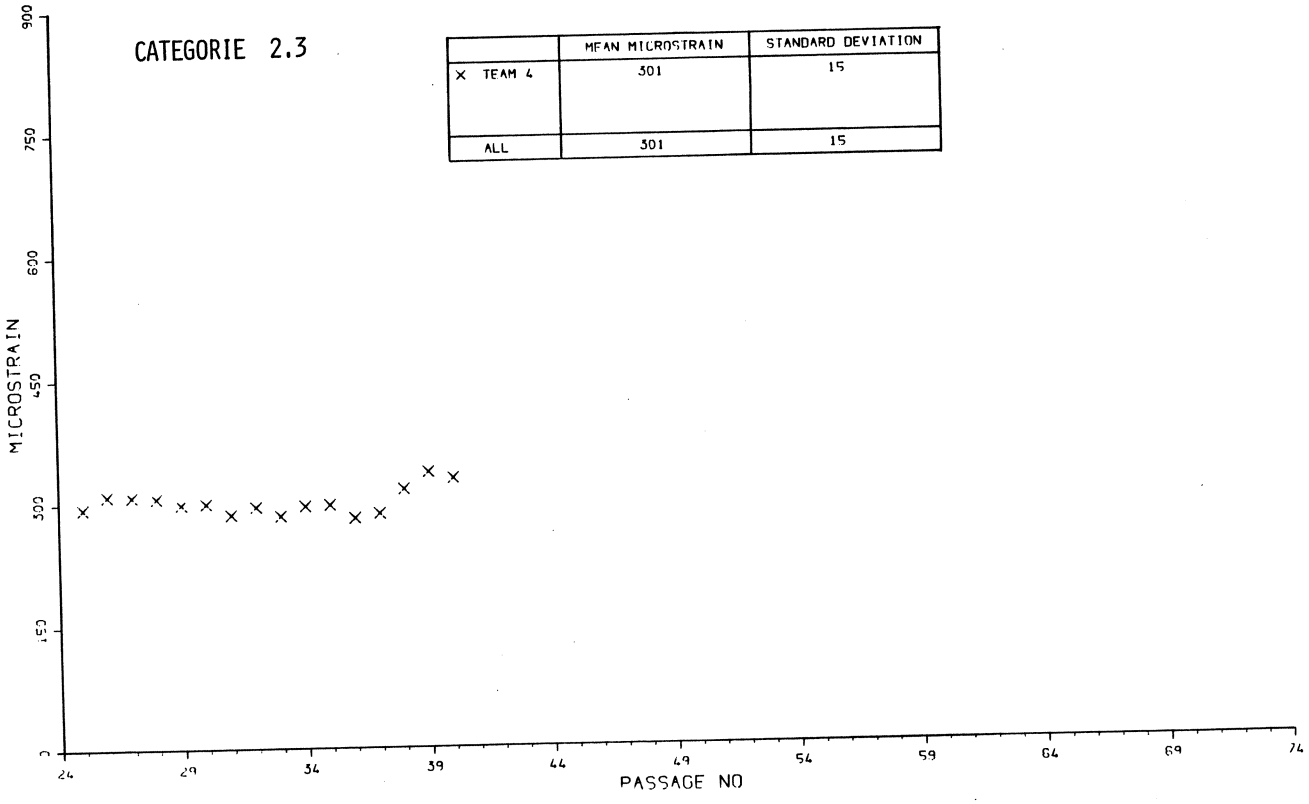


Figure VI.33 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 3.1

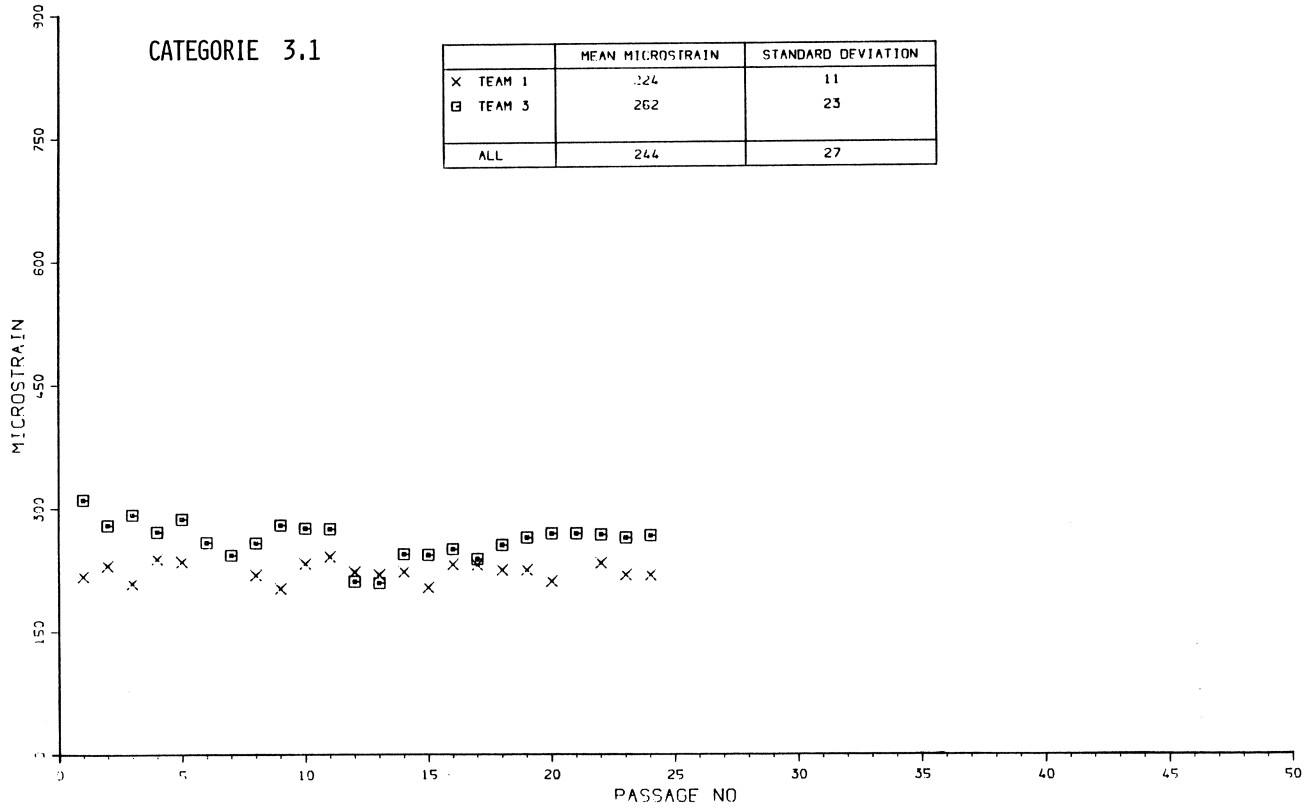


Figure VI.34 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 3.1

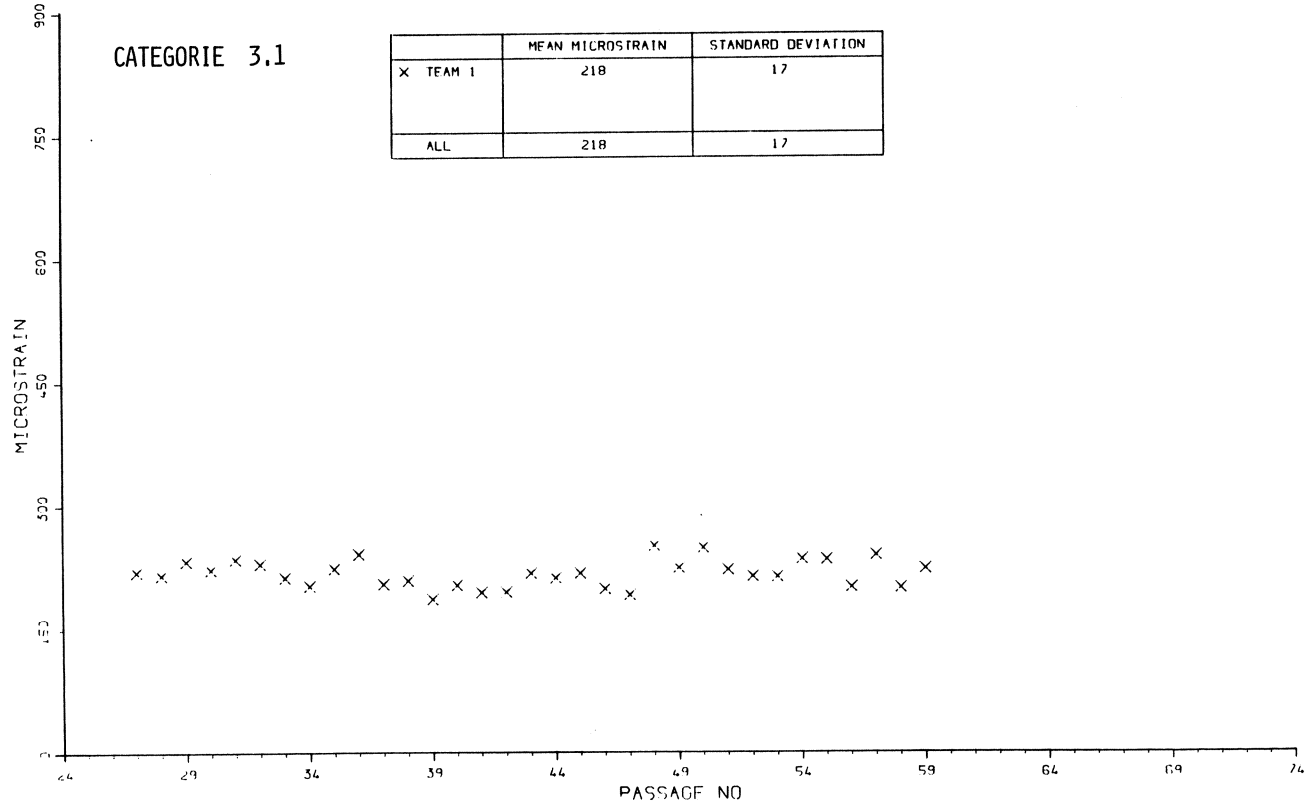
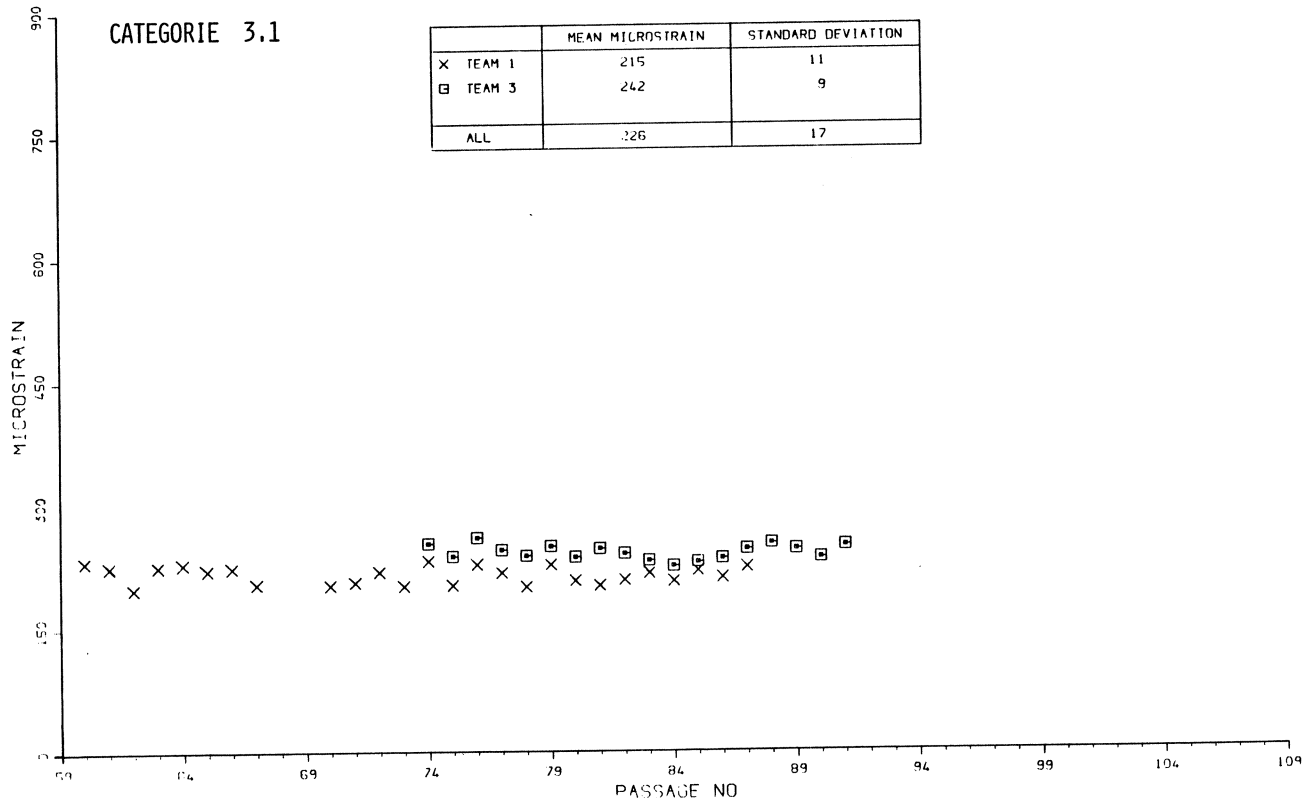


Figure VI.35 : Variation des déformations maximales absolues, ramenées à 24 °C, pour les jauges de la catégorie 3.1



VI.2.3 Influence du choix de la température standard sur les déformations calculées

Les courbes déformation/température obtenues précédemment pour les groupes de jauges de chaque équipe ayant des pentes différentes et étant donné les variations de la température du revêtement le long du tronçon d'essai, le choix de la température standard peut influer sur les comparaisons entre les différents groupes de jauges ou les différentes catégories. Pour ces raisons, la première partie de l'analyse, décrite dans le paragraphe VI.2.2 a été répétée à 2 autres températures standard 18 °C et 30 °C. Les graphiques qui en résultent donnant la variation des déformations pour les différentes températures standards en fonction du nombre de passages ne sont pas annexés à ce rapport.

VI.3 CONCLUSIONS

Le but de la campagne de mesures de Nardo était de comparer des résultats obtenus (dans des conditions supposées identiques) par différents procédés de mesures de déformation utilisés par les divers pays participants.

L'analyse entreprise montre l'extrême difficulté d'effectuer une telle comparaison, les conditions d'essai étant rarement identiques pour toutes les équipes participantes. Par exemple, les tableaux des annexes B2 et B3 montrent que la variation de la température caractéristique du revêtement est légèrement plus élevée pendant le premier jour des essais que lors des deux jours suivants. La température maximale du revêtement a également été atteinte pendant ce premier jour, dépassant les températures maximales du 2ème et du 3ème jours, respectivement de 4° et 7°.

Un second facteur compliquant encore ces comparaisons est la précision toute relative avec laquelle les véhicules de chargement pouvaient suivre de façon répétée la trajectoire imposée. Le premier jour d'essai, un changement de chauffeurs a encore augmenté cette difficulté, et comme cela vient d'être dit précédemment, une partie de la dispersion des résultats provient de l'impossibilité pour les véhicules de chargement de suivre la trajectoire imposée avec une précision suffisante. Cela est peut être une exigence trop élevée pour un système purement manuel dont la précision est plus faible que celle obtenue par un système guidé ou automatisé prévalant dans les autres types d'essai en vraie grandeur.

A la suite de la correction des résultats pour une température unique du revêtement, la dispersion de ces résultats pour certains groupes de jauges est réduite, mais l'étendue de cette réduction varie selon le type de jauge. Si l'on admet que ce processus de correction à une température standardisée est valable dans la même mesure pour toutes les jauges et toutes les équipes participantes, alors la dispersion résiduelle des résultats et la variation de la déformation moyenne dépendent à la fois de la répétabilité propre des jauges et de la position transversale des véhicules circulant sur les jauges. Si l'on considère les résultats tenant compte de la variation de la position transversale des véhicules (voir figures VI.17 à VI.35), il est clair que la moyenne à la température standard n'est que très peu modifiée, mais que la dispersion des résultats est considérablement réduite. Cela montre qu'une part significative de la dispersion peut être due à une imprécision dans la position du véhicule.

Si l'on représente les résultats en fonction des différents types de jauges utilisés au cours des essais, des différences de comportement apparaissent. Ainsi, par exemple, si l'on considère les maxima de la déformation corrigée, engendrés par chaque véhicule de chargement, le domaine des déformations mesurées s'étend de 181 à 357 μstrain.

Des calculs théoriques à l'aide du programme BISAR indiquent qu'à 24 °C et compte tenu des variations de l'épaisseur du revêtement bitumineux de 11,7 à 13,8 cm (ce qui a été observé in situ), le domaine de variation des déformations horizontales sous la roue arrière du véhicule à la base du

revêtement s'étend de 263 à 252 μstrain.

Cependant, étant donné les techniques de mise en place, toutes les jauges n'étaient pas situées exactement à la base du revêtement. De plus, des calculs montrent qu'une variation de 2 cm dans la position de la jauge peut réduire la valeur de la déformation à 67 % de celle qui se produirait à la base même du revêtement et cela pour des températures variant de 18 °C à 32 °C. Le domaine possible des valeurs théoriques des déformations mesurées à la base du revêtement s'étend donc de 168 à 263 μstrain.

Les figures VI.36 et VI.37 représentent catégorie par catégorie les valeurs moyennes journalières de la déformation, corrigées à 24 °C, ainsi que la moyenne des déformations maximales, enregistrée lors de chaque passage; de cette façon, les variations dues à la position transversale des véhicules sont minimisées. De nombreux résultats tombent à l'intérieur du domaine estimé bien qu'il y ait une concentration de résultats proches de la valeur limite supérieure.

Figure VI.36 : Déformations moyennes, ramenées à 24 °C, pour chaque catégorie de jauge

		VALEURS MOYENNES JOURNALIERES			MOYENNES DES MAXIMA		
CATEGORIE	EQUIPE	1er JOUR	2e JOUR	3e JOUR	1er JOUR	2e JOUR	3e JOUR
1.1	3	267	242	243	294	258	254
	5	269	275	288	307	315	304
	7	314	290	300	335	322	320
1.2	2	164	274	261	164	273	261
	6	199	181	186	212	196	198
1.3	1	151	149	---	181	177	---
2.1	1	126	135	---	175	183	---
	8	325	328	357	379	391	387
2.2	9	270	227	247	357	337	343
2.3	4	246	238	---	266	275	---
3.1	1	135	128	138	212	202	208
	3	203	---	220	254	---	236

Figure VI.37a : Résultats des mesures de déformations, moyenne et écart type, ramenées à 24 °C, pour toutes les jauges, par jour de mesure, par équipe et catégorie de jauge

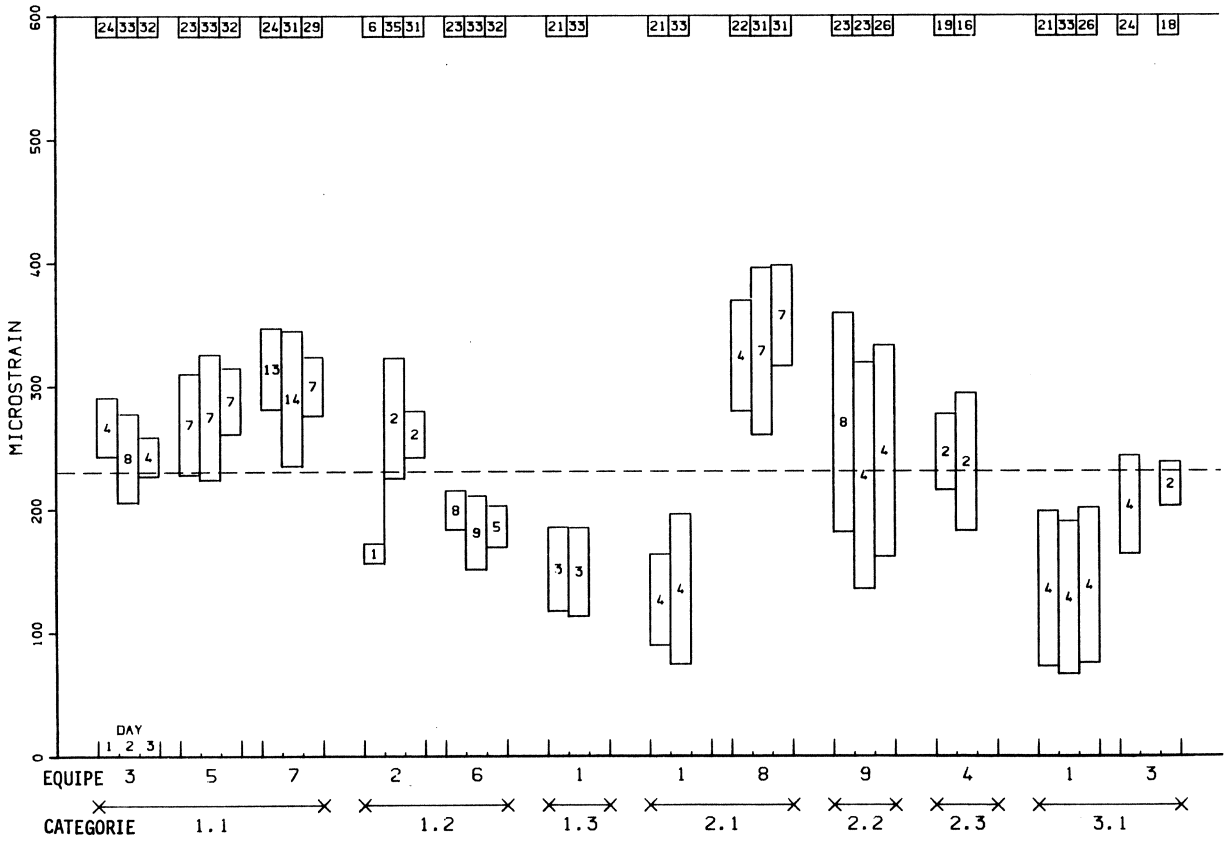
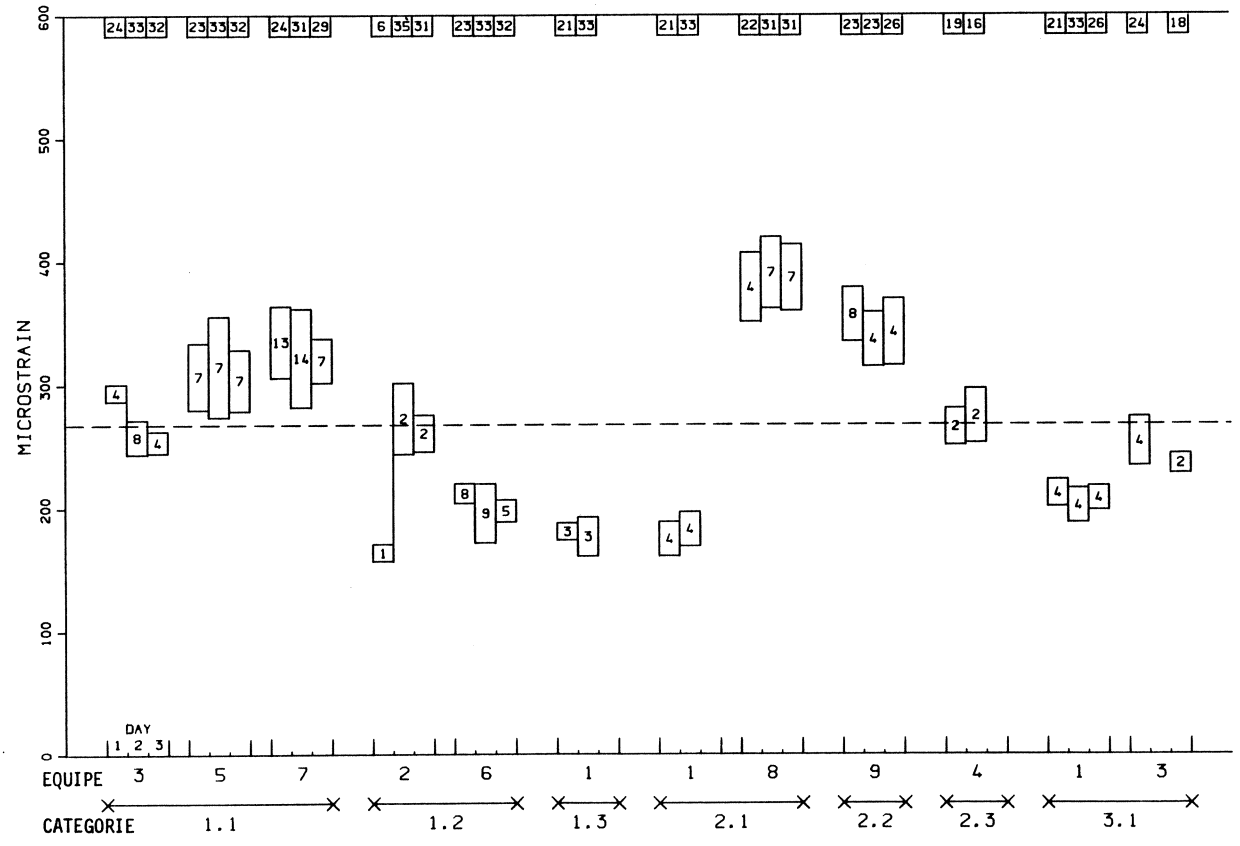


Figure VI.37b : Déformations maximales, moyenne et écart type, ramenées à 24 °C, par jour de mesure, par équipe et catégorie de jauge



Pour une catégorie donnée, lorsque plusieurs groupes de jauges sont utilisés, il y a généralement une bonne concordance entre les différents groupes. Cependant, dans la catégorie 2.1, il y a une différence substantielle entre les divers utilisateurs de ce type, par exemple lorsque l'épaisseur de la colle varie.

L'équipe No 1 a utilisé des groupes de jauges de chacune des trois catégories. Les moyennes corrigées des maxima mesurés avec chacun de ces groupes présentent une bonne corrélation (181, 175, 212 μstrain) bien que ces valeurs soient toutefois plus basses que la normale. Une telle corrélation indique que les jauges sont fiables et précises, et l'erreur de trajectoire des véhicules de chargement ayant déjà été prise en compte dans le cadre de ces résultats, une autre explication pour ces moyennes basses doit être envisagée.

De la même manière, les résultats de l'équipe No 8 présentent un écart type relativement bas, mais une valeur moyenne nettement plus haute que le reste des résultats. Cela indique que, bien que l'on puisse estimer que les jauges travaillent normalement, un facteur externe (peut-être dû à la mise en place ou introduit par des variations dans la résistance du revêtement, le module du matériau ou l'adhésion entre les couches) est responsable de ces mesures plus élevées.

Les relations entre la déformation et la température du revêtement indiquées dans les figures VI.2 à VI.10 ont été établies sur la base de toutes les données de déformation et les mesures de température effectuées par l'équipe No 3. Des essais de laboratoire sur les matériaux utilisés pour la construction du revêtement ont permis de déterminer les modules qui ont ensuite été introduits dans le programme BISAR pour étudier l'influence théorique de la température sur les déformations mesurées. Les détails de cette étude sont donnés ailleurs dans ce rapport, mais en résumé on a pu déterminer que la relation théorique entre la déformation ϵ(μstrain) et la température du revêtement T(°C) pouvait être exprimée par :

$$\epsilon = 13.76 \times T - 64$$

pour l'épaisseur du revêtement bitumineux de Nardo et compte tenu de sa variation.

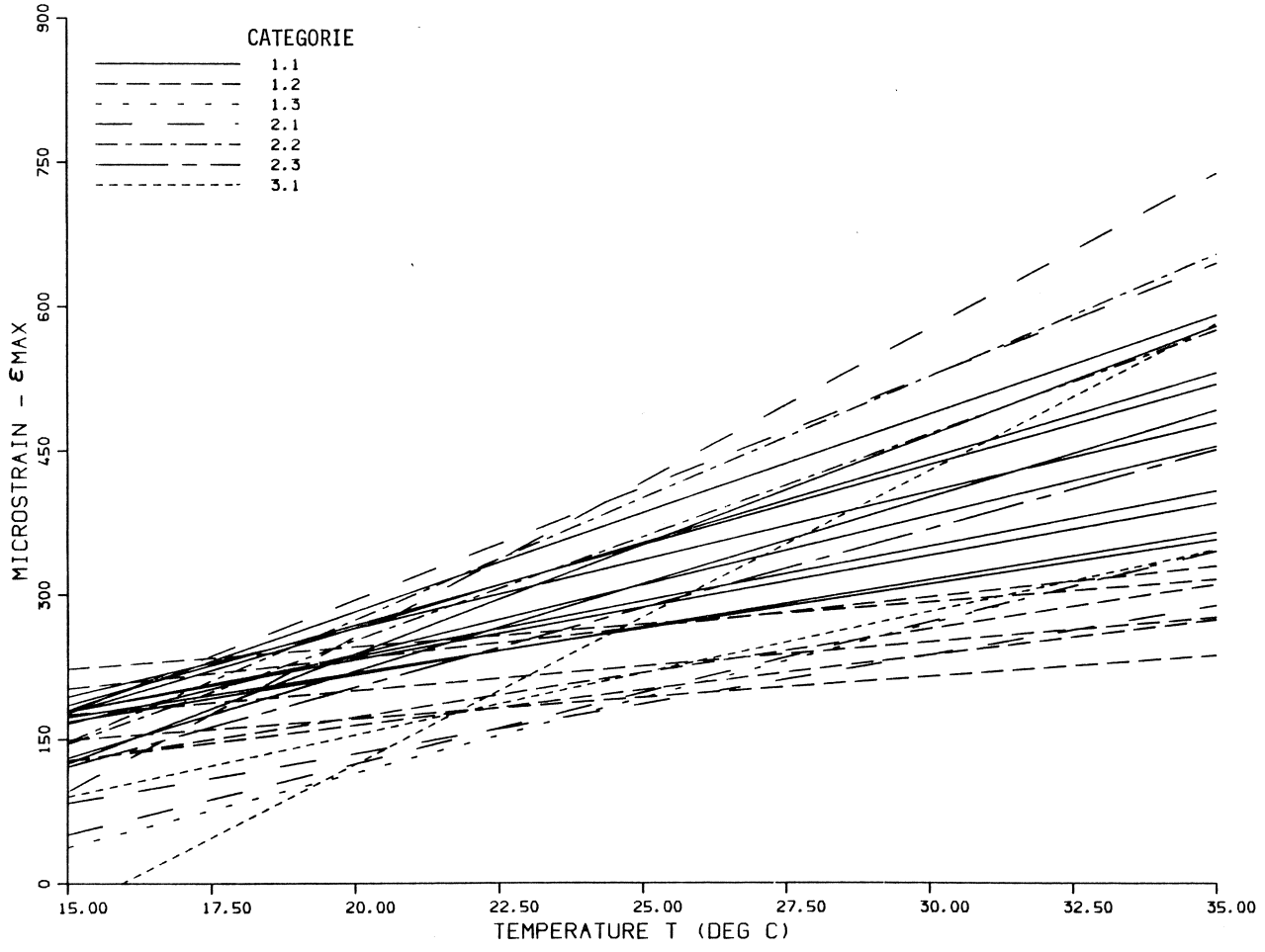
Les pentes des relations déformation/température du revêtement varient fortement autour de cette valeur théorique, de 4,7 jusqu'à un maximum de 32,1 et elles ne présentent aucune corrélation avec un groupe de jauges ou une situation sur le terrain. Cependant, si l'on tient compte de la catégorie de jauges, comme cela est résumé dans la figure VI.38, on s'aperçoit que les valeurs les plus basses de la pente correspondent aux jauges de la catégorie 1.2 et que si l'on considère chaque catégorie, les plus grandes variations de la pente correspondent aux catégories 2.1 et 3.1. Cela pourrait signifier également que la définition des différentes catégories n'est pas toujours très bonne.

Les jauges de la catégorie 1.2 sont connues pour être plus rigides que celles des autres catégories et cela peut expliquer leur sensibilité apparemment plus faible à la température, et (au moins dans le cas de l'équipe No 6) leurs résultats généralement plus bas, mais peu dispersés.

La variabilité des jauges des catégories 2.1 et 3.1 peut tenir au fait que chaque catégorie requiert une technique particulière de carottage pour mettre en place la jauge après la construction du revêtement, technique entraînant des épaisseurs différentes de colle. Il est possible que dans certains cas, cette méthode de mise en place gêne la mesure de la vraie déformation par l'introduction d'un matériau intermédiaire (colle) dans la structure du revêtement, empêchant ainsi un contact intime entre la jauge et l'ensemble du matériau de revêtement.

Par constraste, les pentes des jauges de la catégorie 1.1 (qui a le plus grand nombre de jauges en fonctionnement) sont réparties uniformément et sont proches de la valeur théorique. Les groupes des catégories 1.3 et 2.3 ont également des pentes proches de la valeur théorique. Par contre, les deux groupes de jauges restants (catégorie 2.2) ont une pente peu dispersée, mais nettement plus forte que la valeur théorique.

Figure VI.38 : Relation entre la déformation et la température de la chaussée, par catégorie de jauge



Chapitre VII

INTERPRETATION

VII.1 DOMAINE COUVERT

Dans le chapitre précédent (chapitre VI), les différentes équipes ont analysé les résultats des mesures de déformation. Mis à part une série de conclusions fondées, une grande importance a été accordée aux nombreuses difficultés qui ont compliqué cette étude. Ce travail d'analyse d'essais en commun ne serait pas complet sans des tentatives d'analyse supplémentaires pour s'assurer de la validité des résultats et pour expliquer quelques-unes des causes qui ont pu engendrer certaines des différences rencontrées.

Parmi les différentes étapes supplémentaires d'analyse, suivies par les divers participants à ces essais en commun, trois types d'approche distincts peuvent être définis.

D'une part, tous les paramètres variables qui ont posé des problèmes pour le travail d'analyse des données (décrit dans le chapitre précédent) ont fait l'objet d'études détaillées dans le but de quantifier leur influence. Les conclusions de ces études sont brièvement décrites dans le paragraphe VII.2.

D'autre part, il y a une tentative d'explication théorique des résultats et de leur variabilité par la détermination de valeurs "théoriques" de la déformation utilisant un modèle analytique ainsi que les caractéristiques des matériaux de la structure obtenues par des essais in situ ou en laboratoire. Les résultats de ce type d'étude seront donnés au paragraphe VII.3.

Enfin, l'influence du type de construction des jauges a été étudiée, en particulier les effets dus à la rigidité de la jauge et à la présence de colle. Les résultats de ces études se trouvent au paragraphe VII.4

Dans le paragraphe VII.5, les données ont été ajustées sur la base des conclusions des variabilités des paramètres, décrites au paragraphes VII.2.

VII.2 INFLUENCE DES PARAMETRES

VII.2.1 Etendue de l'analyse

Comme cela a déjà été mentionné plusieurs fois dans ce rapport, en particulier lors de l'analyse des résultats au chapitre VI, on remarque que de nombreux facteurs peuvent avoir une influence plus ou moins grande sur les valeurs mesurées de la déformation, sous l'effet d'une charge.

Les différences dues à la non homogénéité des propriétés des matériaux (qualité et épaisseur des couches de la superstructure et de l'infrastructure) ont déjà été mises en évidence de façon indirecte par les résultats des essais dynamiques effectués sur la structure, soit avec le déflectomètre à boulet (Dynatest 8000), soit avec le vibreur lourd du BAST (voir figure IV.8 au chapitre IV.4).

L'influence théorique d'autres paramètres intervenant lors du programme commun OCDE à Nardo a été calculée. Les calculs effectués au BAST à l'aide du programme BISAR(*) (avec le même type de structure que celui utilisé dans les études mentionnées au chapitre VII.3) ont montré, en particulier, l'influence des facteurs suivants sur la valeur calculée de la déformation :

- modification de la température dans les couches bitumineuses
- différence de l'épaisseur des couches bitumineuses
- distance entre la jauge et la base de la couche
- excentricité de la charge.

VII.2.2 Modèle de chaussée et données de base

Tous les calculs ont été faits à l'aide du programme BISAR (et en supposant un interface rugueux) avec un système tricouche ayant essentiellement les caractéristiques suivantes :

No couche	Matériau	Epaisseur (mm)	E [MPa]	φ
1	béton bitumineux	135[1,2]	3300[3,4]	0.35
2	fondation en grave concassee	170	250	0.45
3	infrastructure	∃	200	0.45

1) des épaisseurs de 120 et 135 mm ont été utilisées pour l'étude de l'influence de la température et de la distance entre la jauge et la base de la couche

2) sept épaisseurs différentes (de 117 à 135 mm) ont été utilisées pour analyser l'influence de l'épaisseur de la couche

(*) BISAR: D.L. De Jong, M.G.F. Peutz, A.R. Korswagen, "Computer Program BISAR" SHELL Laboratorium, Amsterdam, 1973.

3) des modules variant entre 8000 MPa (à 15 °C) et 1300 MPa (à 32 °C) ont été utilisés pour étudier l'influence de la température. Dans ce cas particulier, un glissement entre les couches bitumineuses et la fondation en grave concassée a également été considérée

4) lors de l'analyse de l'influence de la distance entre la jauge et la base de la couche, 2 cas ont été considérés, soit : 18 °C (6500 MPa) et 32 °C (300 MPa).

Charge :	roue avant		27.5 kN	R = 110 mm
	roue arrière	2 x	29.0 kN	R = 107 mm

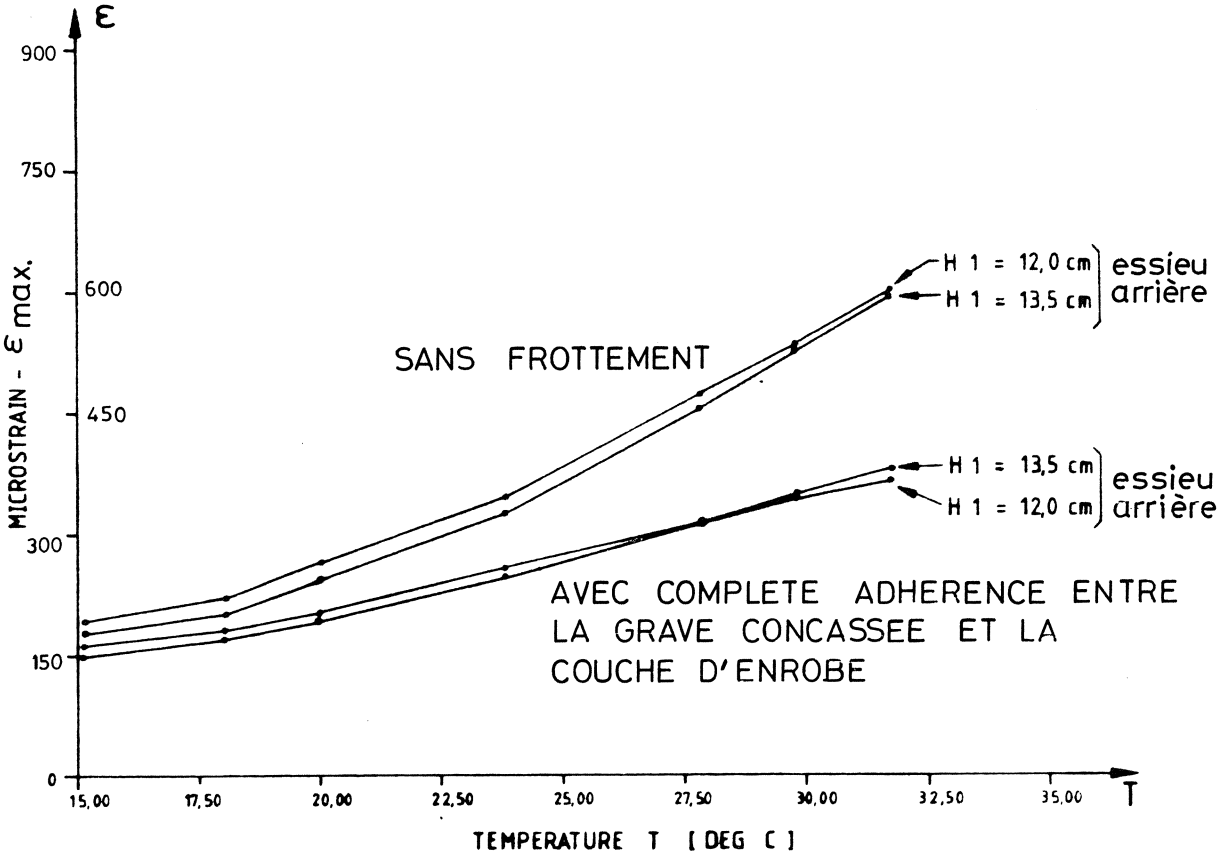
Les résultats sont donnés normalement à l'axe de la charge et dans le cas de l'étude sur les effets de l'excencitré de la charge, pour toutes les précisions.

Comme cela sera également mentionné au paragraphe VII.3, le modèle tricouche retenu n'est peut être pas le mieux approprié pour caractériser la structure du tronçon d'essai de Nardo. Les valeurs relatives obtenues grâce à ces calculs devraient cependant fournir une estimation suffisamment précise.

VII.2.3 Influence de la température

La figure VII.1 montre l'infuence de la variation de température (et du module) du béton bitumineux sous l'effet de la roue arrière.

Figure VII.1 : Influence de la température des couches bitumineuses sur les valeurs de la déformation



Sur cette figure, il est possible de voir que l'influence de la température est extrêmement importante. Dans le domaine de températures mesurées lors de l'essai de Nardo, un changement de température de 5 °C peut entraîner une différence de près de 50 % dans la déformation mesurée. Lors des calculs de la relation déformation-température, le cas du glissement entre les couches bitumineuses et la fondation en grave concassée a également été étudié. La courbe correspondante ayant une plus forte pente est également reportée à la figure VII.1.

VII.2.4 Influence de l'épaisseur de la couche bitumineuse

Les résultats de l'analyse sont donnés à la figure VII.2.

Figure VII.2 : Influence de l'épaisseur de la couche

	DEFORMATION ϵ xx	
H1 [mm]	ROUE AVANT [μstrain]	ROUE ARRIERE [μstrain]
117	227	263
120	221	263
122	217	259
125	211	257
130	202	255
135	193	252
138	188	251

Systeme tricouche: E1 = 3300 H1 voir ci-dessus (Tref = + 24 °C)
E2 = 250 H2 = 170 ν1 = 0.35
E3 = 200 - ν2 = 0
ν3 = 0.45
[MN/m^2] [mm] [1]

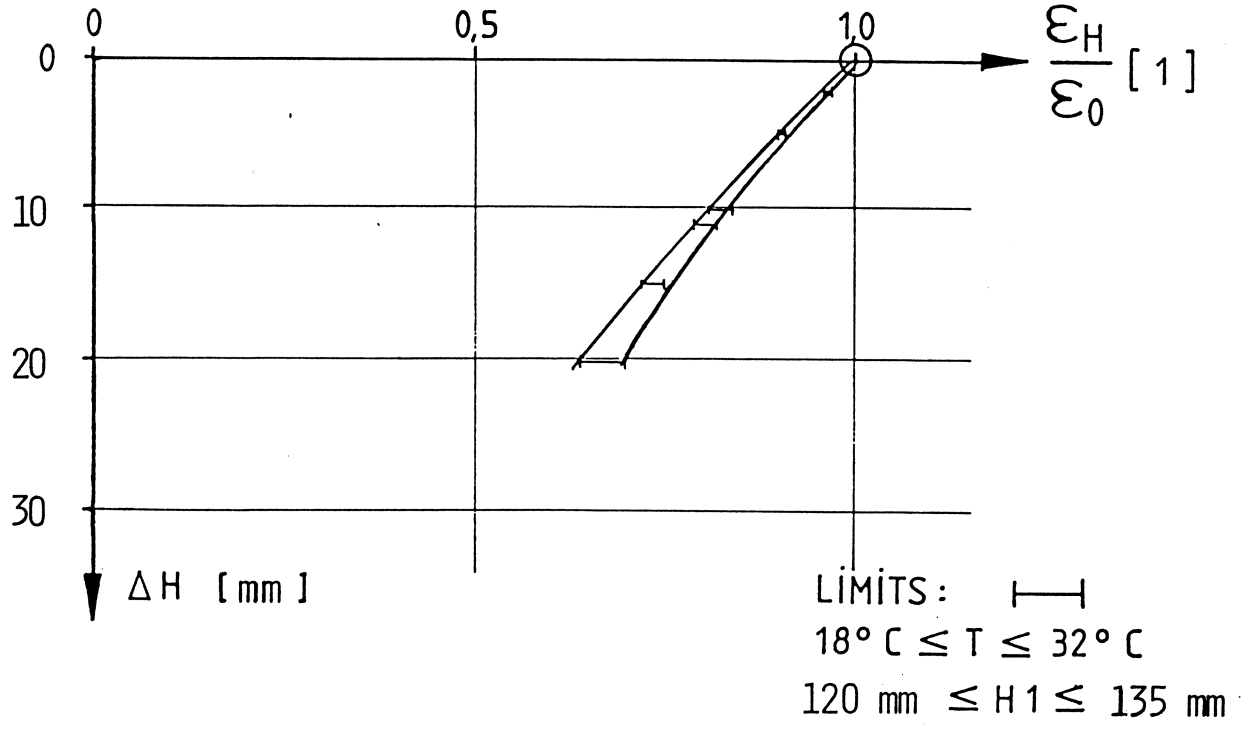
Ces résultats montrent que l'influence de l'épaisseur est fonction du type de charge. Pour les roues arrière avec une valeur absolue plus élevée, la variation de la déformation horizontale n'est que de 5 %, pour une variation d'épaisseur de 18 %. On peut donc considérer que la variation de l'épaisseur de la couche n'a qu'une faible importance.

VII.2.5 Influence de la distance entre la jauge et la base de la couche bitumineuse

Lors du dimensionnement analytique des chaussées, il est habituel de considérer la déformation de traction à la base des couches bitumineuses, comme l'un des critères de dimensionnement (fatigue). Au cours des études expérimentales sur les chaussées, il est donc important de emsurer la déformation à cet endroit. Cependant, il n'est pas toujours possible, pour de nombreuses raisons, de placer la partie active de la jauge, exactement à cet endroit. Ainsi, la jauge étant placée sur son support, la protection dont on la revêt peut lui donner une position "plus haute" que la base de la couche bitumineuse. Les différences par rapport à la position nominale ont été indiquées au chapitre III. Les résultats des rapports entre les valeurs ϵ mesurées et calculées au chapitre III.3 pour les équipes ayant un rapport $\epsilon m/\epsilon c$ proche de 1 (la valeur médiane du rapport pour ces équipes étant > 1.0) indiquent également une tendance à avoir une position surélevée de la jauge.

Les résultats de l'analyse de cette influence sont donnés dans la figure VII.3.

Figure VII.3 : Influence de la distance entre la jauge de déformation et la base de la couche bitumineuse (ϵo = déformation à la base de la couche, ϵn = déformation à une distance Δh au-dessus de la base de la couche)



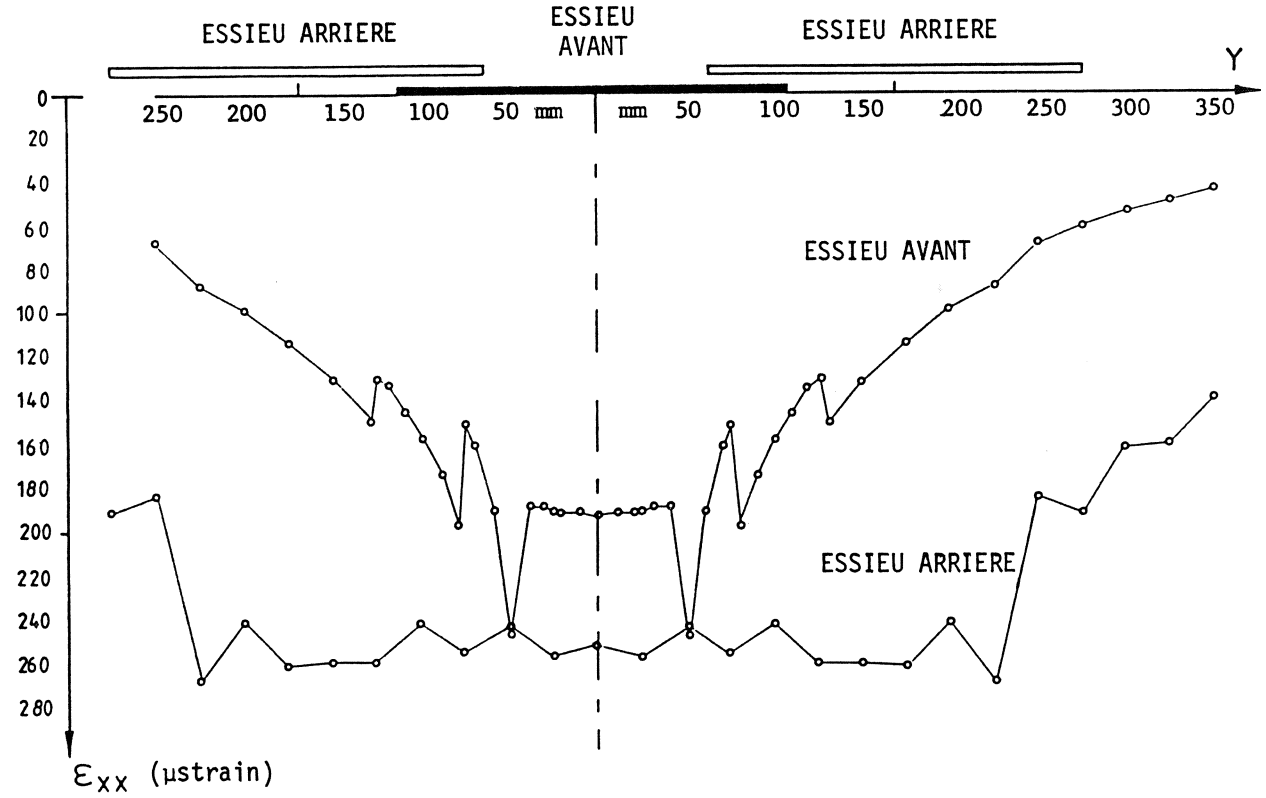
Ces résultats montrent que cette influence n'est pas négligeable avec des différences de déformation de 10 % pour une distance de 5 mm seulement et de jusqu'à 30 % pour une distance de 20 mm.

VII.2.6. Influence de l'excentricité de la charge

Dans le chapitre précédent, il a été beaucoup question de la précision avec laquelle les chauffeurs des véhicules suivaient l'axe de positionnement des jauges de déformation; cela afin d'obtenir le plus grand nombre de passages possibles donnant la valeur maximale de la déformation. Celle-ci dépend également des caractéristiques géométriques décrites au chapitre V.

La figure VII.4 montre la ligne d'influence de la déformation de traction à la base de la couche bitumineuse dans le sens du trafic. On peut remarquer que la courbe correspondant au jumelage arrière (pour laquelle les valeurs correspondantes de la déformation ont été analysées) est très plate, sous et entre ces deux pneus. Cependant, la déformation commence à décroître vers les bords extérieurs du jumelage, alors qu'on est encore sous un pneu. Une valeur de 50 % seulement du maximum peut être calculée à une distance de 50 mm du bord extérieur du pneu. Le résultat de ces calculs montre l'extrême importance d'un positionnement précis de la jauge.

Figure VII.4 : Déformation de traction horizontale à la base de la couche bitumineuse en fonction de la position latérale par rapport aux charges



VII.3 CALCUL DES DEFORMATIONS

VII.3.1 Comparaison des déformations mesurées et calculées en utilisant les mesures du déflectomètre à boulet

La méthode des épaisseurs équivalentes (également utilisée dans ELMOD) a permis de calculer les déformations dans les couches bitumineuses pour un jumelage avec les modules donnés dans les figures IV.19 et IV.20 du chapitre IV.4.2. Le jumelage des camions A et C a été représenté par 2 charges circulaires de 107 mm de rayon et par une pression répartie uniformément de 0,8 MPa, la distance entre les centres des deux surfaces de chargement étant de 340 mm.

Le temps de chargement du déflectomètre à boulet (utilisé pour déterminer les modules) est d'environ 25 ms, ce qui correspond à une vitesse de 60 à 70 km/h, alors que la vitesse réelle des camions n'était que de 30 km/h. Pour tenir compte de cette différence dans les temps de chagement, les modules des couches bitumineuses ont été réduits de 25 %. Cette réduction a été estimée en tenant compte de la relation entre le module et la fréquence de chargement déterminée au BAST sur l'éprouvette x 13 carottée dans le tronçon d'essai. Un coefficient de Poisson de 0,35 a été admis pour toutes les couches.

Les déformations calculées ont été comparées à quelques-unes des valeurs mesurées. En ce qui concerne les modules mesurés dans l'après-midi du 11 avril, les passages 85-89 ont été retenus. Ces passages ont eu lieu immédiatement avant l'essai au déflectomètre à boulet. En ce qui concerne les modules du matin du 12 avril, les passages 60-63 ont été retenus, passages ayant eu lieu le matin du 11 avril à des températures très semblables à celles du matin du 12 avril. La valeur mesurée est la moyenne de la valeur maximale de chaque groupe de jauges, lors du passage soit du camion A, soit du C.

Les déformations calculées ϵc, la déformation mesurée ϵm, ainsi que le rapport $\epsilon m/\epsilon c$ sont donnés aux figures VII.5 et VII.6. Le matin du 12 avril, une série de modules a été déterminée sur chacune des zones d'essai. Les déformations maximales et minimales calculées sur la base de ces modules sont données dans ces figures. Aucun module n'a été déterminé le 12 avril pour les équipes 1 et 2. La valeur donnée (pour ces équipes 1 et 2) a le même rapport.

Figure VII.5 :

Déformations calculées, comparées aux déformations maximales moyennes ϵc pour les modules déterminés le 11 avril, température de la chaussée 23,2 °C, ϵm correspondant aux passages 85-89 (camions A + C)

* passages 35 - 40

Equipe	ϵc	ϵm	$\epsilon m/\epsilon c$
1	248	219	0.88
2	221	278	1.26
3	244	249	1.02
4	310	361*	1.16
5	293	318	1.09
6	317	201	0.63
7	291	326	1.12
8	247	388	1.57
9	281	273	0.97

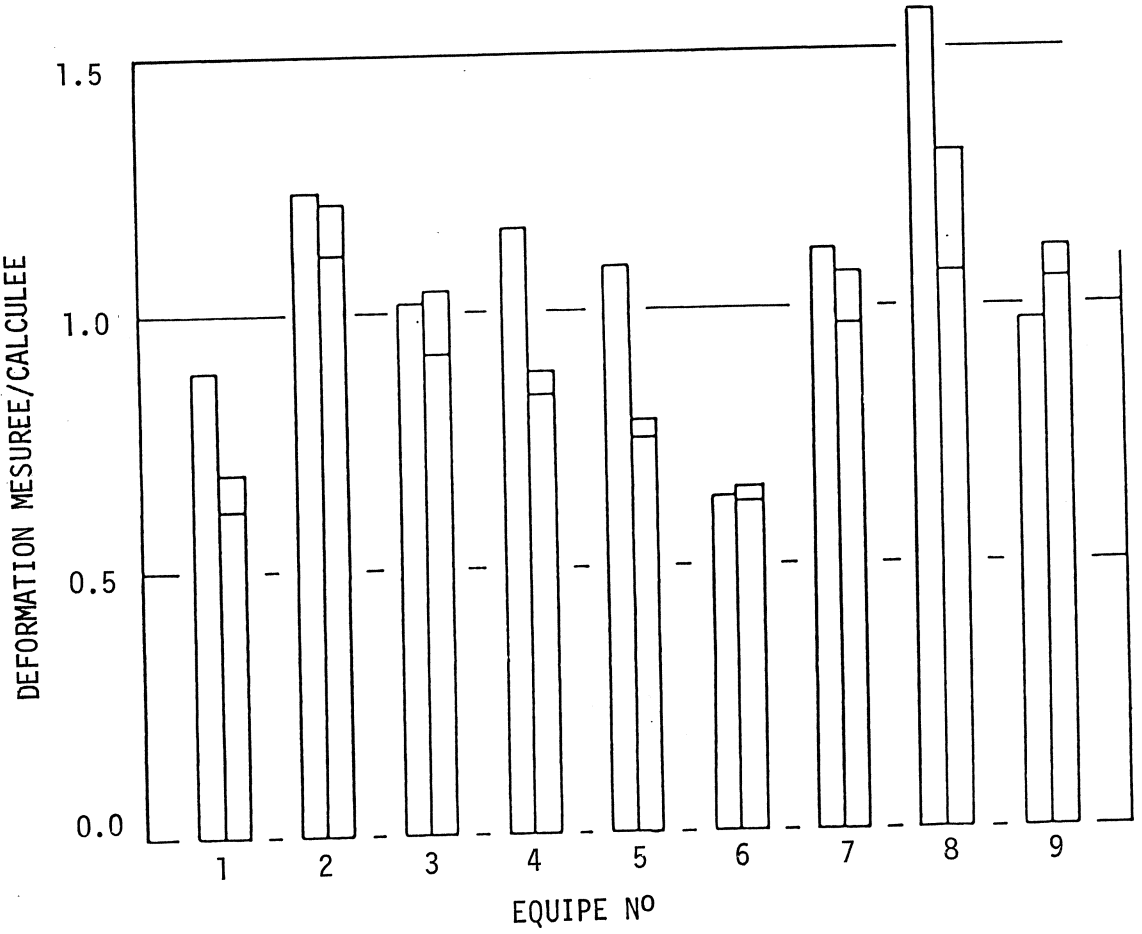
Figure VII.6 :

Déformations calculées, comparées aux déformations maximales moyennes ϵc pour les modules déterminés le 12 avril, température de la chaussée 15,5 °C, ϵm correspondant aux passages 60-63 (camions A + C)

* passages 26 - 29

Equipe	ϵc	ϵm	$\epsilon m/\epsilon c$
1	(206-224)	140	0.62-0.68
2	(184-200)	225	1.12-1.22
3	200-225	208	0.92-1.04
4	268-282	236*	0.84-0.88
5	274-286	215	0.75-0.78
6	250-261	162	0.62-0.65
7	224-251	240	0.96-1.07
8	202-245	263	1.07-1.30
9	228-242	254	1.05-1.11

Figure VII.7 : Rapport entre la déformation mesurée et la déformation calculée (selon essai au FWD) 1ère barre: 11 avril, 2ème barre: 12 avril



Les comparaisons entre les déformations mesurées et les déformations calculées n'ont été faites que pour quelques cas seulement et ne constituent qu'un contrôle ponctuel. Des différences de ± 20 % ou plus entre les valeurs mesurées et celles calculées peuvent donc provenir des variations naturelles ou d'erreurs aléatoires. L'accord entre les mesures et la théorie semble donc extrêmement encourageant.

VII.3.2 Calculs de la déformation à partir des modules des couches bitumineuses déterminées en laboratoire

Des essais très complets en laboratoire, effectués avec des carottes prélevées sur la chaussée de Nardo ont été entrepris par le CRR en Belgique et le BAST en Allemagne (voir également chapitre IV.3).

Dans les 2 cas, ces modules ont également été utilisés pour calculer les déformations en utilisant 2 modèles de chaussée, chacun de ces modèles étant un tricouche. Cela constitue une différence substantielle avec le système multicouche utilisé pour les calculs sur la base des essais effectués avec le déflectomètre à boulet (voir paragraphes IV.4.1.2 et VII.3.1) où un système à 4 couches a été utilisé, la couche no 3 étant constituée par un matériau granulaire situé au-dessus du sol de fondation qui lui-même constitue la couche no 4 considérée comme infiniment rigide. Il n'est pas surprenant que des différences apparaissent entre les résultats obtenus avec ces deux modèles de chaussée.

La comparaison des valeurs obtenues par le CRR (à l'aide du programme CRR-RTC) et le BAST (à l'aide du programme BISAR) pour un système multicouche équivalent constitue donc essentiellement une comparaison entre les deux programmes de dimensionnement. La différence principale entre les deux systèmes est constituée par la subdivsion du béton bitumineux en deux couches dans le modèle belge (comme cela a effectivement été mis en oeuvre), voir figure VII.8.

Figure VII.8 : Modules estimés des couches pour les calculs théoriques

Modèle de chaussée		Temp.	$\mathcal{E}$ - CRR (MPa)	$\mathcal{E}$ - BAST (MPa)	ν
Couche de surface	50 mm		8063		
		15 °C		8000	0.35
Couche de base	80 mm		12500		
Couche de surface	50 mm		3225		
		24 °C		3300	0.35
Couche de base	80 mm		5000		
Couche de surface	50 mm		645		
		35 °C		1000	0.35
Couche de base	80 mm		1000		
Fondation en grave concassée	170 mm	-	250	250	0.45
Sol de fondation		-	200	200	0.45

Les résultats des calculs de la déformation, au centre du jumelage arrière, effectués avec les 2 méthodes sont les suivants :

Température	15 °C	24 °C	35 °C
CRR	ϵ = 125 μstrain	ϵ = 218 μstrain	ϵ = 429 μstrain
BAST	ϵ = 150 μstrain	ϵ = 252 μstrain	ϵ = 426 μstrain

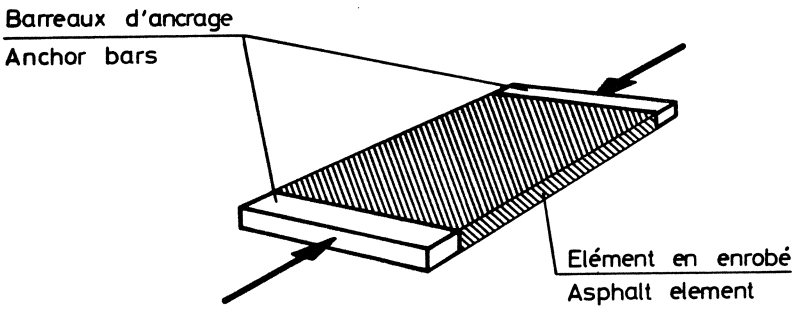
Les différences proviennent du choix des divers modules et des fréquences de chargement (15 Hz pour les modules du CRR, 8 Hz pour les modules du BAST). Des calculs avec le programme CRR MTC, utilisant les modules adoptés par le BAST, donnent presque exactement les mêmes résultats. On peut donc conclure que les deux programmes de calcul de déformation sont comparables.

VII.4 RIGIDITE DES SYSTEMES DE MESURE

VII.4.1 Jauges

On constate que tous les capteurs présentent une rigidité qui influence le résultat de la mesure. Cet effet est surtout important pour les jauges en H (catégorie 1) qui, à chaque extrémité, ont des barreaux d'ancrage pour assurer que la déformation de la jauge est la même que la déformation dans l'enrobé. Une certaine contrainte de compression est ainsi exercée sur l'enrobé entre les ancrages. Il en résulte une compression de l'enrobé et ainsi la jauge mesure une plus petite déformation dans l'enrobé que si la jauge n'avait pas été là. Il est très difficile d'évaluer l'importance de l'erreur, mais on peut estimer l'importance de la rigidité de la jauge en supprimant la connexion entre les ancrages de la jauge et l'enrobé, et en supposant une distribution régulière de la contrainte.

Figure VII.9 : Schématisation pour le calcul de l'erreur due à la rigidité de la jauge



Sur la base de ces simplifications, les erreurs ont été calculées pour 2 cas :

Cas 1
Module de l'enrobé 3'870 MPa
Déformation mesurée 270 microstrain

Cas 2
Module de l'enrobé 5'770 MPa
Déformation mesurée 245 microstrain

Figure VII.10 : Erreur calculée pour différents types de jauges en H

Equipe No	Jauge	Type	Effort total sur le matériau bitumineux		Déplacement de compression dans l'élément en matériau bitumineux	
			cas 1	cas 2	cas 1 %	cas 2 %
2	1.2	Aluminium	57 N	52 N	28 µstr.10	18 µstr. 7
3	1.1	Kyowa	51 N	46 N	22 µstr. 8	14 µstr. 6
5	1.1	Kyowa	51 N	46 N	21 µstr. 8	13 µstr. 5
6	1.2	Aluminium	151 N	137 N	56 µstr.21	35 µstr.14
7	1.1	Kyowa	51 N	46 N	18 µstr. 7	11 µstr. 4

Il est intéressant de noter que le pourcentage d'erreurs augmente lorsque la température diminue (module de l'enrobé plus élevé). On constate que tous ces systèmes (jauge en H) sont relativement rigides et en particulier que le type 1.2 de l'équipe 6 amène une diminution effective de la valeur mesurée de la déformation.

D'autre part, les jauges les plus rigides présentent des courbes de déformation de température dont les pentes sont les plus faibles.

VII.4.2 Carottages

L'avantage primordial des jauges de la catégorie 2.1 , équipe 8 et catégorie 3.1 réside dans la posibilité de placer ces capteurs dans des chaussées déjà construites. Cependant, la mise en place de la carotte avec sa jauge nécessite que soit colmaté l'interstice entre le trou et la carotte. Cet espace est très fin (0.35 mm) pour l'équipe 8 qui utilise une éprouvette fabriquée en laboratoire aux dimensions exactes du trou et plus important (5 mm) pour les équipes 1 et 3. Le remplissage par une colle époxy influence dans ce cas la mesure de la déformation par l'augmentation locale de la rigidité de la chaussée. En faisant l'hypothèse que cette colle possède un module de 3'000 MPa, le calcul théorique démontre qu'il se créer un renforcement local autour de la jauge qui diminue sensiblement la déformation à l'intérieur du matériau.

Figure VII.11 : Correction pour une température moyenne de 24 °C des maxima en fonction de ΔH (distance entre la jauge et la base de la couche) et H (épaisseur de la couche)

catég. de jauge	équipe no.	moyen. des maxima à 24°C		ΔH mm	corr. ΔH %	corr ΔH abs.	H mm	correction	valeur corrig.
1.1	3	294 258 254	269	2	+ 4 %	+ 11	122	- 4	276
	5	307 315 304	309	2	+ 4 %	+ 12	118	- 7	314
	7	335 322 320	326	2	+ 4 %	+ 13	128	-	339
1.2	2	164 273 261	267	-	-	-	124	- 4	263
	6	212 196 198	202	4	+ 8 %	+ 16	120	- 5	213
1.3	1	181 177	179	-	-	-	127	- 1	178
2.1	1	175 183	179	-	-	-	127	- 1	178
	8	379 391 387	386	5	+ 10 %	+ 39	134	+ 3	428
2.2	9	357 337 343	346	15	+ 25 %	+ 86	134	+ 3	435
2.3	4	266 275	271	6	+ 12 %	+ 33	120	- 5	299
3.1	1	212 202 208	207	-	-	-	127	- 1	206
	3	254 236	245	11	+ 20 %	+ 49	122	- 4	290

Après 9 mois, et bien que les câbles n'aient pas été spécialement protégés, le taux de perte est encore faible, généralement inférieur à 15 % Les jauges de l'équipe 4 présentent déjà les 50 % de perte lors de la pose de la superstructure, par contre, l'équipe 8, dont une seule jauge était hors service en 1984, a pratiquement perdu la totalité de ses jauges. Des infiltrations d'eau le long des câbles coupés au ras de l'enrobé hydrocarboné (ce qui n'est normalement pas le cas pour des jauges dont on prévoit l'utilisation future) peuvent expliquer que seule 1 jauge sur 10 a encore une résistance électrique de 350 Ω.

VII.5 CORRECTION DES MESURES IN SITU

Un autre moyen pour trouver une interprétation valable des résultats de l'essai in situ consiste à appliquer les conclusions des paragraphes précédents aux mesures in situ dont la présentation résumée pour chaque équipe et type de jauge est donnée à la figure VII.37. Dans cette figure, sont donnés les valeurs moyennes et l'écart type ramenés à la température de référence de 24 °C.

A l'exception des résultats du premier jour de l'équipe no 2 avec le type de jauge 1.2 (une erreur provenant du système d'acquisition de données est sans doute la cause des valeurs aberrantes), les résultats sont assez constants sur l'ensemble des trois jours, indépendamment des conditions de température effective (figure V.8).

Avant de tirer d'autres conclusions, il est cependant nécessaire de corriger ces valeurs en tenant compte des facteurs connus: l'épaisseur des couches (figure IV.2) et la position exacte de la jauge (figure III.11), et en utilisant les valeurs données au paragraphe VII.2, comme indiqué dans la figure VII.11.

L'allure générale des résultats indiqués à la figure VII.12 confirme globalement ceux obtenus avec l'approche décrite précédemment, à l'exception de ceux se rapportant au type de jauge 2.2 de l'équipe no 9 dont les valeurs deviennent ainsi nettement différentes. Le domaine de variation de ± 20 % de part et d'autre de la valeur moyenne de l'ensemble des données corrigées (qui ne tiennent pas compte des variations de la portance et de la qualité des matériaux) couvre également le domaine de variation des valeurs calculées.

Les jauges présentant la meilleure concordance avec la valeur moyenne générale et les résultats calculés sont les suivantes :

- type 1.1, utilisé par l'équipe no 3, 5 et 7
- type 1.2, " " no 2
- type 2.3, " " no 4
- type 3.1, " " no 3

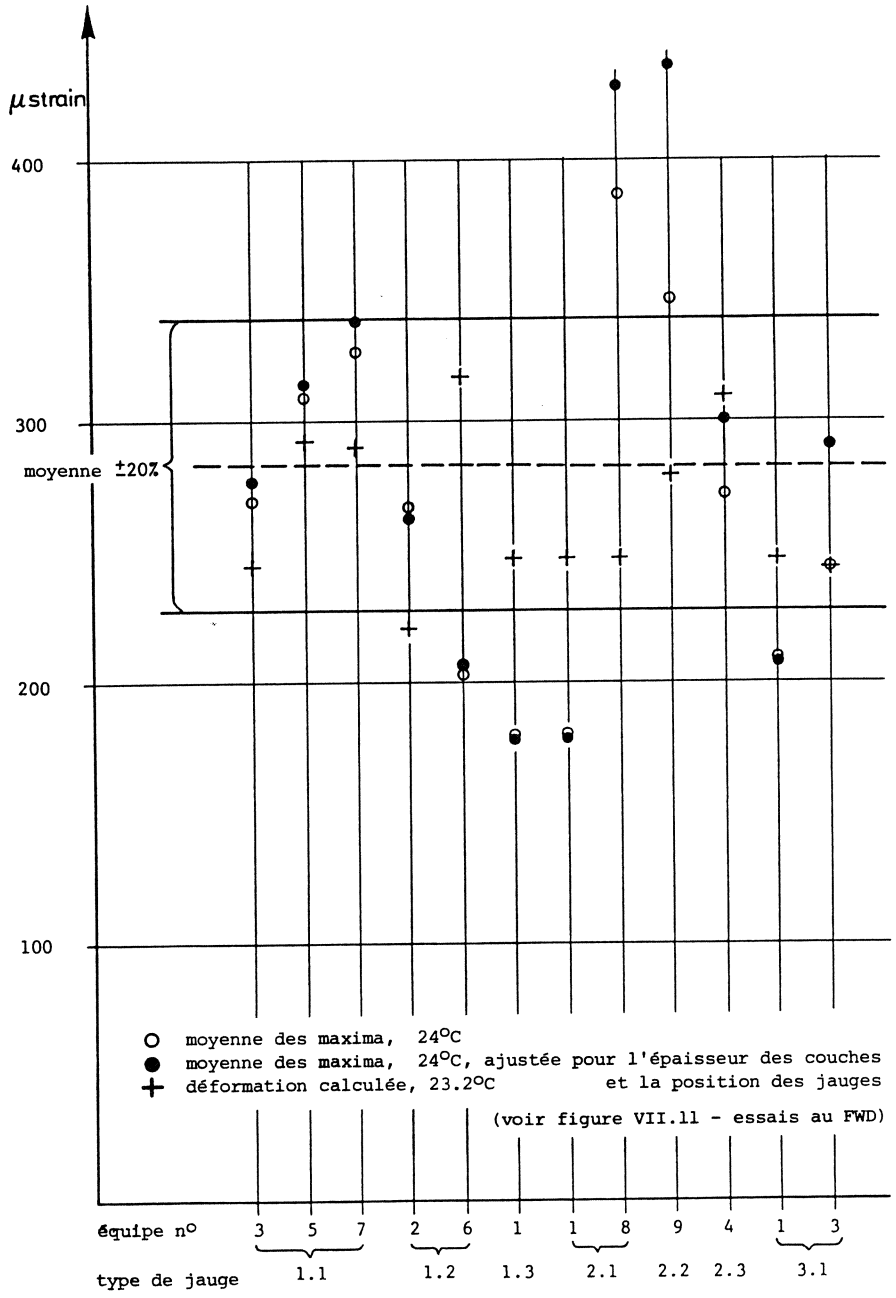
Deux types de jauges donnent des valeurs supérieures de 150 % à la moyenne générale :

- type 2.1, utilisé par l'équipe no 8
- type 2.2, " " no 9

Quatre jauges donnent des valeurs 30 à 40 % plus faibles que la moyenne générale :

- type 1.2, utilisé par l'équipe no 6
- type 1.3, " " no 1
- type 2.1, " " no 1
- type 3.1, " " No 1

Figure VII.12 : Valeurs des déformations à 24 °C



Chapitre VIII

CONCLUSIONS

VIII.1 Résultats de l'essai in situ

VIII.1.1 Analyse et interprétation des mesures

Analyser de façon complète la grande quantité de données fournies par l'essai de Nardo n'est pas à priori une tâche facile, en particulier si l'on tient compte des méthodes de travail habituelles des groupes d'experts internationaux.

Le groupe I2 a donc pris la décision de créer un sous-groupe chargé d'analyser les mesures et de préparer ce rapport avant même le début des essais in situ. Pour la suite du travail, des études sectorielles et des rapports préliminaires sur des sujets particuliers ont été attribués aux différents membres du groupe. Les chapites II à VII du présent rapport résultent de ce mode de travail; dans chacun de ces chapitres préparés par des auteurs différents, seuls des aspects particuliers sont traités, excluant toute analyse approfondie. Toutes les pièces du "puzzle" ayant été recueillies, un assemblage peut être enfin envisagé.

Comme cela a été mentionné auparavant, de nombreuses difficultés ont été rencontrées lors de l'analyse des mesures et une grande importance a été accordée au fait que différents paramètres, qu'on estimait contrôlables sinon constants avant les essais, se sont révélés en fait être très variables :

- certaines caractéristiques de la chaussée, discutées en détail au chapitre IV présentaient d'assez larges variations comme par exemple les épaisseurs des couches, la qualité des matériaux, la capacité portante (comme l'indique la déflexion dynamique),

- il est évident que l'on ne s'attendait pas à ce que la température reste constante pendant les 3 jours au cours desquels les camions ont circulé; cependant personne n'avait entrevu les problèmes soulevés par la mesure de trois températures différentes à la même profondeur nominale sur un court tronçon de chaussée "homogène",

- la charge statique de l'essieu arrière de l'un des trois camions était de 3 % plus élevée et la fluctuation de la position de l'axe de chargement a contribué à augmenter la dispersion des mesures.

La méconnaissance de la "vraie" valeur de la déformation à chaque chargement est un autre facteur important qui a rendu le travail d'analyse et d'interprétation particulièrement difficile. Comme cela a été indiqué en détail dans les chapitres précédents, différentes approches ont été utilisées et diverses études complémentaires ont été entreprises pour éliminer autant que possible quelques-unes des causes de la variation des résultats et pour trouver (ou tenter de trouver) ce qui pourrait être logiquement la plus probable "vraie" valeur.

De ce point de vue, le travail analytique décrit au chapitre VII.3.1 fournit des résultats importants. La détermination des modules des couches pour les secteurs de chaque équipe, détermination basée sur la mesure de la cuvette de déflexion à une température de 23.2 °C avec le déflectomètre à boulet élimine les variations provenant de différentes caractéristiques de la structure (capacité portante, épaisseurs et qualités des couches). L'utilisation de ces modules dans un modèle multicouche pour le calcul de la déformation sous l'effet d'un jumelage élimine également l'effet de la fluctuation de la position de la charge. La comparaison entre ces valeurs calculées et celles mesurées (moyenne des maxima) pour les mêmes conditions de température (24 °C) montrent une concordance étonnament bonne pour de nombreuses équipes et techniques. Cette concordance permet de retenir comme "vraie valeur moyenne" de la déformation une valeur de 270 µstrain pour ces conditions particulières de température et de charge (cependant d'autres calculs - chapitre VII.2.2 - donnent des valeurs plus basses. Aucune mesure n'ayant été faite sur les matériaux non liés et sur la fondation, les deux modes de calcul ne sont que de grossières estimations). De ce type d'analyse on peut conclure que les résultats obtenus par les équipes no 1, 6, 8 et 9 se distinguent des autres.

Dans la mesure où la vraie valeur reste inconnue, toute tentative d'expliquer certaines différences dans les mesures fournies par certaines jauges restera du domaine de l'hypothèse. Cela est d'autant plus vrai dans le cas des essais de Nardo étant donné l'importante variation des différents facteurs. Cependant, une tentative a été faite sur la base des observations disponibles et de considérations logiques (voir chapitre VII.5). De ce point de vue, on peut admettre qu'une valeur élevée du résultat de la mesure est probablement correcte (c'est-à-dire que le niveau de la déformation mesurée correspond à la réalité) tandis que différentes explications peuvent être trouvées pour des valeurs basses.

a) Jauges présentant des valeurs plus élevées

Comme le montrent des études théoriques, un glissement à l'interface entre la fondation en grave et la couche bitumineuse ainsi que des valeurs différentes du module et du coefficient de Poisson peuvent aisément conduire aux valeurs plus élevées mesurées.

Les jauges de déformation des équipes 8 et 9 sont collées en laboratoire sur

des éprouvettes sans autre matériau d'apport faisant office d'armature (IV.4.1). La taille des éprouvettes et les techniques de mise en place sont très différentes. Malgré ces différences, les valeurs corrigées sont presque exactement les mêmes (figures VII.11 et VII.12). Il en est de même de leur relation déformation-température. A basses températures, la rigidité du système de mesure ayant moins d'effet (IV.4.1), les résultats de ces équipes 8-9 correspondent tout à fait à ceux des autres équipes.

Une température plus élevée de la chaussée - qui en définitive entraîne une augmentation de la déformation - est au contraire une hypothèse plus réaliste. Les 2 jauges donnant des valeurs plus élevées sont en fait fixées sur des éprouvettes (cubes, cylindres) préparées en laboratoire. Si l'on admet que ces éprouvettes sont bien compactées, et de masse volumique élevée, leur conductivité thermique serait plus élevée que celle du matériau avoisinant de faible masse volumique tel que celui de Nardo. On envisagerait pas un tel phénomène avec un matériau avoisinant et une éprouvette de laboratoire de même qualité.

b) Jauges présentant des valeurs plus basses
Tandis que pour toutes les autres jauges les valeurs calculées tendent à sous-estimer les valeurs mesurées (exception: type de jauge 2.3 de l'équipe no 4 dont les valeurs sont très proches), pour les jauges présentant toujours des valeurs plus faibles, les calculs surestiment toujours la valeur mesurée.

Les jauges du type 1.2 utilisées par l'équipe no 6, d'aspect semblable à celles du type 1.1 ont une barre de connexion plus rigide (support de jauge entre les 2 barres d'ancrage). Comme cela a été indiqué dans l'approche théorique décrite au chapitre VII.4, la plus grande rigidité de la jauge peut entraîner une erreur significative (valeur calculée de l'erreur environ 20 %).

Aucune explication satisfaisante n'a été trouvée pour les résultats fournis par les 3 types de jauges de l'équipe no 1. La déviation étant constante au cours des trois jours de mesures, l'hypothèse d'une température constamment plus basse sur le tronçon de l'équipe no 1 ne semble pas correcte bien que cette possibilité ne puisse être totalement exclue (chapitre V.5).

VIII.1.2 Réussite de l'essai

Si l'on considère la question initiale "Mesurons-nous tous les mêmes valeurs ?". On peut considérer que les résultats décrits et commentés dans le paragraphe précédent sont très positifs. Un grand nombre des jauges utilisées dans différents pays ont toutes conduit - dans un domaine de variations acceptables - aux mêmes résultats pour des conditions d'essai données.

En ce qui concerne les autres jauges, des explications logiques ont été trouvées en ce qui concerne les résultats différents. De plus, la bonne corrélation observée entre les valeurs mesurées et les résultats des calculs à l'aide d'approches théoriques accroît également le niveau de confiance dans les résulats de l'essai.

La quantité et la variété des études complémentaires entreprises pour tenter de résoudre quelques-uns des problèmes parfois très ardus et leur présentation détaillée, fournissent une description tout à fait unique et presque complète des techniques possibles de mesure de la déformation dans les couches bitumineuses ainsi que de nombreux paramètres l'influençant. En fait, ce rapport présente l'état de la question. Il serait en effet très difficile de trouver une autre publication sur ce même sujet, aussi complète que celle-ci.

Les très courts délais à disposition pour la préparation et l'organisation de l'essai in situ, ont entraîné quelques déficiences qui se sont traduites par un certain nombre d'improvisations et un soin insuffisant dans le contrôle des paramètres. Cependant, l'énergie et la détermination dont ont fait preuve (bien que pressés par le temps) les participants dans leur travail de préparation, ont plus que compensé certaines imperfections. A cela est venu s'ajouter une participation active et dévouée lors de la phase d'analyse des données.

En ce qui concerne la coopération internationale, la phase de travail sur le terrain a fourni un excellent exemple de collaboration très ouverte entre les différentes équipes; si l'on considère l'expérience pratique, le bénéfice personnel a été substantiel pour chacun des participants. Au cours de l'analyse des données, des discussions techniques très fouillées sur les résultats ont été aussi ouvertes que possible, dans la mesure où le sujet concernait de la même façon tous les participants à un même essai.

Après le programme d'essai en commun de Nardo, les problèmes liés aux valeurs mesurées de la déformation dans les couches bitumineuses ne constitueront plus un obstacle à la coopération internationale dans le domaine des essais en vraie grandeur. Cependant, compte tenu des variations de différents paramètres, les résultats obtenus au cours de l'essai de Nardo ne permettent pas de vérifier les méthodologies de dimensionnement des chaussées.

VIII.2 RECOMMANDATIONS

VIII.2.1 Recommandations pour de futurs essais internationaux

Au cas où d'autres essais en commun de même nature seraient entrepris, une attention particulière devrait être apportée à l'élimination des facteurs qui ont entraîné des difficultés importantes lors des essais de Nardo. Ces difficultés peuvent se résumer en un mot: variabilité. Cette variabilité a concerné les paramètres suivants :

- Structure et qualité de la chaussée. Quiconque a la moindre expérience des essais sur chaussée sait combien il est difficile d'obtenir une structure "homogène". En effet, une variation de la capacité portante, du sol de fondation le long du tronçon est pratiquement inévitable. Comme cela ne sera sans doute jamais realisé avec succès, des efforts supplémentaires doivent être accomplis pour vérifier les caractéristiques réelles de la fondation

grâce a un réseau très dense de points de mesure. De plus, un soin particulier doit être apporté à la mise en oeuvre des couches de chaussée, a la fois en ce qui concerne la régularité (garantie d'une épaisseur de couche homogène) et le respect des spécifications imposées. De tels contrôles devraient comprendre egalement celui des materiaux à la centrale.

- Chargement. Alors que certaines variations de l'amplitude de la charge et de la vitesse des véhicules a peu d'influence sur les résultats, la distribution transversale des charges en a au contraire beaucoup. Lorsque l'on utilise des véhicules, la mesure de leur position transversale doit être effectuée à des intervalles fréquents. Des essais entrepris sur des simulateurs de trafic lourds tels que des manèges ou des installations linéaires permettent une plus grande précision et une plus grande régularité de la position de la charge et également un plus grand nombre de mesures pendant le même laps de temps.

- Température. Un contrôle absolu de la température n'est possible que dans une enceinte isolée avec des systèmes de chauffage et de refroidissement. Pour les essais entrepris à l'air libre, pour lesquels l'influence de la température est également un des buts de l'essai, des mesures doivent être prises pour s'assurer que la température est identique à un moment donné sur toute la longueur de la piste d'essai. Des matériaux de qualité homogène (qualité dont on a déjà mentionné la nécessité) permettent d'obtenir des conditions de conductibilité thermique identiques. L'ensemble du tronçon d'essai devrait être soumis aux mêmes conditions d'ensoleillement et d'exposition au vent. De plus, des enregistrements de la température avec un seul type d'appareil devraient être faits à différents endroits le long de la chaussée, proches de la position des autres instruments.

VIII.2.2 Recommandations pour les mesures de déformation dans les couches bitumineuses

Si l'on considère d'une part les conclusions du paragraphe VIII.1 concernant l'analyse des résultats et, d'autre part, les expériences concernant la stabilité mécanique des jauges après mise en place et dans le temps (voir chapitre III), les recommandations suivantes peuvent être faites :

- Jauges de déformation à placer avant ou pendant la construction du revêtement

Les jauges du type 1.1, utilisées par trois équipes avec des modifications mineures, sont constituées par un support de jauge de très faible rigidité entre deux barres d'ancrage et correspondent donc aux exigences de base du point de vue physique; elles sont recommandées en premier lieu. Ces jauges ont également un taux de perte très faible après la mise en oeuvre du revêtement et lors du contrôle de la résistance entrepris 9 mois après la pose.

Les jauges du type 2.3 ont également donné des résultats satisfaisants à d'autres points de vue et sont économiquement très intéressantes. Si elles ne sont mentionnées ici qu'en seconde place, c'est parce qu'elles ne reposent

que sur l'expérience d'un seul pays.

Les jauges du type 1.2 (utilisées par l'équipe no 2) donnent en principe des résultats satisfaisants. Cependant, le taux de perte à envisager est un désavantage important.

- Jauges de déformation à placer après la mise en oeuvre du revêtement

Les jauges de déformation qui peuvent être placées après la mise en oeuvre du revêtement présentent différents avantages: elles peuvent être installées dans des chaussées qui n'avaient pas été prévues comme tronçon d'essai, elles peuvent être utilisées pour remplacer une instrumentation déficiente et elles ne sont pas sujettes à d'éventuelles détériorations lors de la construction du revêtement.

Le type de jauge recommandé par le groupe n'a pas été testé à Nardo. En principe, la jauge idéale serait, dans ce cas, semblable au type 3.1 utilisé par l'équipe no 3 (jauge fixée à du matériau prélevé dans le revêtement).

Cependant, il convient d'apporter un soin particulier afin d'éviter un large espace entre la carotte et le trou foré, dans le but de réduire l'épaisseur de colle comme cela a été fait pour les jauges du type 2.1 de l'équipe no 8.

VIII.2.3 Recommandations pour des études complémentaires

L'utilisation de jauges de déformation conformes aux recommandations indiquées ci-dessus devrait permettre une comparabilité acceptable entre les résultats obtenus sur différents tronçons d'essai où ces jauges seront utilisées. Si l'on adopte d'autres types de jauges de déformation, en particulier celles qui au cours du programme d'essai en commun de l'OCDE à Nardo n'ont pas donné totalement satisfaction, des études complémentaires devraient entreprises sur une base nationale. Lors de ces essais, les diverses hypothèses qui ont été émises dans ce rapport pour expliquer les différences dans les résultats devraient être vérifiées. Cela s'applique en particulier à l'influence des différences de caractéristiques des matériaux entre le revêtement mis en oeuvre et les éprouvettes préparées en laboratoire, influence agissant sur le comportement à la déformation et sur la conductivité thermique.

Un effort devrait également être fait pour expliquer les domaines qui n'ont pas pu être éclaircis par le groupe.

Les organismes qui entreprendront ces séries d'essais dans le cadre décrit ci-dessus devraient s'assurer qu'ils transmettront leurs résultats à tous les autres organismes intéressés par l'intermédiaire du secrétariat de la direction de la recherche routière de l'OCDE à la DIRR. Cela est également valable pour une description complète des résultats de mesures complémentaires, soit la couche supérieure des jauges et également, exceptionnellement, à la surface de la chaussée. En procédant de cette manière, ces nouvelles recherches formeront réellement un complément à ce rapport et accroîteront les possibilités de coopération internationale dans ce domaine.

Annexe A

COMMENTAIRES INDIVIDUELS DES PARTICIPANTS

Equipe No 1..... 116
Equipe No 2..... 117
Equipe No 3..... 119
Equipe No 4..... 120
Equipe No 5..... 121
Equipe No 6..... 122
Equipe No 7..... 124
Equipe No 8..... 126
Equipe No 9..... 128

Autres commentaires de membres du groupe non participants

Mr Verstraeten, Belgique..... 130

Mr Kenis, Etats-Unis..... 131

ANNEXE A/1

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 1

L'équipe No 1 a utilisé trois types de jauges dans le but de les comparer. Les valeurs maximales moyennes mesurées pour ces trois types étaient comparables, mais considérablement plus basses que les résultats obtenus par les autres équipes (voir fig. VII.12).

Ces résultats s'expliquent si l'on considère que les températures mesurées par l'équipe No 1 étaient systématiquement inférieures à celles mesurées par les équipes No 3 et 9 (voir chap. V.5).

Tout en considérant que des essais de comparaison effectués sur les trois systèmes ont démontré une précision suffisante, on peut admettre que les températues plus basses observées sur le site de l'équipe No 1 (probablement à cause d'une exposition différente aux effets du vent) justifient les valeurs de déformation plus basses.

L'équipe No 1 considère que les essais communs en vraie grandeur de Nardo représentent un pas important dans le développement des connaissances dans le domaine de la recherche et désire remercier toutes les autres équipes pour l'excellent esprit de coopération.

ANNEXE A/2.1

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 2

Avant les tests de Nardo, les jauges en H (type 1.2) ont été installées et testées par le centre de recherches.

Le centre contrôle les performances de tronçons d'essais sur les autoroutes du pays. Au total, 242 jauges de ce type 1.2 ont été installées lorsque ces sections d'essais ont été construites entre 1980 et 1982. 52,5 % de ces jauges, soit (127) ont survécu à la construction. Aujourd'hui cependant, le nombre de ces instruments encore opérationnels s'est beaucoup réduit.

La durée de ces jauges dépend de différents facteurs :

a) déflexion de la surface sur laquelle la jauge est placée,
b) structure du mélange de l'enrobé bitumineux,
c) tendance du mélange à se déplacer pendant le compactage,
d) force de compactage utilisée,
e) épaisseur de la couche hydrocarbonée mise en place.

Il n'est pas possible de dire quelle est la contribution de chacun de ces facteurs sur la durée de vie de ces jauges, excepté pour :

i) il est peu vraisemblable qu'une jauge supporte un compactage avec vibration, indépendamment de l'augmentation de l'épaisseur,

ii) lorsque 18 jauges furent placées sur une route d'essai, la déflexion du sol de fondation étant de 2 mm, aucune jauge ne résista, et

iii) lorsque les jauges furent placées sous 30 mm seulement d'enrobé hydrocarboné, 2 seulement sur 20 survécurent à la construction.

Remarques sur les résultats de l'OCDE

La faible proportion de jauges de type 1.2 qui survécut nous a déçus, plus encore que les expériences acquises lors d'essais dans notre pays. Notre principale déduction a toujours été la suivante: alors que le type 1.1 est plus grossier, donc plus apte à supporter la construction, il ne peut pas enregistrer les déformations aussi précisément que le type 1.2, car il est trop rigide. Les résultats suggèrent que le type de jauges 1.1 donne des résultats satisfaisants et de ce fait nous allons considérer sérieusement l'adoption du type 1.1 de préférence au type 1.2 dans les expériences futures.

A ce stade, nous ne considérons pas qu'il soit justifié d'adopter le type 1.3 ou le type 2 dans notre pays.

En raison des nombreuses variables liées aux essais de Nardo, nous

allons proposer notre propre test pour notre centre. Nous voudrions proposer de comparer les performances des types de jauge 1.1 et 1.2 avec et sans la mince bande de protection en aluminium. Nous installerons aussi des thermocouples dans la route afin d'enregistrer la température à différentes profondeurs, et des indicateurs transversaux de localisation - que nous avons développés - et qui enregistrent très précieusement la position d'un véhicule roulant par rapport à une ligne de référence. Ceux-ci devront être placés plus près des jauges que ce ne fut le cas à Nardo.

Une autre installation d'instruments comprend des jauges de déflexion comme celles utilisées dans notre essai en vraie grandeur à chargement accéléré.

Nous voudrions aussi exécuter des mesures de déflexion sur les couches du sol de fondation pendant la construction, car nous croyons que la déflexion des couches dans lesquelles les jauges sont placées peut être un facteur affectant la survie d'une certaine proportion de ces jauges.

Les jauges que nous avons utilisées avaient 75 mm de largeur. Cela signifie qu'à Nardo les jauges et les câbles étaient vraiement près les uns des autres. Nous ne sommes pas sûrs que cela n'a pas conduit à des discontinuités dans la chaussée. Lors d'expériences antérieures en Australie où des jauges ont été placées sous une mince épaisseur de chaussée, on a observé un faïençage à la surface à l'emplacement des fils.

Les données produites par les jauges déjà installées dans les sections d'essais de notre pays seront aussi analysées et comparées avec toutes les nouvelles données.

Nous avons été vraiement très heureux de participer aux essais de Nardo et voulons exprimer notre reconnaissance et nos remerciements à tous ceux qui nont ont assités. Tous les résultats que nous obtiendrons dans le futur seront naturellement à disposition de tous les membres du groupe.

ANNEXE A/3

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 3

Au cours des essais de Nardo, l'équipe 3 a utilisé 2 types différents de jauges: type 1.1 et type 3.1.

Nous sommes surpris par l'ampleur de la dispersion dans l'influence de la température sur les jauges de type 1.1 d'une part et d'autre part, par la différence de l'influence de température sur les deux types de jauges utilisés. De notre point de vue, cette seconde différence dépend, dans une large mesure, de la technique utilisée pour fixer les carottes dans la chaussée. Nous réaliserons sous peu une série d'essais sur notre installation avec une autre série de carottes de dimensions identiques à celles du trou de carottage, afin de réduire l'épaisseur de la colle, de la même manière que l'équipe 8 utilisant des jauges de type 2.1.

ANNEXE A/4

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 4

L'essai en vraie grandeur a fourni un échange valable d'informations techniques sur l'instrumentation, les techniques d'essais et les systèmes d'acquisition des données pour enregistrer les déformations dans la chaussée sous les charges de roues en mouvement. Les bénéfices à long terme d'un tel projet international de recherche conduiront à une augmentation de la construction des installations d'essai sur le terrain, capables de mesurer les réactions d'une chaussée et, par conséquent, de développer des règles rationnelles de limitation du poids des véhicules, des modèles de dimensionnement des procédés d'évaluation.

Du fait des limitations de temps et de distance, l'instrumentation installée par l'équipe 4 se limitait à quatre ponts de mesures avec jauges encastrées. Deux de ces capteurs de déformation (auxquels il est fait référence dans ce rapport comme jauges de type 2.3) furent endommagés pendant la construction. A la température de référence de la chaussée de 24 °C, les deux capteurs de pression utilisables mesuraient une déformation en traction maximale qui se situait à moins de deux pourcent de la moyenne des déformations maximales mesurées par toutes les équipes participantes. De plus, les déformations enregistrées étaient très proches de celles calculées par les procédés analytiques. La proportion relativement élevée de perte de capteurs de pression pendant la construction n'est pas indicative du succès de nombreuses installations sur le terrain de tels capteurs. Avant l'essai de Nardo, près de 50 jauges de type 2.3 ont été installées dans de nombreuses installations sur le terrain. A peu près 80 % de ces capteurs de pression ont survécu avec charges imposées par le trafic pendant la construction et beaucoup fonctionnent encore après 12 ans de service. Les déformations dans les chaussées, enregistrées sous une grande variété de charges de trafic, ont été employées pour évaluer les effets de dommages possibles attribuables aux différentes charges du trafic sur les chaussées. Pendant l'été de 1984, 42 jauges de type 2.3 furent installées dans différentes structures de chaussées déjà en service. Trente neuf de ces installations (ou 93 %) ont été couronnées de succès.

ANNEXE A/5

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 5

Les résultats de l'équipe No 5 sont proches de la moyenne des mesures et des valeurs théoriques estimées. Cette première constatation permet d'utiliser les données des expériences menées à bien jusqu'à ce jour, sans douter de la validité des valeurs de déformations. A l'avenir, les mêmes types de jauges et les mêmes appareils d'enregistrement seront utilisés. A cours terme, nous envisagerons de :

- diminuer le nombre de mesures identiques (même jauge, même température) puisque la variation est faible,

- maintenir un nombre élevé de jauges puisque nous observons une dispersion, à savoir que certaines jauges donnent constamment des valeurs faibles et d'autres des valeurs constamment élevées,

- procéder avant l'essai à un nivellement et après l'essai à un carottage pour s'assurer de la position exacte de la jauge dans la chaussée

- mesurer simultanément la déformation et la température pour chaque jauge en introduisant une sonde de température PT100 directement dans le barreau d'ancrage en aluminium.

A plus long terme, on envisagera :

- d'étudier les systèmes de mesure instantanés de la déformation de surface (déflexion) en mettant l'accent sur les systèmes dits sans contact,

- d'informatiser l'acquisition de plusieurs paramètres (déformation, température, déflexion, etc).

A très long terme :

- envisager des systèmes sans contact qui localiseraient deux éléments indéformables (par exemple deux granulats) et qui analyseraient en continu leur position relative à l'intérieur de la chaussée.

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 6

L'équipe 6 a utilisé des jauges en forme de H avec un ruban en aluminium, comme l'équipe 2.

Contrairement à cette dernière, le ruban d'aluminium était de section supérieure [0.8 mm² contre 0.3 mm²].

En comparaison avec les autres systèmes employés à Nardo, les capteurs utilisés par l'équipe 6 ont montré :

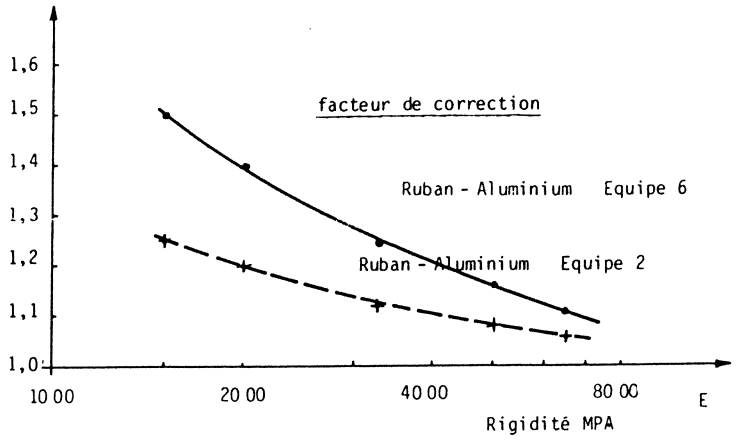
1. Ramené à une valeur equivalente de 24 °C une sensibilité moindre que les autres dispositifs [203 contre une moyenne de 273 avec un écart type de 67.8].

   On notera que cette dernière valeur est assez voisine de la valeur théorique de calcul [260].

2. La pente moyenne (a) en fonction de la température dans une expression $e = a \cdot \theta° + b$ voisine de 6.5 est plus faible également que la pente moyenne qui, pour le calcul, est voisine de 14.

   Cela paraît être l'indice d'une trop grande rigidité du système employé par rapport à la rigidité du milieu à analyser qui, dans l'essai présent a varié entre 1600 et 6500 MPa.

Une fonction de correction peut être trouvée (en utilisant notamment les principes exposés dans le paragraphe VII.4.1).



Malgré le grand intérêt que ce type de jauge présente du point de vue de sa solidité lors de la réalisation de la chaussée et sa tenue dans le temps contrôlé après 8 mois: facteurs non négligeables pour l'intérêt du capteur dans une chaussée, il semble souhaitable de procéder à des modifications portant : - soit sur la largeur du ruban [réduction dans un rapport de 2];

- soit en l'adoption d'un support plastique pour le ruban. De ce point de vue, le type de jauges utilisé par les équipes 3, 5, 7 apparaîtrait un compromis acceptable encore que ces jauges aient montré des différences sensibles dans les réponses de celles-ci vis-a-vis de la température.

Pour ce qui concerne les jauges de type II, selon l'équipe 6, la difficulté à réaliser à priori le même matériau que celui qui existerait dans la chaussée conduirait à ne pas les employer car dans le cas d'une inclusion dans un milieur, les erreurs dues à la rigidité peuvent être dans les deux sens (majoration si le milieu inclus est moins rigide que le milieu environnant) minoration dans le cas contraire. Si on veut pouvoir à terme utiliser des fonctions de corrections (qui apparaissent en toujours nécessaires), il semble que pouvoir fixer du moins un paramètre soit très utile.

ANNEXE A/7.1

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 7

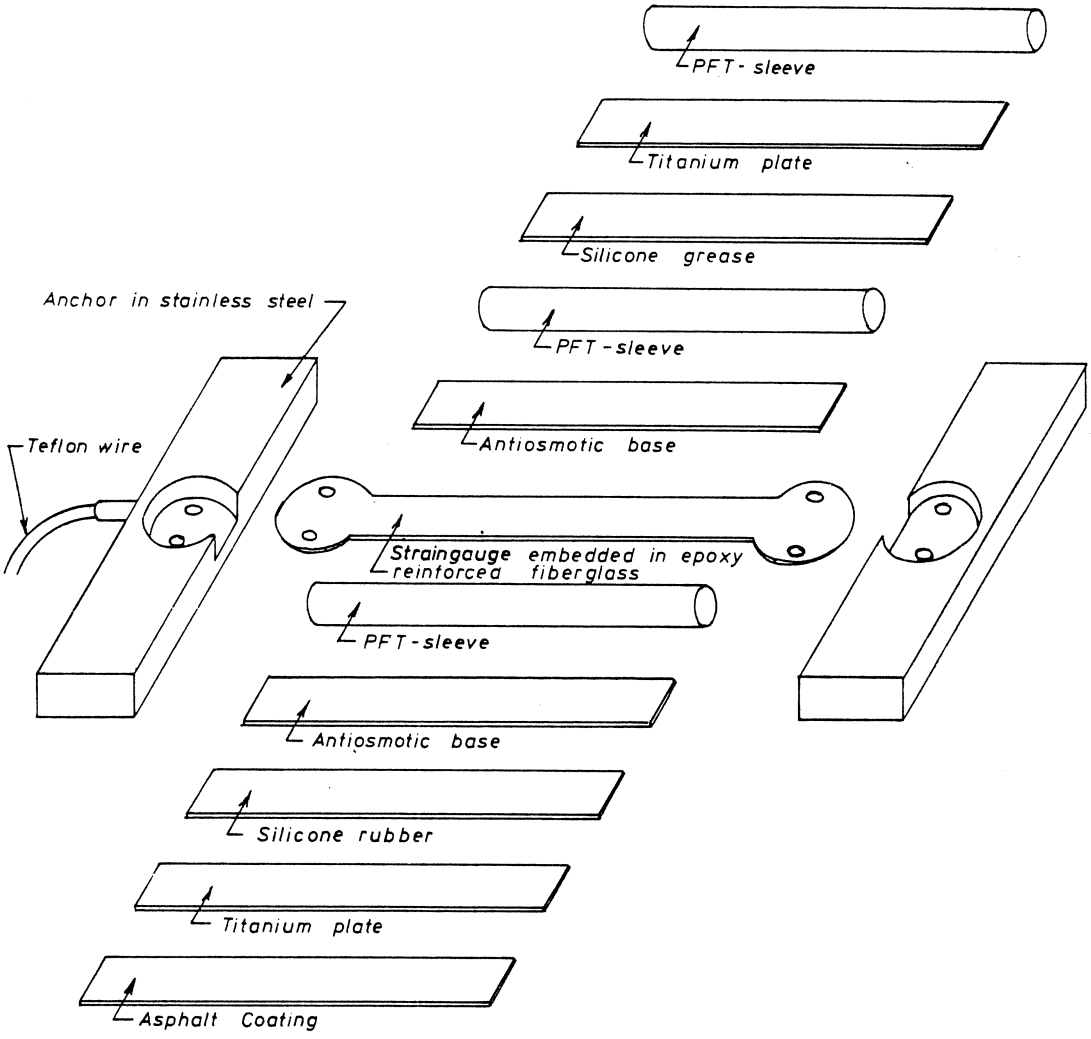
Après les essais de Nardo, une amélioration considérable des jauges utilisées par l'équipe 7 a été réalisée. Pendant les essais de Nardo, la perte des jauges a été très faible. Cela est dû aux températures assez basses des enrobés pendant le compactage, à l'utilisation des compacteurs à pneus sans vibration, et au nombre très limité de charges pendant les essais. Normalement plus de 25 % des jauges sont perdues pendant l'installation et la plupart de celles qui restent ont une durée de vie de moins de 10^4 cycles. Aux températures au-dessous de zéro, la durée de vie est encore plus faible, car les jauges deviennent fragiles.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer la durée de vie assez faible des jauges. Tout d'abord, les jauges Kyowa, selon le fabricant, ne sont pas destinées à des températures au-dessus de 60°-80 °C. A des températures beaucoup plus élevées, lors de la mise en place et du compactage des enrobés, le matériau de base (acryl) des jauges se cristallise, brisant la cohésion entre la jauge et la base. Aussi, des petites bulles d'air peuvent se dilater dans la base de la jauge, ouvrant ainsi celle-ci aux infiltrations d'eau.

Habituellement, les jauges de l'équipe 7 sont utilisées pour suivre les réactions primaires (réponse) des chaussées pendant des essais de comportement à long terme, c'est-à-dire 10^5-10^6 charges lourdes et avec des conditions climatiques différentes. Dans ce but, une jauge beaucoup plus durable a été développée. La figure en donne les composantes les plus importantes. La jauge finie contient 27 couches.

Les nouvelles jauges ont été testées lors d'une épreuve assez sévère en laboratoire. Installées dans une plaque d'enrobé, elles étaient exposées à des déformations de 300-1000 μstrains, avec une valeur moyenne de 600 μstrains. A chaque 10^5 nombres de cycles, l'échantillon était gelé à - 20 °C et, pendant le dégel, saturé d'eau. Après plus de 10^6 charges, on n'a constaté aucun signe de dégradation des jauges.

ANNEXE A/7.2


PFT - sleeve
Titanium plate
Silicone grease
Anchor in stainless steel
PFT - sleeve
Teflon wire
Antiosmotic base
Straingauge embedded in epoxy reinforced fiberglass
PFT - sleeve
Antiosmotic base
Silicone rubber
Titanium plate
Asphalt Coating

ANNEXE A/8.1

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 8

Les jauges peuvent être divisées en deux catégories, celles sans aucun support (équipes 8 et 9) et celles avec supports (ancrages en H, métal, plastique ou carottes avec une épaisse couche de colle). Les installations techniques du premier type diffèrent de toutes les autres, cependant les valeurs corrigées et l'influence de la température est la même. Aux basses températures les mesures des déformations sont les mêmes, par exemple, que celles de l'équipe 7. Celà conduit tout naturellement à la conclusion qu'un matériau support renforce la jauge et la rigidifie et ainsi ces jauges donnent des valeurs inférieures si le module d'élasticité du béton bitumineux est bas (haute température et trafic lent). Lors des essais de Nardo, les températures ont atteint 32 °C, la vitesse était anormalement basses (30 km/h) et le bitume était très susceptible à la température, ce qui accroît l'influence des hautes températures.

Notre procédure standard de mise en place des jauges consiste à carotter une éprouvette dans la chaussée dans laquelle on veut mesurer les déformations ou de confectionner en laboratoire une éprouvette identique au revêtement. Lors de l'essai de Nardo la première façon de procéder n'était pas possible et les informations manquaient pour la seconde. Notre éprouvette était plus compacte que la couche de surface de Nardo qui avait été mal compactée à une basse température. L'influence de la différence des masses volumiques sur les résultats est difficile à estimer.

Les résultats ont été comparés aux calculs théoriques effectués avec des programmes multicouches. Aucune mesure directe des modules d'élasticité n'a été effectuée sur l'infrastructure, la fondation ou la couche de support, mais les valeurs sont basées sur des mesures indirectes effectuées à des températures relativement basses à l'aide d'un déflectomètre à boulet. Les modules de rigidité des couches hydrocarbonées ont été déterminés en laboratoire. Aux températures élevées, les valeurs mesurées par nous et par l'équipe no 9 étaient plus grandes que celles calculées. A ces températures le bitume a un comportement plus viscoélastique qu'élastique. Bien que les méthodes de calcul soient généralement admisent et largement utilisées pour le dimensionnement des chaussées, il n'y a pas de véritables preuves de leur validité particulièrement dans le domaine viscoélastique (températures élevées et/ou vitesses basses). Quoi qu'il en soit, les modèles viscoélastiques donnent des valeurs plus élevées que les modèles élastiques pour un module de rigidité donné.

On peut penser également que les charges dynamiques à des fréquences basses entraînent des déformations plus grandes que des charges statiques et que la fréqence correspondante utilisée pour déterminer un module de rigidité adéquat à partir d'essais en laboratoire est trop élevée. Une analyse plus détaillée est nécessaire et sera entreprise

pour apprécier les calculs théoriques.

A Nardo, l'intensité du compactage à été faible (pas de vibration) afin de ne pas endomager les jauges. Le taux de perte a été en effet plus faible que d'habitude. La résistance des jauges a été mesurée en janvier 1985. Selon ces mesures, une seule de nos 12 jauges fonctionnait. Nous avions sectionné nos câbles très court et selon le rapport seul dix de nos douze câbles ont été retrouvés. On peut penser qu'à la suite de ce genre de difficultés les autres mesures n'ont pas pu être effectuées correctement. Nous avions installé 12 jauges dans notre propre tronçon d'essai au cours de l'automne dernier avec de mauvaises conditions atmosphériques. Sept fonctionnaient encore en mars et notre hiver est beaucoup plus rude qu'en Italie. Nous n'avons pas réellement d'expérience dans les caractéristiques à long terme et le comportement à la fatigue de nos jauges, mais celles-ci pouvant être mises en place après la pose du revêtement de nouvelles jauges peuvent être mise en place si certaines sont défectueuses. La rupture d'une jauge peut être décelée facilement, le signal chutant à un niveau plus bas. La position d'une jauge de déformation est connue avec précision et il n'y a pas de problème provenant du déplacement de la jauge en cours de construction.

L'essai de Nardo s'est avéré très utile et nous encourage à utiliser cette méthode, bien que la fabrication des jauges requièrent un soin méticuleux (la tolérence est de 0.5 mm). Il est très vraisemblable que nous utiliserons le système de l'équipe No 9 au cours de l'été 1985 mais avec des jauges plus longues et des éprouvettes de béton bitumuneux plus grandes ainsi que des jauges type H à titre de comparaison.

Nous avons été très heureux de participer à l'essai de Nardo. L'organisation et la coopération entre les équipes furent excellentes. L'exploitation des données a été difficile et a apporté de nouvelles idées et de nouveaux aspects. Nous espérons que le succès des essais de Nardo stimulera la coopération internationale.

ANNEXE A/9.1

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES DE L'EQUIPE No 9

L'équipe 9 exprime d'abord l'honneur qu'elle ressent d'avoir été reçue dans cette atmosphère cordiale et franche à Nardo où a été entreprise la campagne de mesure coordonnée à l'échelle internationale. L'équipe en éprouve de la fierté, mais aussi du bonheur. Il y avait beaucoup à apprendre, entre autres concernant:

- la réalisation de mesures de déformations après l'achèvement d'un revêtement,

- la nécessité absolue de mesurer la déformation et la température au même point et en même temps,

- la nécessité d'appliquer plusieurs méthodes pour évaluer les modules des couches d'une manière non destructive, en mesurant à la surface de la superstructure routière,

- et le dernier non le moindre point, la nécessité absolue d'une coopération internationale pour le succès des travaux de recherche.

Cependant, il faut faire quelques remarques supplémentaires. Le succès des mesures des déformations de Nardo se base essentiellement sur la comparaison des déformations calculées. Les valeurs calculées sont déduites des mesures de la déflexion sous le poids du "déflectographe à boulet" (Falling Weight Deflectometer - FWD). Les modules des couches d'un système multicouche, dont l'élasticité est linéaire, sont variés jusqu'à ce que la déflexion calculée et la déflexion réelle soient presque égales. Dès que le système dispose de ces modules (comme décrit ci-dessus), ils sont utilisés pour calculer les déformations à la face inférieure de la couche hydrocarbonée. Les déformations sont dues à la roue arrière du véhicule de charge passant à une vitesse de 30 km/h. Le module E1 de la couche bitumineuse qui est valable pour une durée de charge du FWD de 25 ms doit être converti en un module valable pour la charge du camion d'essai pendant 115 ms - et cela en réduisant le module FWD de 25 %. Afin de vérifier cette procédure, l'équipe 9 a effectué sur des échantillons prélevés à Nardo des essais de compression en laboratoire. Une charge sinusoïdale continue d'un côté et des impulsions sinusoïdales individuelles de l'autre ont été appliquées sur les éprouvettes.

Les résultats ont montré qu'un module Eeff (valable pour des impulsions individuelles) déduit d'une impulsion du FWD (25ms) est égal à un module |E| de charge sinusoïdale continue à la fréquence de 8 Hz, alors qu'une impulsion d'une durée de 115 ms, qui est comparable à la charge d'une roue arrière d'un poids lourd, fournit un module Eeff égal au module |E| mesuré à la fréquence de 3 Hz. Cela réduit E1 d'environ 0.67 lorsque les valeurs calculées E1 du FWD sont appliquées au calcul des déformations produites par le camion. Il est aussi possible qu'il

existe ou non un frottement entre les deux couches supérieures du système multicouche mentionné ci-dessus.

En ce qui concerne les valeurs des déformations mesurées par l'équipe 9, il importe de souligner qu'à une température de 16 °C, elles correspondent mieux à celles calculées qu'aux valeurs de la fig. VIII.1 qui, elles, correspondent à une température de 24 °C. Plus la température est élevée, moins la corrélation des valeurs sera bonne. Cela est dû à un effet de la température. Pourtant, les causes de cet effet ne sont pas encore connues. La corrélation est encore plus étroite si l'on choisit les moyennes des valeurs de déformations de l'équipe 9 et non les moyennes des maxima comme c'était le cas lors de la procédure d'évaluation. A cause des jauges courtes de l'équipe 9 (20 mm) et des dimensions réduites des jauges type 2.2, les déformations au sein de la couche d'enrobé hydrocarboné sont mesurées à des points presque ponctuels sans aucun effet d'intégration spatiale. Un tel effet existe pour les jauges en H et pour les longues jauges collées sur des carottes d'un diamètre de 100 mm. La méthode de l'équipe 9 représente cependant le désavantage d'un grand écart-type des valeurs de déformation qui est beaucoup plus grand que celui des autres méthodes. L'avantage d'une jauge courte réside dans la diminution du pourcentage de pertes. A Nardo, cela n'a joué aucun rôle au vu des températures de l'enrobé relativement basses et de l'interdiction d'utiliser la vibration pendant le compactage. Ce raisonnement est appuyé par le fait que l'on n'a observé que de faibles variations des valeurs de déformations lors des passages des trois camions, mais des écarts sensiblement plus grands ont été indiqués par les jauges. C'est là peut-être une conséquence du manque d'homogénéité de la chaussée.

ANNEXE A/10

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES INDIVIDUELS DE M. J. VERSTRAETEN, BELGIQUE
(Membre du groupe, mais non participant à l'essai de NARDO)

Malgré la dispersion observée dans les résultats des mesures d'allongements, dispersion atribuable pour une part non négligeable à la variabilité des matériaux mis en oeuvre et aux variations non uniformes de la température dans les couches bitumineuses, il est assez remarquable de constater que les résultats expérimentaux recoupent, en moyenne, les résultats prévus à partir de l'utilisation de modèles basés sur la théorie des systèmes multicouches élastiques. A ce point de vue, l'expérience de Nardo apporte une contribution à la résolution de l'important problème de la vérification expérimentale de la validité des modèles théoriques.

Une autre contribution non négligeable concerne la détermination expérimentale des modules des matériaux bitumineux. On constate, en effet, qu'il existe une excellent accord entre les résultats obtenus par des laboratoires ayant utilisé des méthodes expérimentales différentes. Il faut y voir le signe que la grandeur "module " a véritablement une signification physique et qu'à ce titre, elle peut être digne de confiance.

Il faut aussi souligner l'excellent esprit de collaboration qui a régné entre les équipes des pays participants et le grand enthousiasme dont elles ont fait preuve. De telles conditions de travail ne peuvent pas être sans effet sur les progrès futurs qui seront réalisés dans la mesure des allongements, si nécessaire à la vérification expérimentale des modèles théoriques.

Il est à espérer que de telles expériences en collaboration seront encore faites. Intégrées dans les programmes nationaux, elles seraient susceptibles d'alléger les budgets et de favoriser l'obtention de résultats suffisamment généraux pour conduire à une utilisation plus efficace des résultats de recherches dans la résolution des problèmes rencontrés en pratique.

ANNEXE A/11.1

OCDE RTR I2 ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR DE SUPERSTRUCTURES ROUTIERES
Rapport : Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées

COMMENTAIRES INDIVIDUELS DE M. W. KENIS, FHWA, ETATS-UNIS
(La FHWA qui a financé les essais n'y a pas participé)

Le rapport conclu que "...un grand nombre de jauges ont conduit au même résultat ... et ...la bonne corrélation observée entre les valeurs mesurées et les résultats des calculs à l'aide d'approches théoriques accroît également le niveau de confiance dans les résultats de l'essai..."
Bien que cette affirmation soit vraie, le point crucial dans le dimensionnement des chaussées est la possibilité de donner des estimations fiables des dommages de la chaussée, c'est à dire la fissuration et l'ornièrage. Il faut donc répondre à deux questions:

1. Les déformations moyennes calculées (ou les déflexions) au cours de la période d'analyse ont-elles un ordre de grandeur qui permet de les utiliser pour un calcul réaliste des dégradations de la chaussée (fissuration et orniérage) ?

2. Une déformation calculée donnée en un point au cours de la période d'analyse est-elle suffisamment précise pour que les estimations de la fissuration et de l'orniérage soient également raisonnablement précises ?

Il faut noter que dans aucune de ces questions il n'a été mentionné que les déformations mesurées doivent être égales aux déformations calculées. Cependant il est évident que la connaissance des niveaux de déformation, mesuré ou calculé, est nécessaire pour améliorer les modèles théoriques multicouches et donc de développer des modèles correctes de prévision des dégradations. La première question implique donc un compromis raisonnable entre la déformation calculée et mesurée et la prédiction des dégradations. Donc, si des prédictions excellentes des dégradations de la chaussée (fissuration et orniérage) sont obtenues à partir d'une déformation (déflexion) calculée et si les valeurs de la déflexion calculée ne sont pas exactement celles mesurées, celà constituerait-il malgré tout un outil suffisant pour le dimensionnement des chaussées ? Les résultats de l'étude du groupe I2 montrent en fait que les ordres de grandeur de la déformation mesurée sont en accord avec celle estimée par la théorie des multicouches et celà devrait permettre d'établir que cette théorie est suffisante pour être utilisée dans le dimensionnement des chaussées et donc dans des fonctions de dégradations pour la fissuration et l'orniérage. L'étude n'a pas montré que les niveaux de déformation calculés étaient suffisant pour une évaluation précise de la fissuration et de l'orniérage, cependant d'autres auteurs ont démontré que c'est bien le cas.

En ce qui concerne la seconde question, il n'y a pas été répondu de façon précise. Pour illustrer ce point, considérons la figure ci-dessous qui représente la déformation à la base d'une couche de béton bitumineux de 20 cm d'épaisseur reposant sur une couche de support de

40 cm d'épaisseur et dont le module est de 276 MN.m^{-2} et une infrastructure dont le module est de 34.5 MN.m^{-2}. La déformation, calculée à l'aide de la théorie des multicouches, est reportée pour 5 valeurs du module du béton bitumineux variant de 138 à 13'800 MN.m^{-2} (domaine caractéristique du module du béton bitumineux au cours d'une année). Si l'on tient compte des informations fournies par l'étude du groupe I2, on peut estimer que la déformation calculée (ϵc) peut être inférieure de 33 % à la déformation mesurée (ϵm). Ces points sont indiqués sur la figure. L'augmentation du module est nettement plus grande: de 81 à 136 %. Si l'on se réfère à l'équation de la fatigue

$$Nf = K1\ (1/\epsilon)^{K2}$$

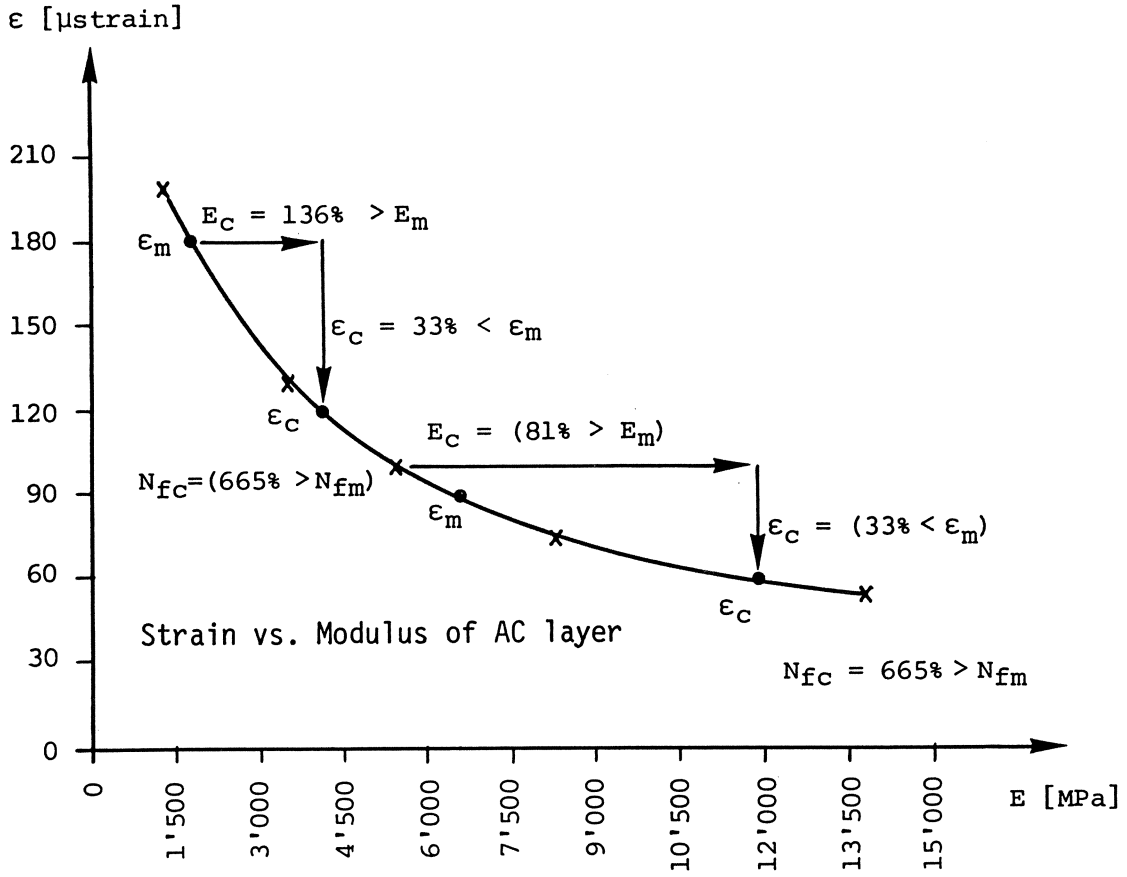
et si l'on calcule le changement en % de la durée de vie en fatigue pour

$$K2 = 5.0$$

on constate que cette durée de vie est plus grande de 665 % que celle qui aurait été calculée en utilisant la déformation mesurée. Une réduction de 33 % de la déformation entraine donc une augmentation du module (qui dépend du niveau de déformation) et une très grande augmentation de la durée de vie en fatigue.

Le but de cette analyse n'est que de mettre en évidence l'importance de la variation de la déformation pour l'évaluation des dégradations et qu'il devrait en être tenu compte lors de travaux de recherche futurs.

Déformation d'un béton bitumineux en fonction de son module



Annexe B

RESULTATS BRUTS DU PROGRAMME D'ESSAIS

Annexe B/1: Vitesses des camions..... 134
Annexes B/2 + B/3: Températures..... 135
Annexes B/4 à B/18:Déformations mesurées..... 137

ANNEXE B/1

Truck speed (km/h), vitesse des camions (km/h)

No. passage	Truck / Camion A	B	C
9. 4. 1984			
0	33.4	33.4	36.0
1	30.5	31.5	29.4
2	30.7	34.7	30.2
3	30.5	30.1	32.2
4	29.7	32.8	31.7
5	31.2	32.8	30.7
6	31.2	33.4	31.7
7	30.2	31.2	29.5
8	36.0	31.2	30.7
9	31.6	32.9	29.3
10	31.2	30.7	29.3
11	31.7	31.2	29.3
12	31.2	30.2	30.2
13	32.8	31.7	30.6
14	30.2	32.3	32.3
15	31.7	32.3	31.2
16	32.2	31.2	31.7
17	33.4	30.7	33.5
18	32.3	30.2	31.2
19	32.3	32.5	30.2
20	34.7	32.3	31.2
21	31.2	30.6	29.3
22	32.8	32.3	32.8
23	-	-	-
24	-	-	-
10. 4. 1984			
25	27.5	26.0	31.2
26	30.2	31.2	33.4
27	29.2	31.2	32.2
28	27.7	30.6	31.5
29	30.7	31.2	31.2
30	28.9	30.2	31.7
31	28.9	30.6	29.1
32	29.6	29.7	31.7
33	31.3	33.4	32.3
34	34.7	31.7	33.4
35	30.2	30.7	31.2
36	29.2	33.4	33.4
37	30.7	X	29.2
38	33.4	X	29.3
39	X	X	29.3
40	31.7	X	31.2
41	31.2	X	29.3
42	33.4	32.3	31.2
43	33.4	31.7	30.2
44	31.7	31.7	31.2
45	31.2	31.7	32.2

No. passage	Truck / Camion A	B	C
46	30.2	32.3	31.2
47	29.7	29.7	31.2
48	31.2	33.4	29.3
49	-	-	-
50	30.7	31.2	29.3
51	-	-	-
52	33.4	31.7	28.4
53	30.7	33.4	27.5
54	32.3	30.7	31.2
55	31.2	31.7	28.4
56	30.7	31.7	28.8
57	31.2	31.7	31.2
58	29.3	31.2	30.7
59	31.2	31.2	33.4
11. 4. 1984			
60	31.2	34.7	31.2
61	32.2	33.4	31.2
62	30.2	34.7	29.3
63	31.2	31.2	32.3
64	31.2	33.4	30.2
65	33.4	33.4	32.3
66	-	-	-
67	30.2	33.4	30.2
68	-	33.4	31.2
69	-	33.4	30.2
70	-	32.3	30.0
71	-	33.4	29.3
72	-	33.4	26.0
73	31.2	34.6	32.3
74	32.3	36.0	27.5
75	31.2	39.0	32.3
76	33.4	34.5	24.6
77	-	31.2	29.3
78	32.2	33.4	31.2
79	33.4	33.4	25.3
80	-	32.3	30.7
81	32.8	33.4	29.3
82	33.4	33.4	30.2
83	33.4	33.4	33.4
84	33.4	32.3	32.3
85	33.4	32.3	29.3
86	34.7	32.3	30.2
87	31.2	33.4	30.2
88	34.7	32.3	31.2
89	36.0	34.7	26.7
90	-	-	-
91	-	-	-

Températures

Nº de/of passage	Heure Time	AIR [°C]			- 50 mm [°C]			- 130 mm [°C]			Analysis value
		team 1	team 9	team 3	team 1	team 9	team 3	team 1	team 9	team 3	
	9. 4. 1984										
1	11.17		21.9	20.2	21.0	23.1	28.4	16.5	18.4	20.6	23.2
2	11.28		21.1	20.2	21.0	23.7	29.4	16.5	18.7	21.3	24.0
3	11.34		21.5	20.1	21.3	24.2	29.6	16.8	19.0	2.15	24.2
4	11.47		21.5	20.1	21.6	24.7	30.0	17.0	19.3	21.8	24.5
5	11.57		21.7	21.8	21.7	25.2	30.3	17.2	19.7	22.0	24.8
6	12.06		21.7	22.1	22.2	25.7	31.0	17.4	19.9	22.4	25.3
7	14.28		21.2	21.6	25.1	30.1	35.6	19.9	24.0	27.2	30.0
8	14.39		20.6	21.2	25.2	30.2	35.6	20.1	24.2	27.4	30.1
9	14.48		20.7	21.0	25.2	30.3	35.8	20.2	24.4	27.6	30.3
10	14.58		20.3	21.2	25.3	30.4	36.0	20.3	24.6	27.8	30.5
11	15.08		20.5	20.9	25.5	30.6	36.2	20.4	24.8	28.2	30.9
12	15.50		19.8	21.3	25.6	30.6	35.8	20.8	25.4	28.9	31.2
13	15.59		19.7	21.1	25.8	30.5	35.8	21.0	25.6	29.1	31.3
14	16.08		19.4	20.8	25.7	30.4	35.4	21.0	25.7	29.2	31.3
15	16.17		19.4	20.4	25.6	30.2	35.2	21.1	25.7	29.4	31.3
16	16.27	19.9	19.2	19.6	25.6	30.0	34.8	21.1	25.8	29.2	31.1
17	16.35	19.7	18.5	19.3	25.5	29.8	34.4	21.2	25.9	29.3	31.0
18	16.45	19.4	18.0	19.2	25.3	29.4	34.0	21.2	25.9	29.4	30.9
19	17.14	18.6	17.3	18.3	24.7	28.3	32.1	21.2	25.9	29.6	30.4
20	17.23	18.3	17.1	17.9	24.6	27.9	31.7	21.2	25.8	29.4	30.2
21	17.32	18.2	16.8	17.6	24.3	27.6	31.2	21.1	25.8	29.2	29.9
22	17.41	17.9	16.7	17.2	24.0	27.2	30.7	21.1	25.7	29.1	29.6
23	17.50	17.7	16.4	17.0	23.8	26.8	30.2	21.0	25.6	29.2	29.5
24	17.59	17.5	16.2	16.7	23.6	26.5	29.8	20.9	25.5	29.2	29.4
	10. 4. 1984										
25	9.51	18.0	18.4	19.0	16.2	18.0	22.0	14.1	15.9	17.8	19.2
26	10.01	18.2	19.1	19.5	16.8	18.6	22.7	14.2	16.1	18.1	19.6
27	10.10	18.5	19.3	19.7	17.2	19.2	23.7	14.3	16.4	18.3	20.1
28	10.21	18.8	19.3	19.9	17.6	19.9	24.2	14.5	16.6	18.5	20.4
29	10.30	18.7	19.2	20.2	18.0	20.5	25.4	14.7	16.9	18.9	21.1
30	10.40	19.5	20.0	20.6	18.3	21.1	26.0	14.9	17.2	19.2	21.5
31	10.50	19.6	20.1	20.5	18.4	21.7	26.9	15.1	17.5	19.4	21.9
32	11.28	19.4	20.3	21.3	20.1	24.2	30.0	16.8	18.6	21.1	24.1
33	11.36	18.6	20.7	19.0	20.5	24.6	30.8	16.0	18.9	21.6	24.7
34	11.46	19.3	19.8	18.2	20.9	24.8	31.1	16.2	19.3	22.1	25.1
35	13.32	18.3	18.2	18.0	23.2	26.7	31.3	18.3	22.2	25.3	27.3
36	13.42	18.2	17.4	18.0	23.1	26.3	30.8	18.5	22.4	25.6	27.3
37	14.31	18.3	17.9	18.1	22.6	25.0	29.0	18.9	22.5	25.7	26.8
38	14.40	18.2	17.3	18.0	22.6	24.9	28.8	18.9	22.5	25.7	26.7
39	14.50	18.7	18.0	18.2	22.5	24.8	28.5	18.9	22.5	25.8	26.7
40	14.58	18.6	17.5	18.0	22.5	24.8	28.6	19.0	22.5	26.0	26.9
41	15.07	18.0	17.6	17.9	22.4	24.7	28.7	19.0	22.5	25.9	26.8
42	15.48	18.0	18.1	18.1	22.5	25.0	28.9	19.1	22.6	26.0	27.0
43	15.58	18.3	17.7	18.1	22.5	24.9	28.7	19.1	22.6	26.1	27.0
44	16.07	18.6	17.7	18.1	22.5	24.7	28.4	19.1	22.7	26.0	26.8
45	16.16	19.0	18.1	18.6	22.5	24.8	28.5	19.1	22.7	26.1	26.9

ANNEXE B/3

Températures

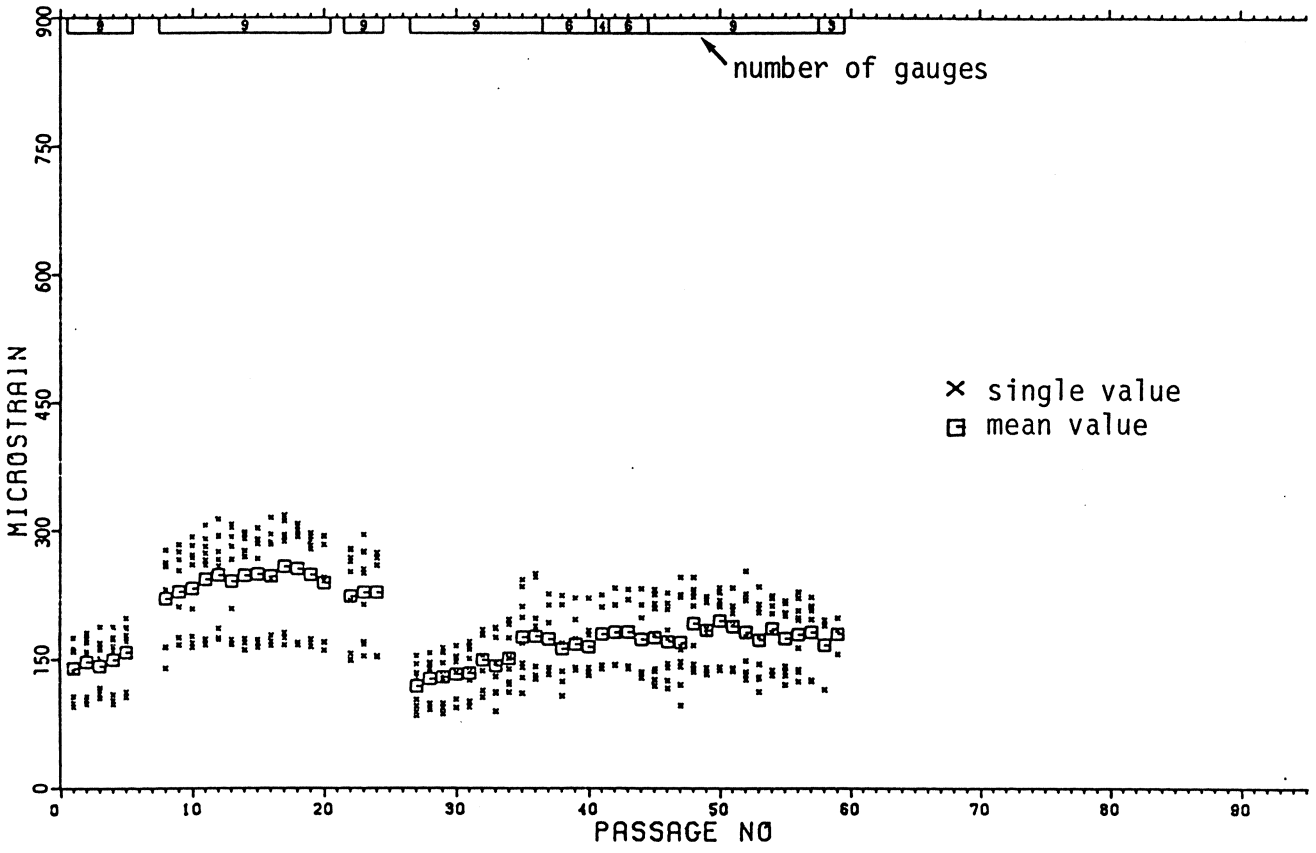
Nº de/of passage	Heure Time	AIR [°C]			- 50 mm [°C]			- 130 mm [°C]			Analysis value
		team 1	team 9	team 3	team 1	team 9	team 3	team 1	team 9	team 3	
46	16.26	18.9	18.3	18.7	22.5	24.8	28.7	19.2	22.7	26.2	27.0
47	16.36	19.0	18.0	18.6	22.5	24.9	28.8	19.2	22.7	26.1	27.0
48	16.59	18.1	17.9	18.0	22.6	25.0	28.6	19.3	22.7	26.1	26.9
49	17.08	17.9	17.2	17.3	22.6	24.9	28.8	19.3	22.9	26.2	27.1
50	17.17	17.9	17.2	17.3	22.6	24.8	28.4	19.3	22.9	26.2	26.9
51	17.26	18.0	17.1	17.3	22.6	24.6	28.1	19.3	22.9	26.2	26.8
52	17.35	17.8	17.0	17.3	22.5	24.4	27.8	19.3	22.9	26.2	26.7
53	17.44	17.1	16.7	16.8	22.5	24.2	27.7	19.4	22.9	26.3	26.8
54	17.52	17.2	16.6	16.3	22.4	23.9	27.4	19.3	22.9	26.3	26.7
55	18.03	17.1	16.7	16.2	22.3	23.7	26.9	19.4	22.8	26.2	26.4
56	18.12	16.8	16.5	15.8	22.2	23.5	26.7	19.4	22.8	26.3	26.4
57	18.20	16.2	15.7	15.3	22.0	22.9	26.1	19.4	22.7	26.2	26.2
58	18.38	15.1	14.7	14.4	21.7	22.6	25.1	19.3	22.6	26.0	25.7
59	18.48	14.5	14.1	13.8	21.7	22.2	24.4	19.3	22.6	25.5	25.1
	11. 4. 1984										
60	9.30	16.7	15.3	15.9	17.0	15.9	17.9	15.3	16.2	17.7	17.8
61	9.41	17.4	16.7	16.6	17.1	16.4	18.8	15.3	16.3	17.8	18.1
62	9.50	17.4	16.8	16.8	17.3	16.9	19.5	15.4	16.4	17.9	18.4
63	10.00	17.4	16.4	16.7	17.5	17.4	20.0	15.4	16.5	18.1	18.7
64	10.09	17.1	16.0	16.2	17.7	17.9	20.2	15.5	16.6	18.2	18.9
65	10.19	16.6	15.5	15.9	17.9	18.3	20.5	15.6	16.8	18.4	19.1
66	10.28	16.6	15.4	15.9	18.1	18.4	20.4	15.7	16.9	18.7	19.3
67	10.38	16.7	15.4	16.2	18.3	18.6	21.0	15.7	17.1	19.9	20.3
68	11.17	17.6	16.6	16.7	18.8	18.7	22.2	16.1	17.2	19.6	20.5
69	11.27	17.6	16.7	16.7	18.9	19.6	22.3	16.2	17.7	19.7	20.6
70	11.35	17.5	16.5	16.6	19.0	19.9	22.7	16.2	17.8	19.9	20.8
71	11.44	17.2	16.1	16.5	19.2	20.2	23.2	16.3	17.9	19.9	21.0
72	11.54	17.1	15.9	16.4	19.3	20.4	23.2	16.4	18.1	20.0	21.1
73	12.03	16.9	15.8	16.4	19.4	20.5	23.0	16.5	18.2	20.1	21.1
74	14.26	18.7	17.2	18.1	20.5	23.2	26.1	17.4	19.7	21.6	23.1
75	14.36	18.9	17.4	17.6	20.8	23.3	26.6	17.4	19.8	21.8	23.4
76	14.45	17.7	16.4	16.9	21.1	23.5	26.8	17.6	19.9	21.9	23.5
77	14.54	17.4	16.4	16.8	21.3	23.5	26.6	17.6	20.1	22.2	23.7
78	15.03	16.7	15.6	16.7	21.4	23.4	26.4	17.7	20.3	22.4	23.7
79	15.12	17.5	16.0	16.5	21.4	23.2	26.4	17.8	20.4	22.6	23.9
80	15.45	18.0	16.2	16.9	21.4	23.0	26.0	18.1	20.7	22.7	23.8
81	15.52	18.3	16.6	17.1	21.4	23.1	26.1	18.2	20.8	22.9	24.0
82	16.02	18.3	16.7	17.4	21.5	23.4	26.0	18.3	20.8	23.0	24.0
83	16.10	17.8	16.4	16.8	21.6	23.6	26.5	18.3	20.9	23.2	24.3
84	16.19	17.2	16.1	16.8	21.6	23.6	26.5	18.4	20.9	23.3	24.4
85	16.23	17.5	16.0	16.8	21.6	23.5	26.1	18.4	21.0	23.5	24.4
86	16.56	17.6	16.0	16.4	21.8	23.4	25.3	18.6	21.2	23.4	24.0
87	17.03	16.7	15.3	16.0	21.8	23.3	24.9	18.7	21.3	23.3	23.8
88	17.14	16.4	15.0	15.4	21.8	23.0	24.7	18.7	21.3	23.3	23.8
89	17.23	16.3	14.7	15.2	21.7	22.6	24.5	18.8	21.3	23.5	23.8
90	17.32		14.6	15.0		22.3	24.5		21.4	23.5	23.8

ANNEXE B/4

Team no. 1: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

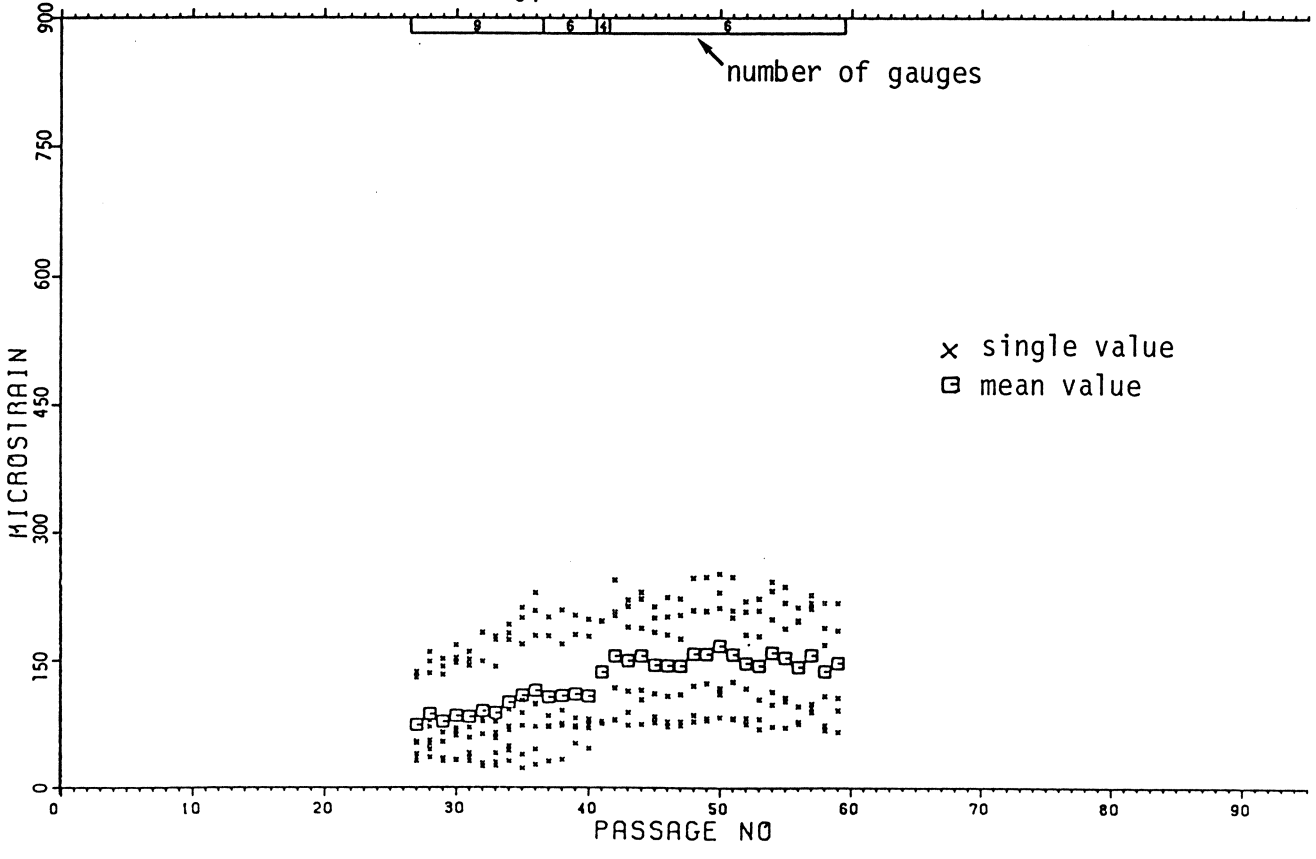
GAUGE GROUP 101-111-121-131

Type 1.3



GAUGE GROUP 102-112-122-132

Type 2.1

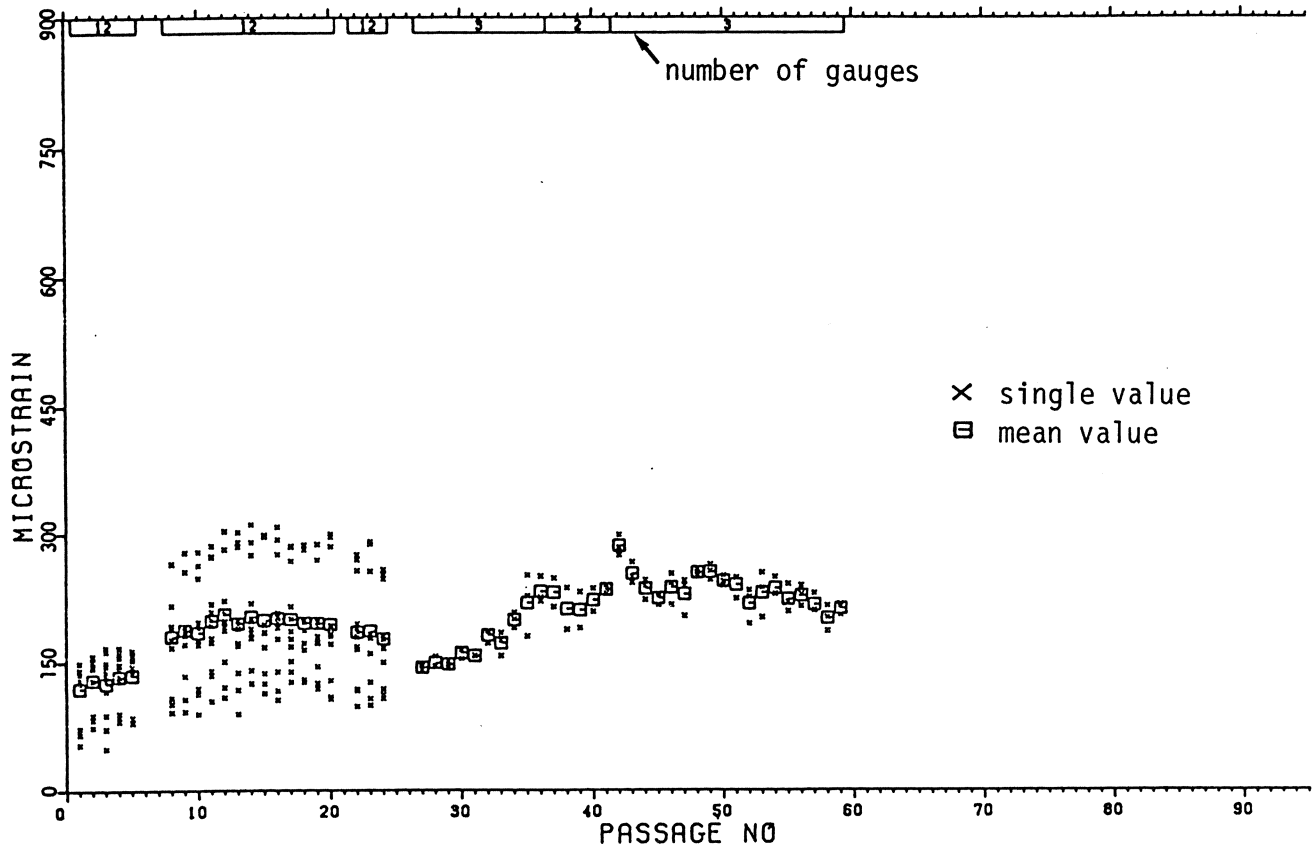


ANNEXE B/5

Team no. 1: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

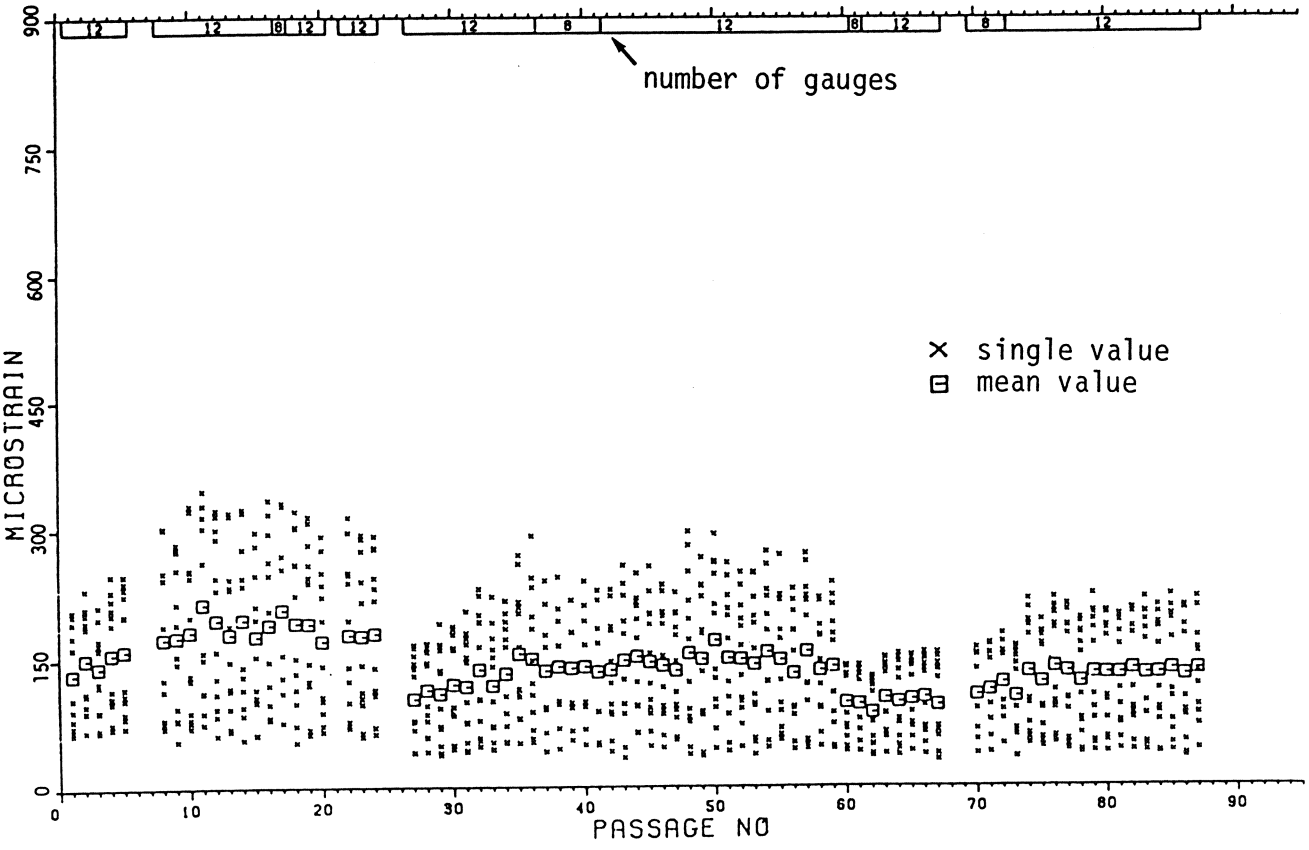
GAUGE GROUP 103-113-123-133

Type 2.1



GAUGE GROUP 106-116-126-136

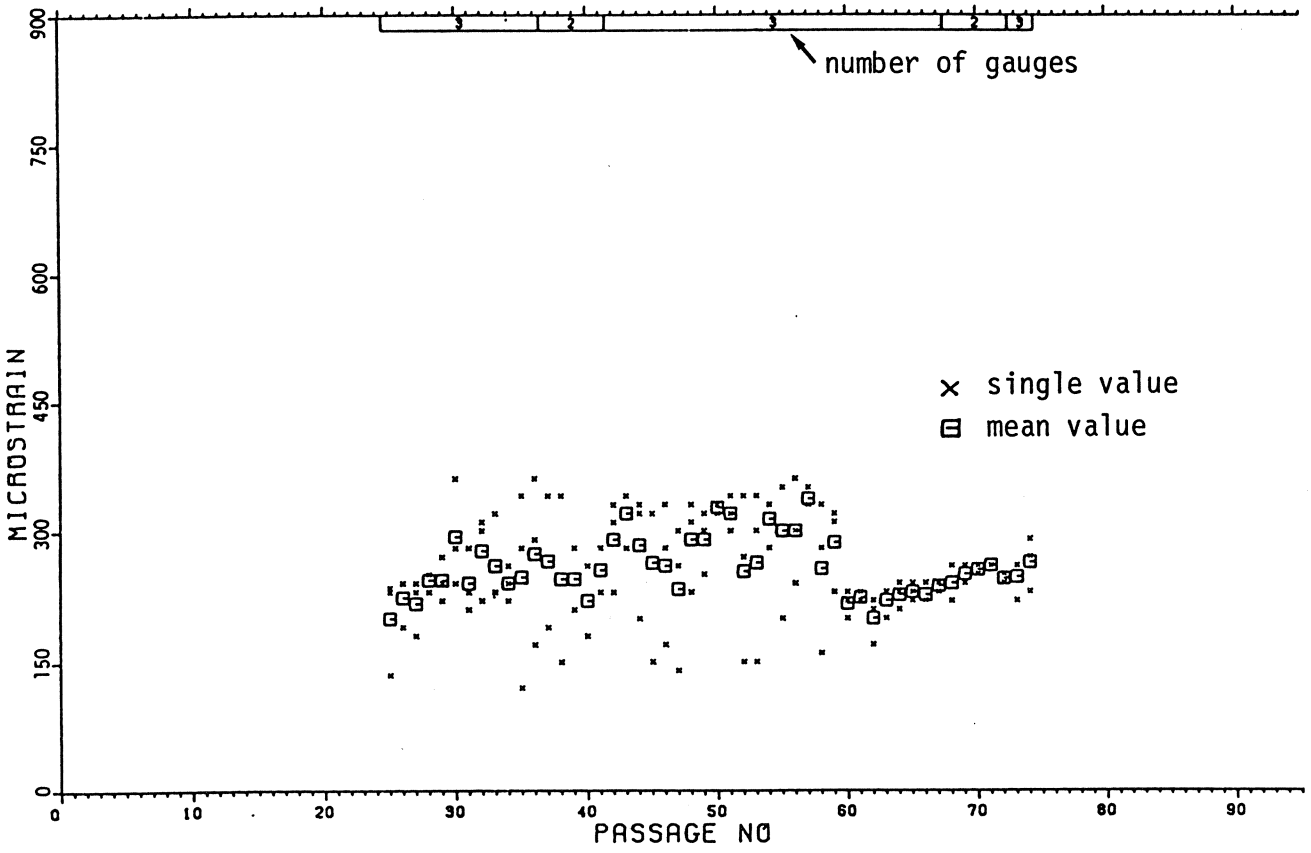
Type 3.1



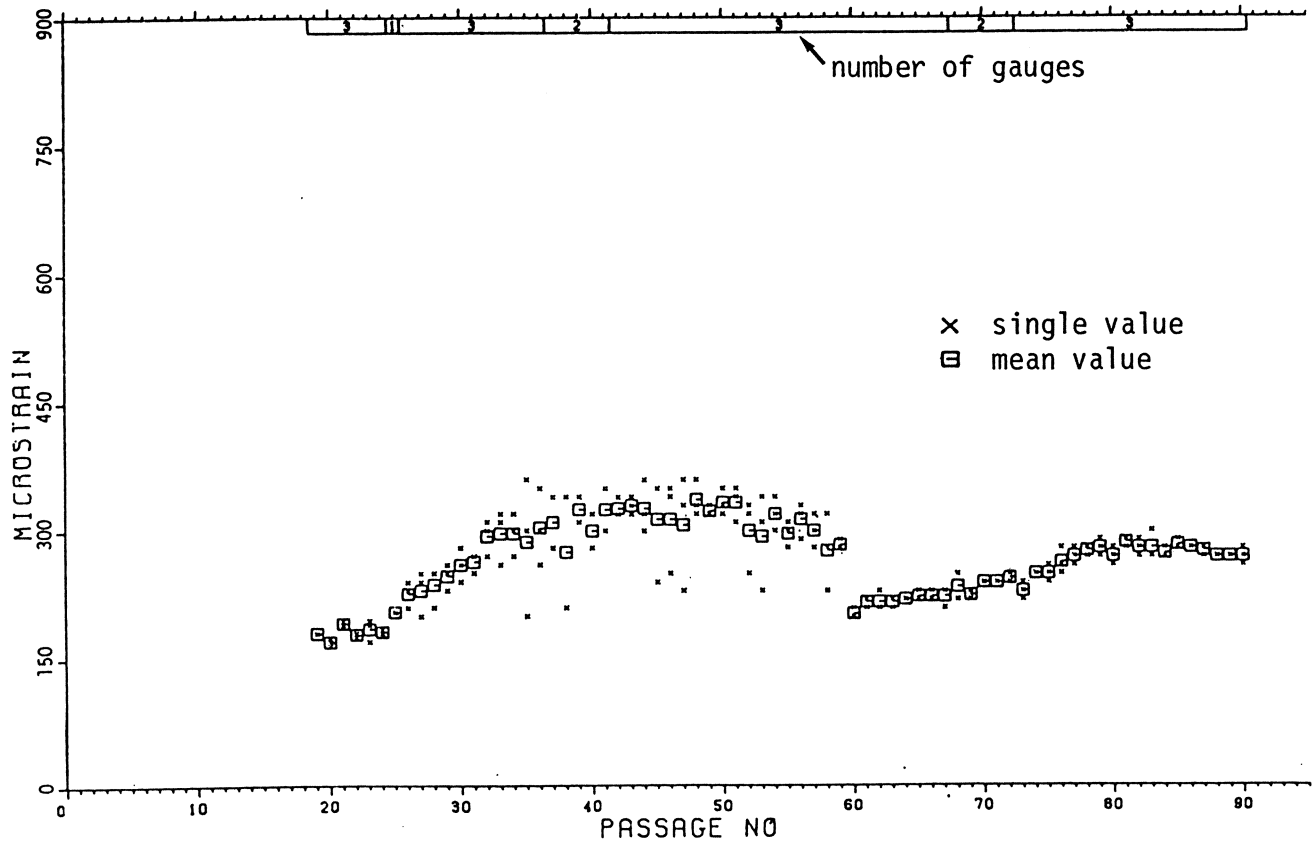
ANNEXE B/6

Team no. 2: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

GAUGE GROUP 101-111-121-131
Type 1.2

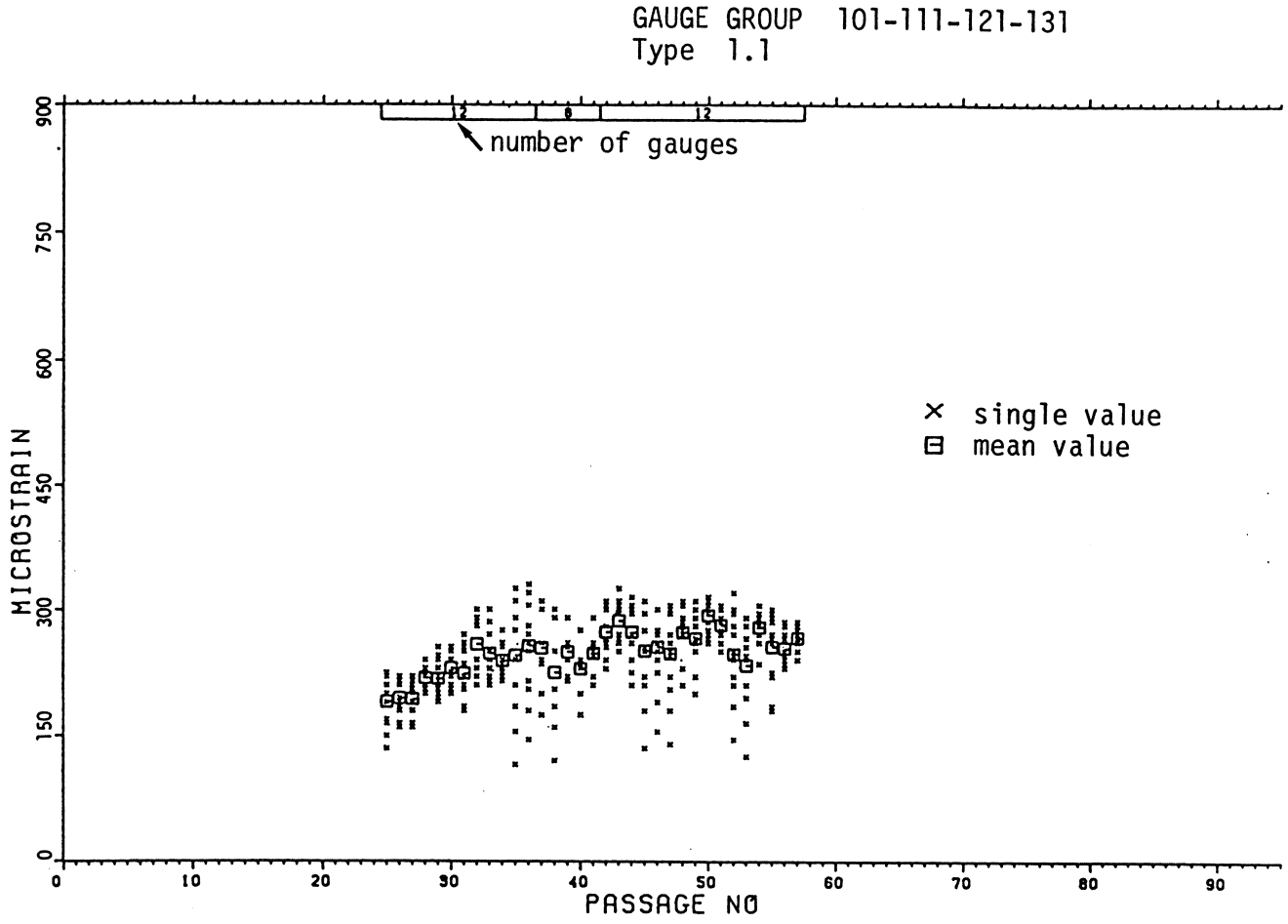


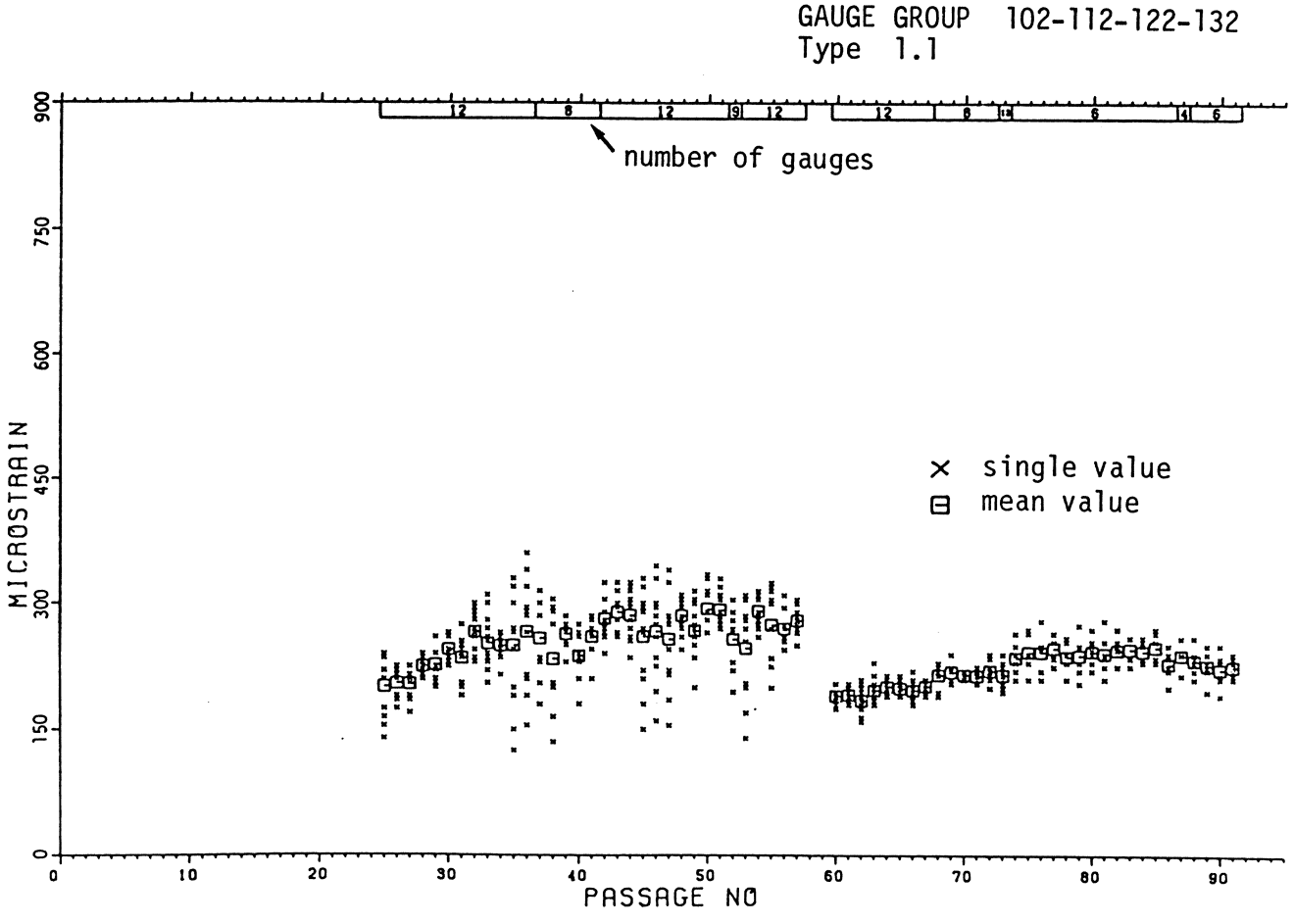
GAUGE GROUP 104-114-124-134
Type 1.2



ANNEXE B/7

Team no. 3: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

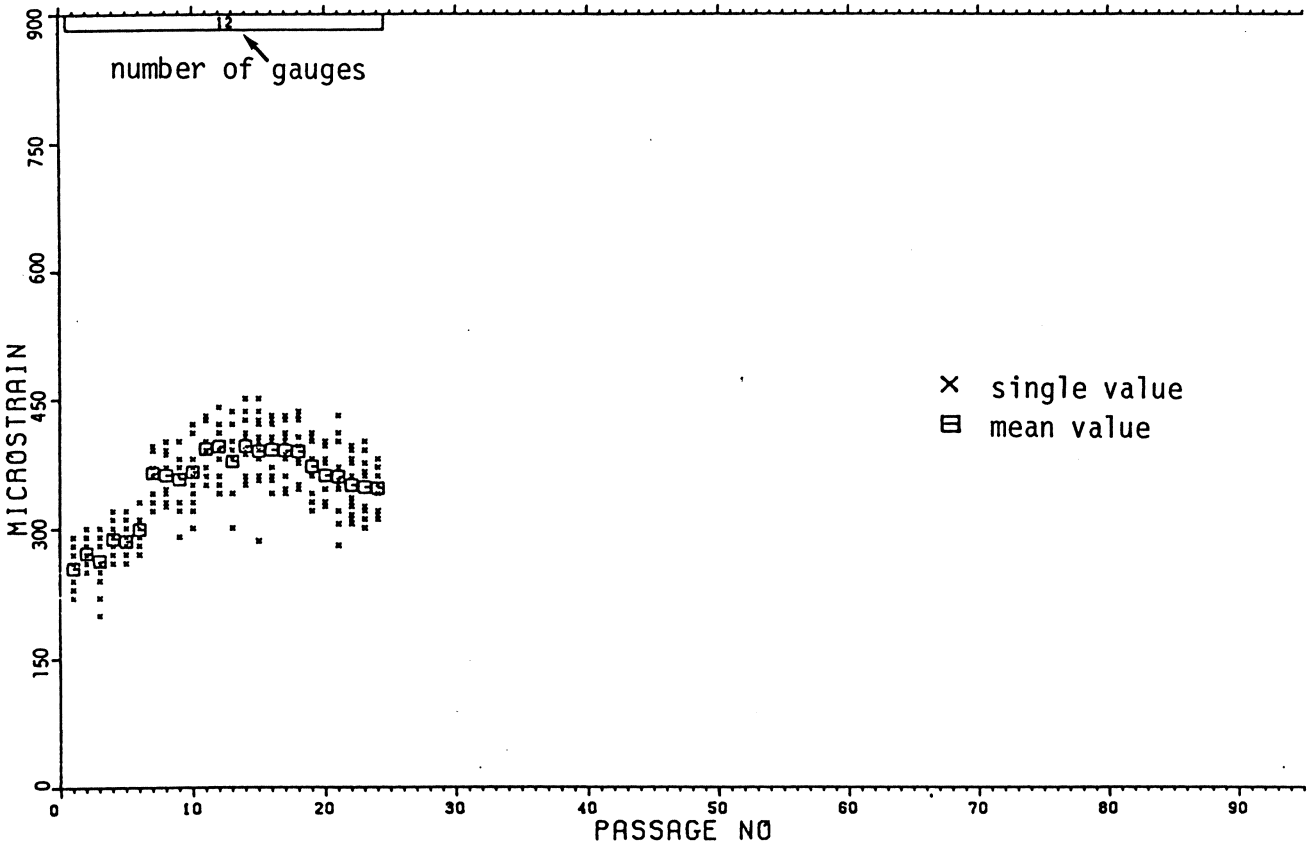




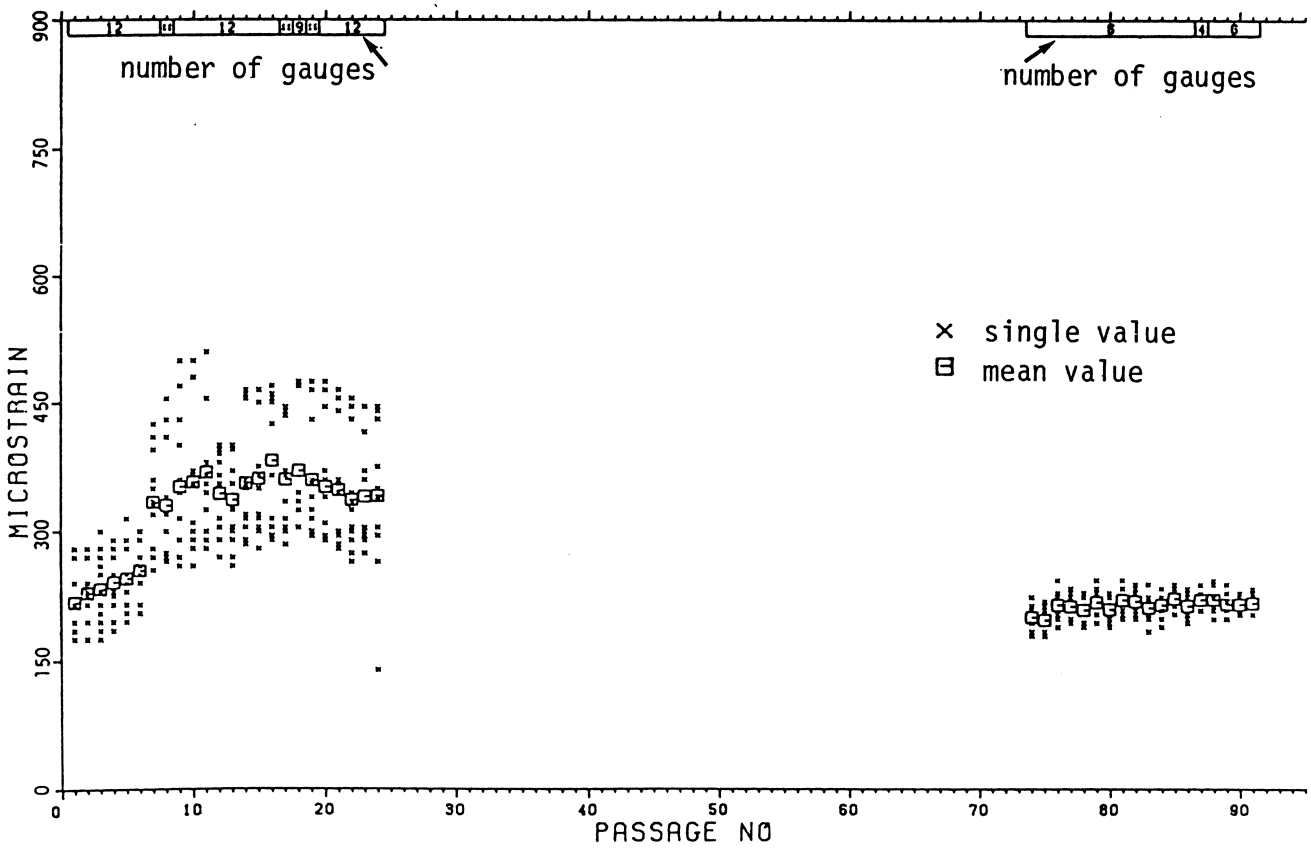
ANNEXE B/8

Team no. 3: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

GAUGE GROUP 103-113-123-133
Type 1.1

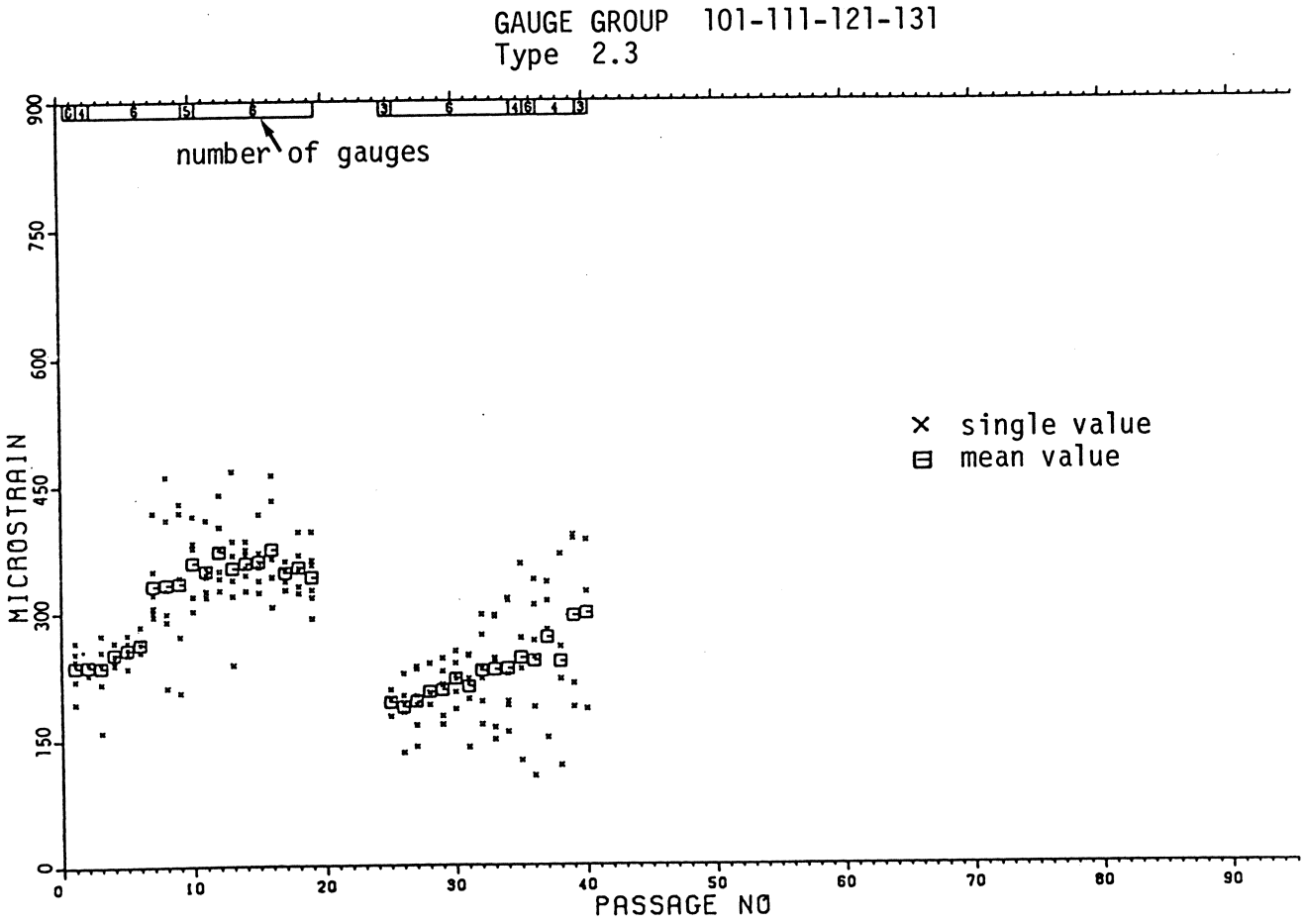


GAUGE GROUP 104-114-124-134
Type 3.1



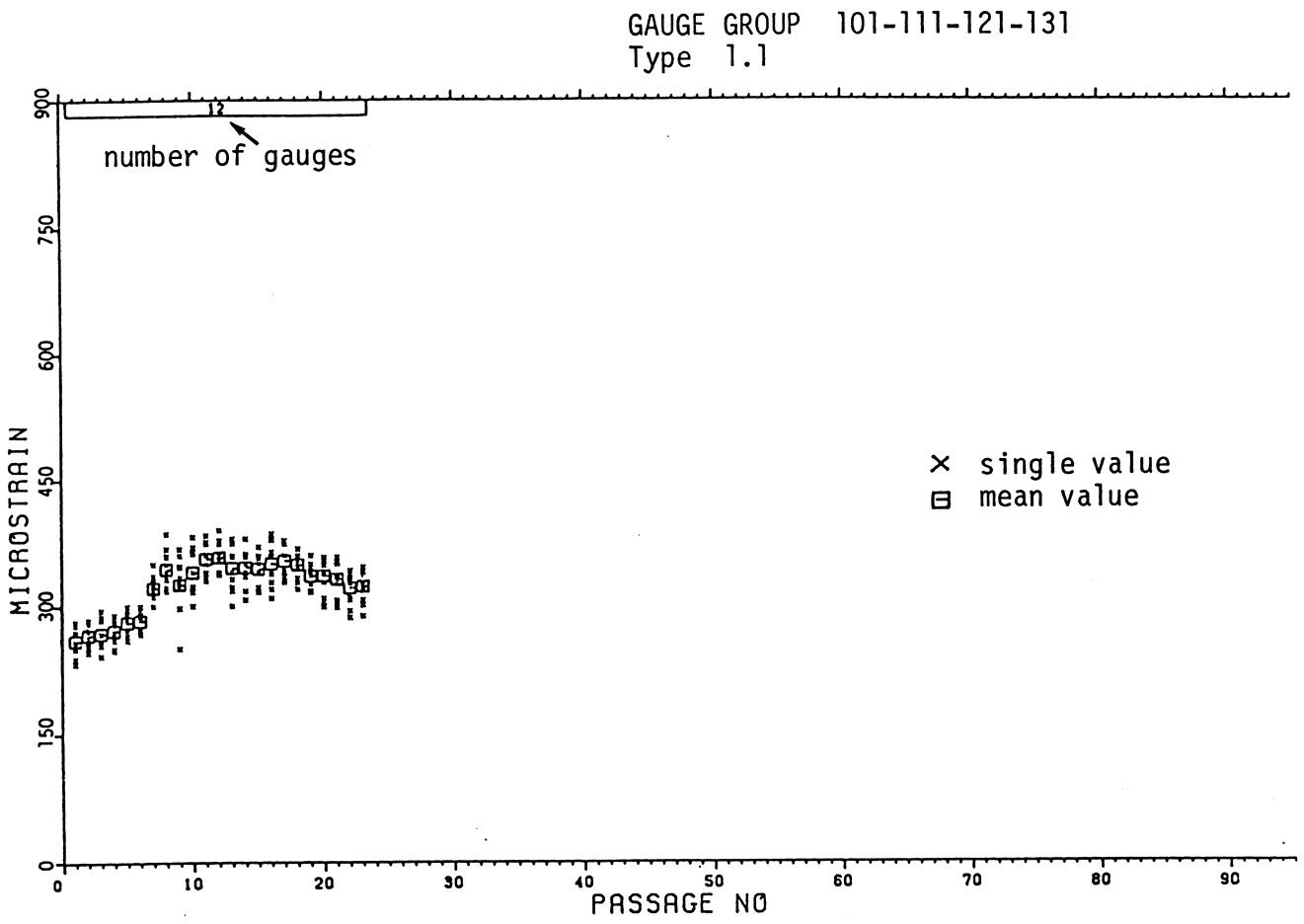
ANNEXE B/9

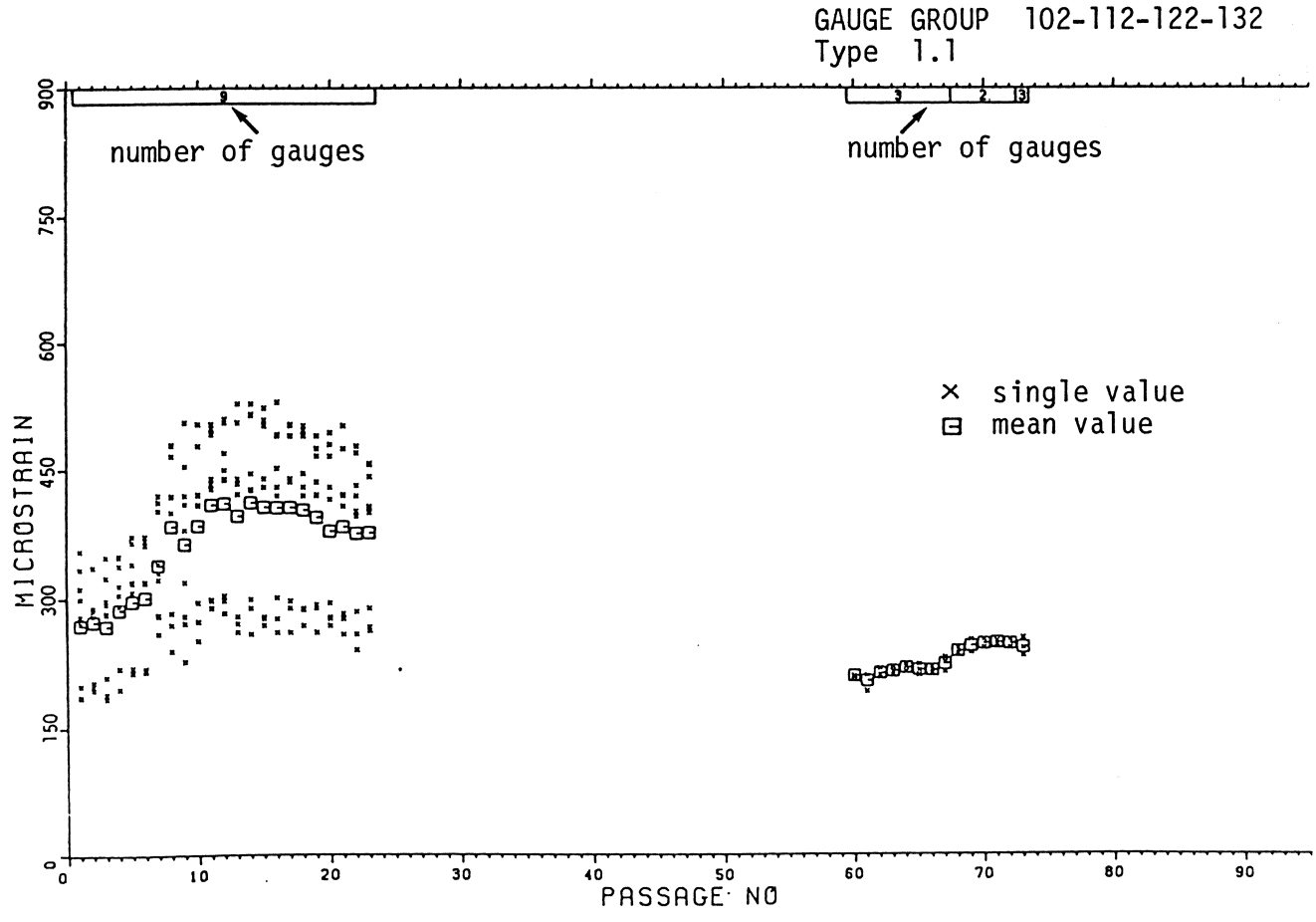
Team no. 4: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS



ANNEXE B/10

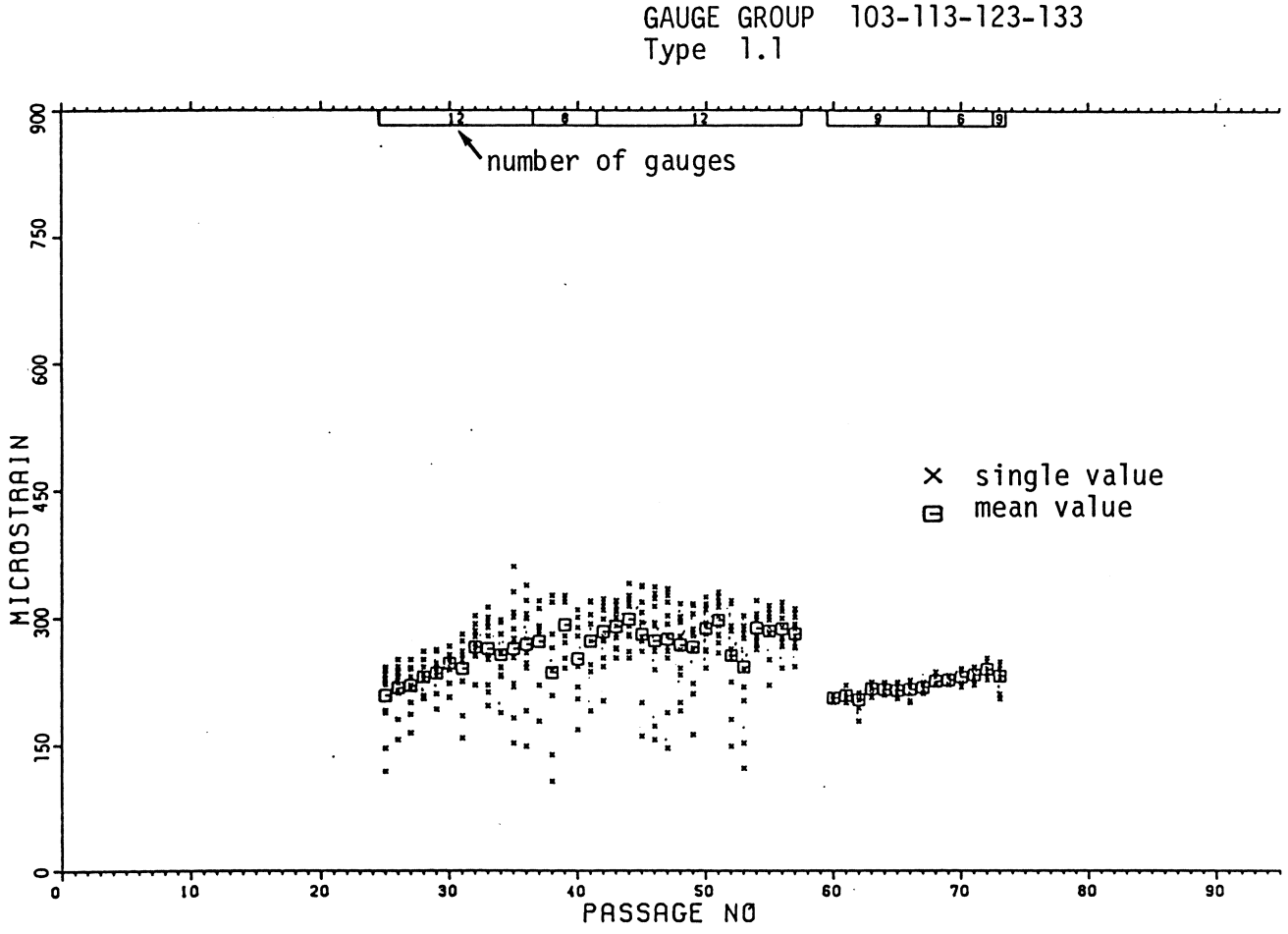
Team no. 5: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

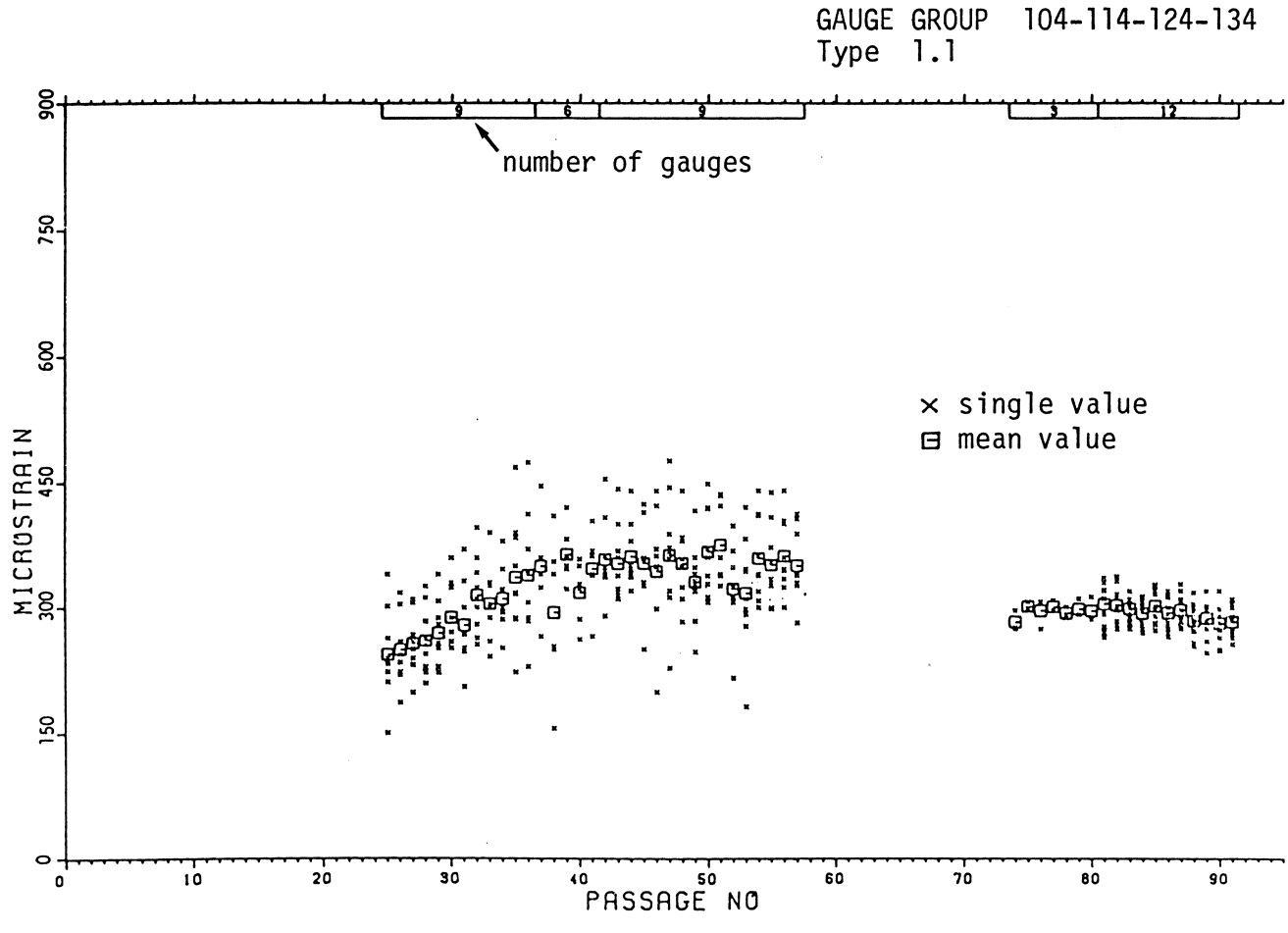




ANNEXE B/11

Team no. 5: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

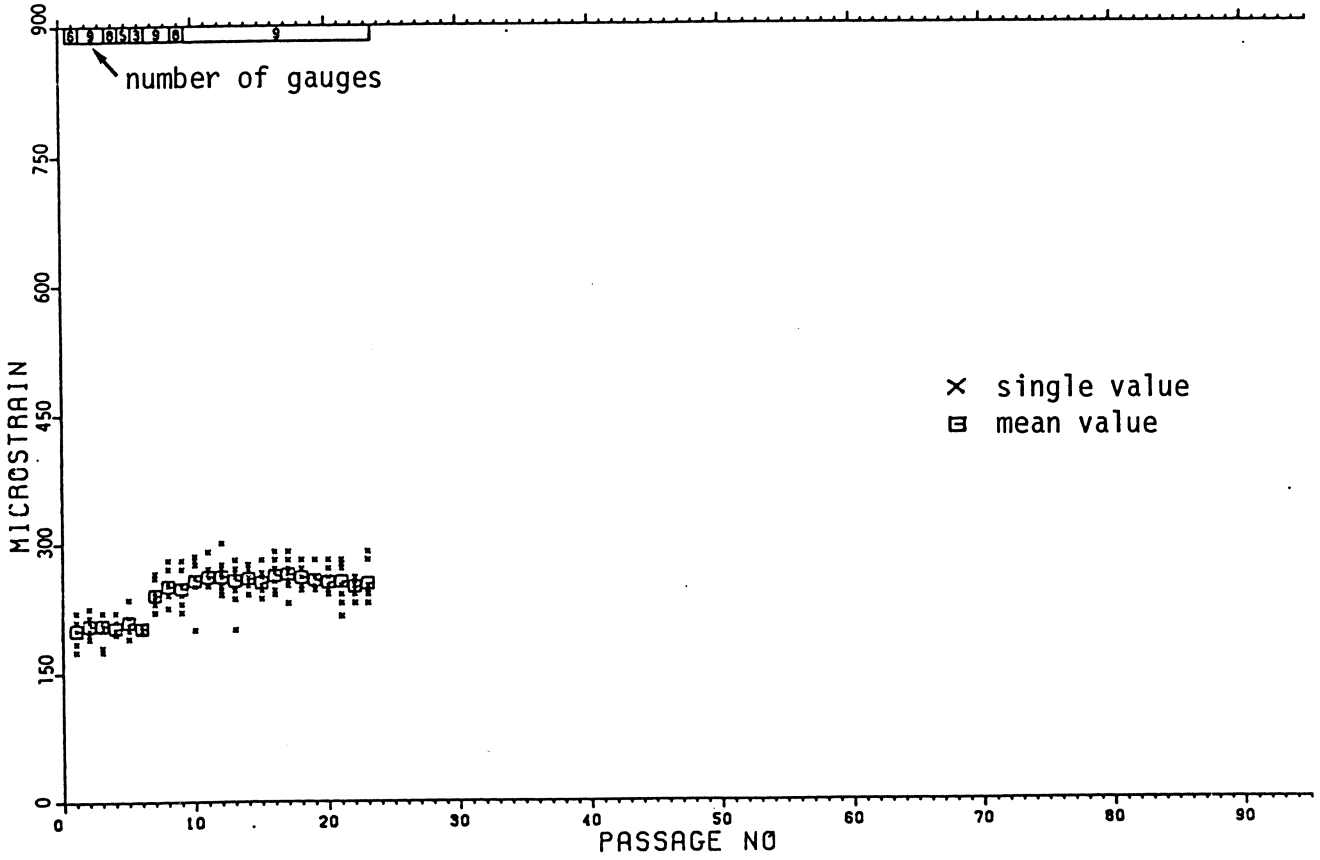




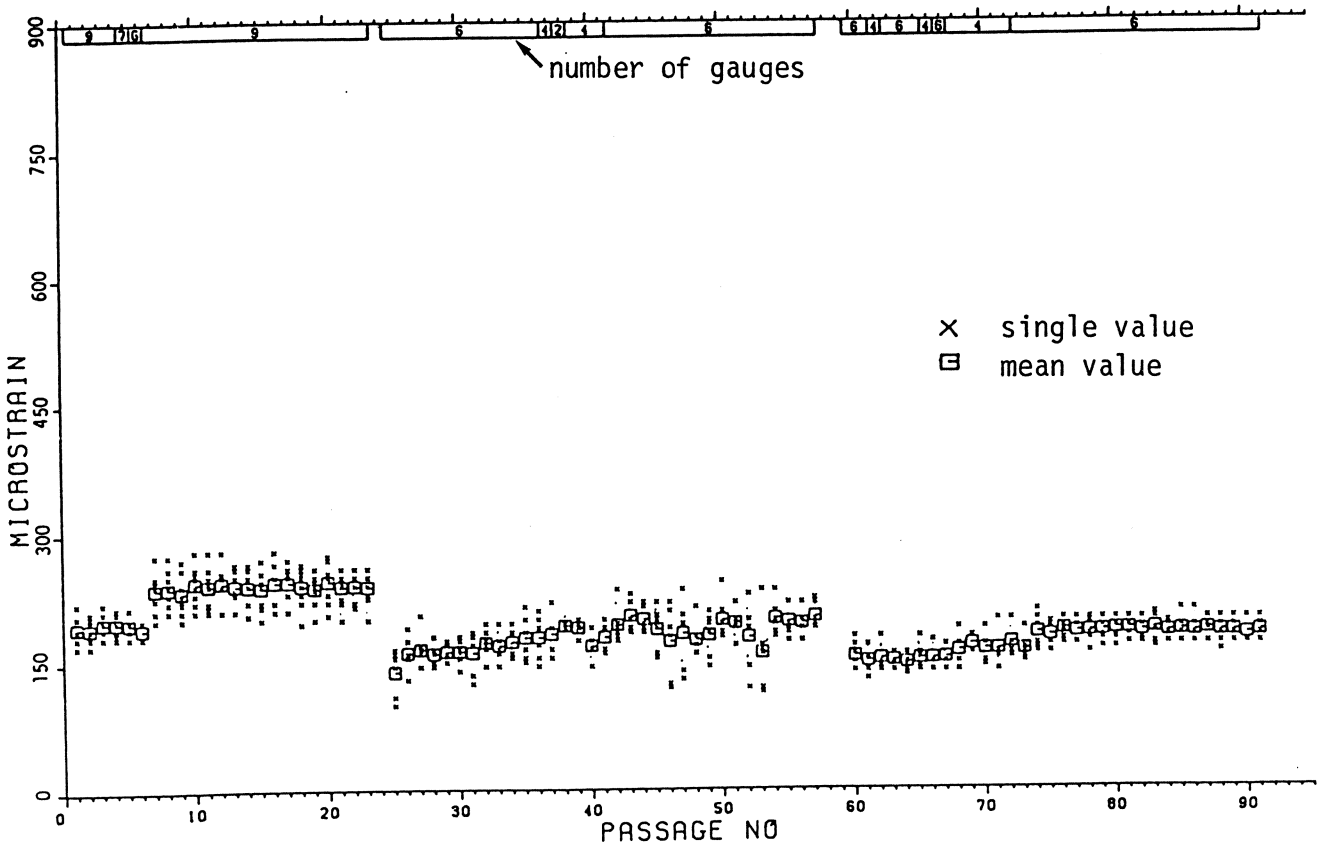
ANNEXE B/12

Team no. 6: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

GAUGE GROUP 101-111-121-131
Type 1.2

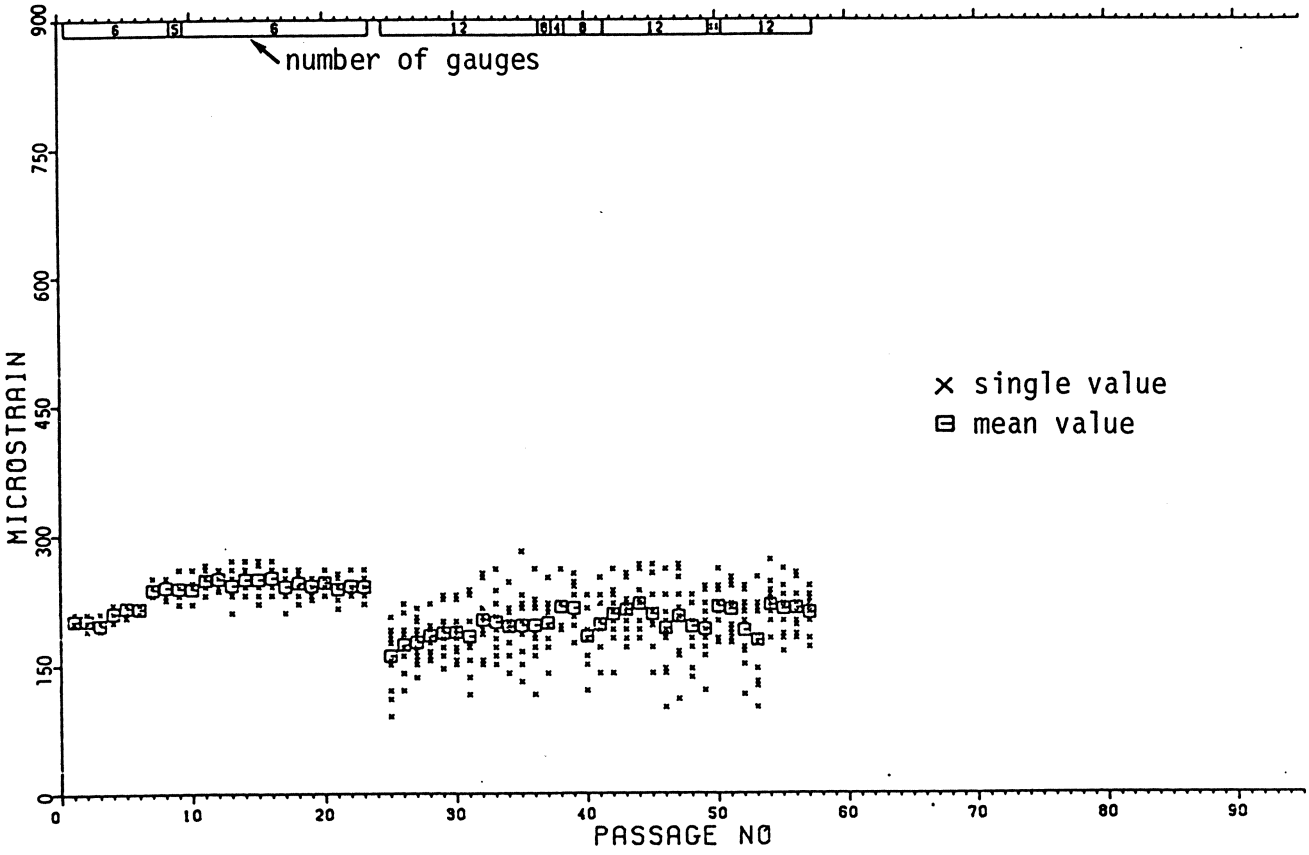


GAUGE GROUP 102-112-122-132
Type 1.2

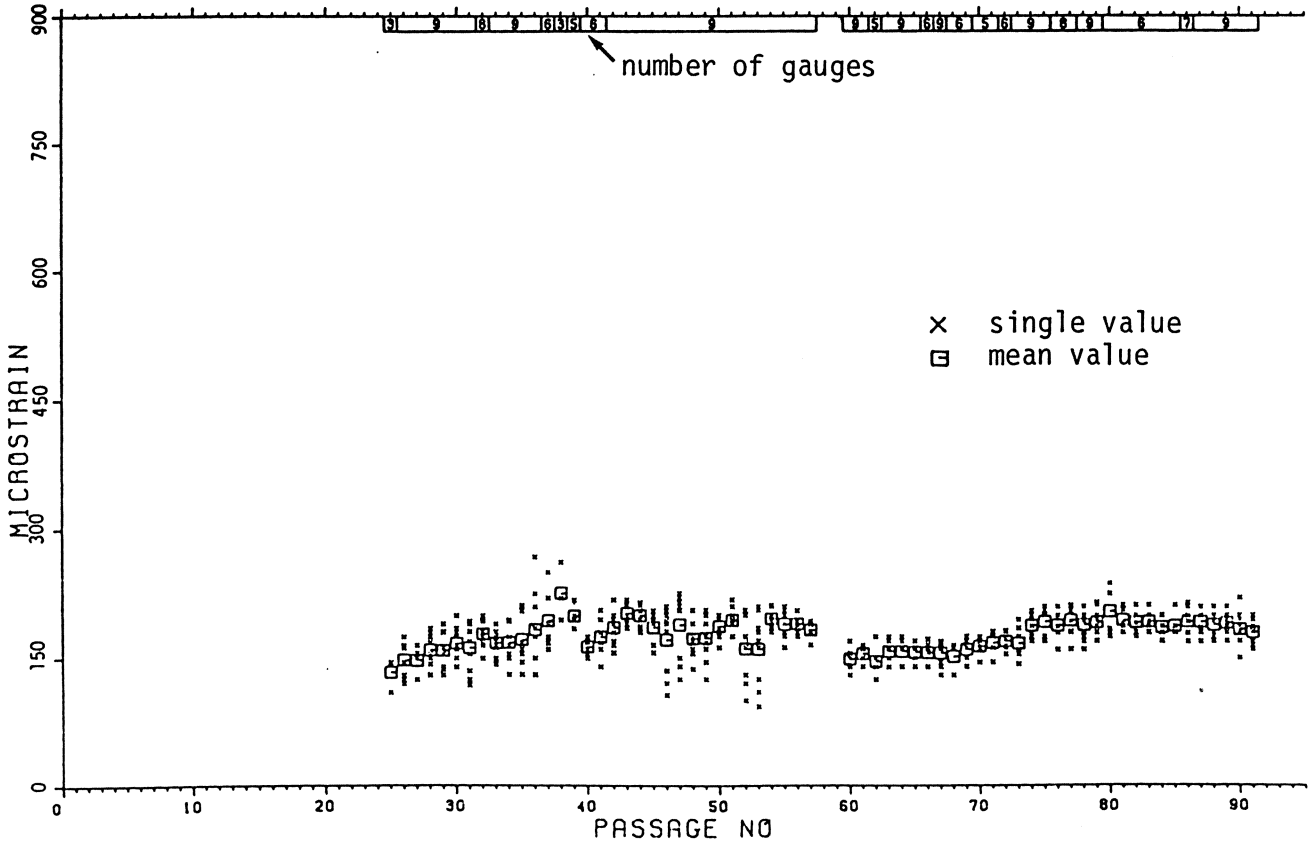


Team no. 6: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

GAUGE GROUP 103-113-123-133
Type 1.2



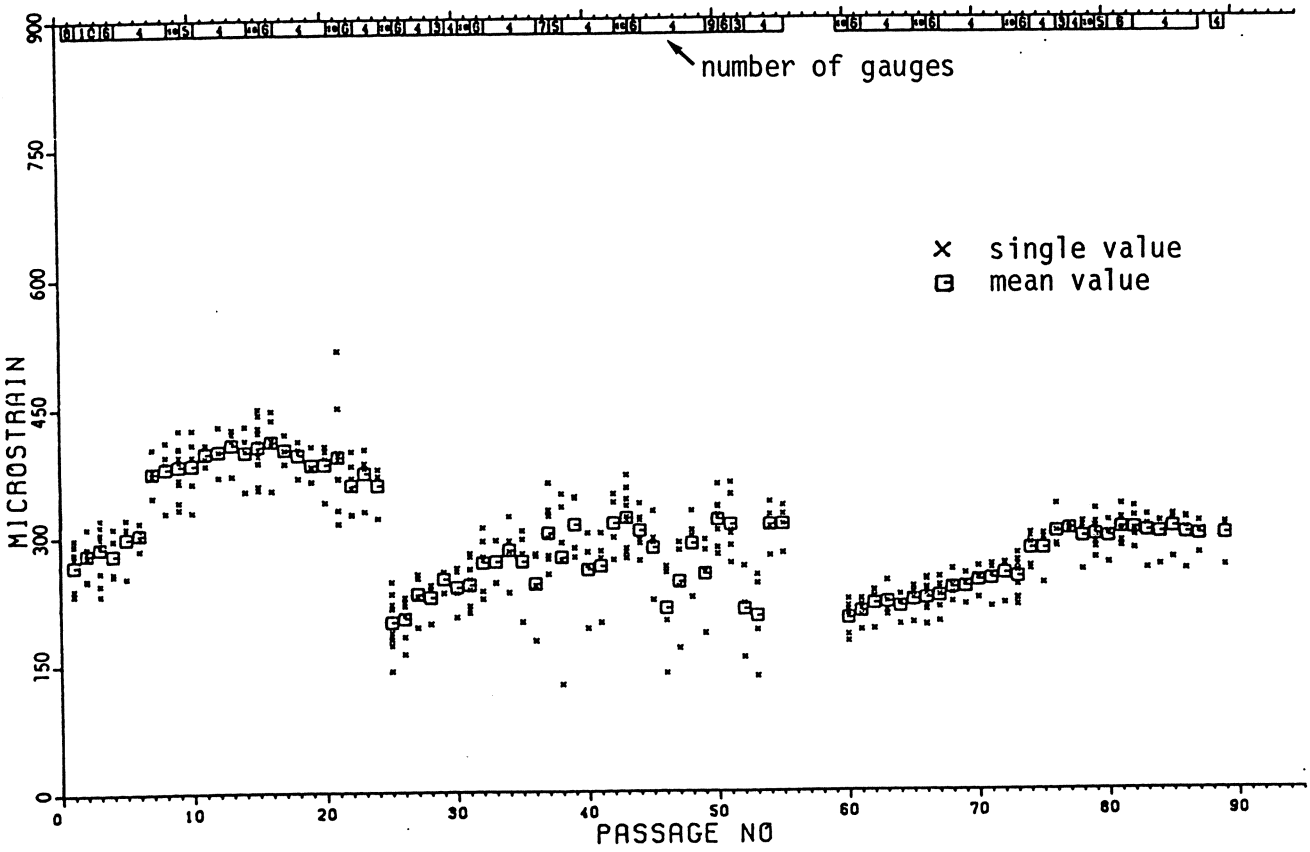
GAUGE GROUP 104-114-124-134
Type 1.2



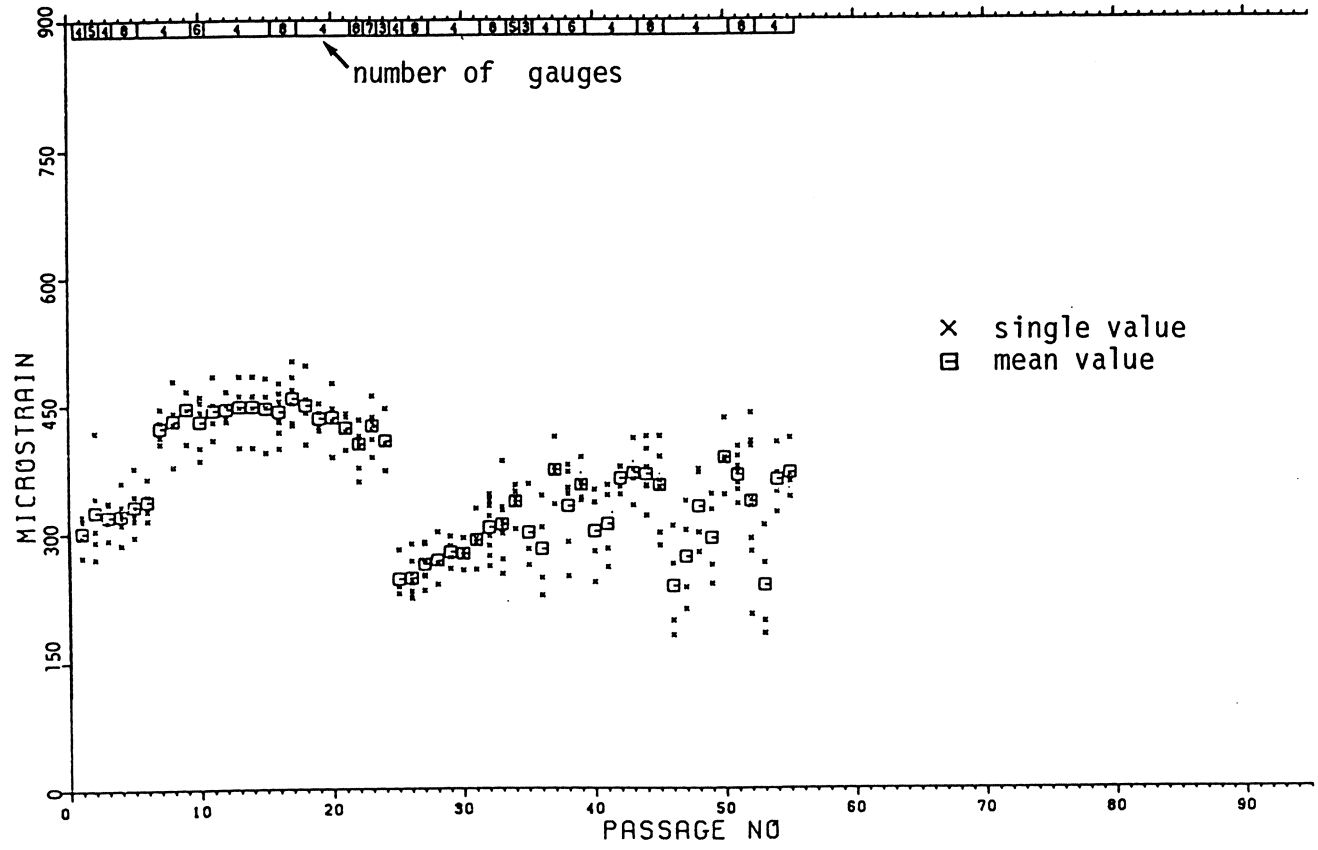
ANNEXE B/14

Team no. 7: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

GAUGE GROUP 101-111-121-131
Type 1.1



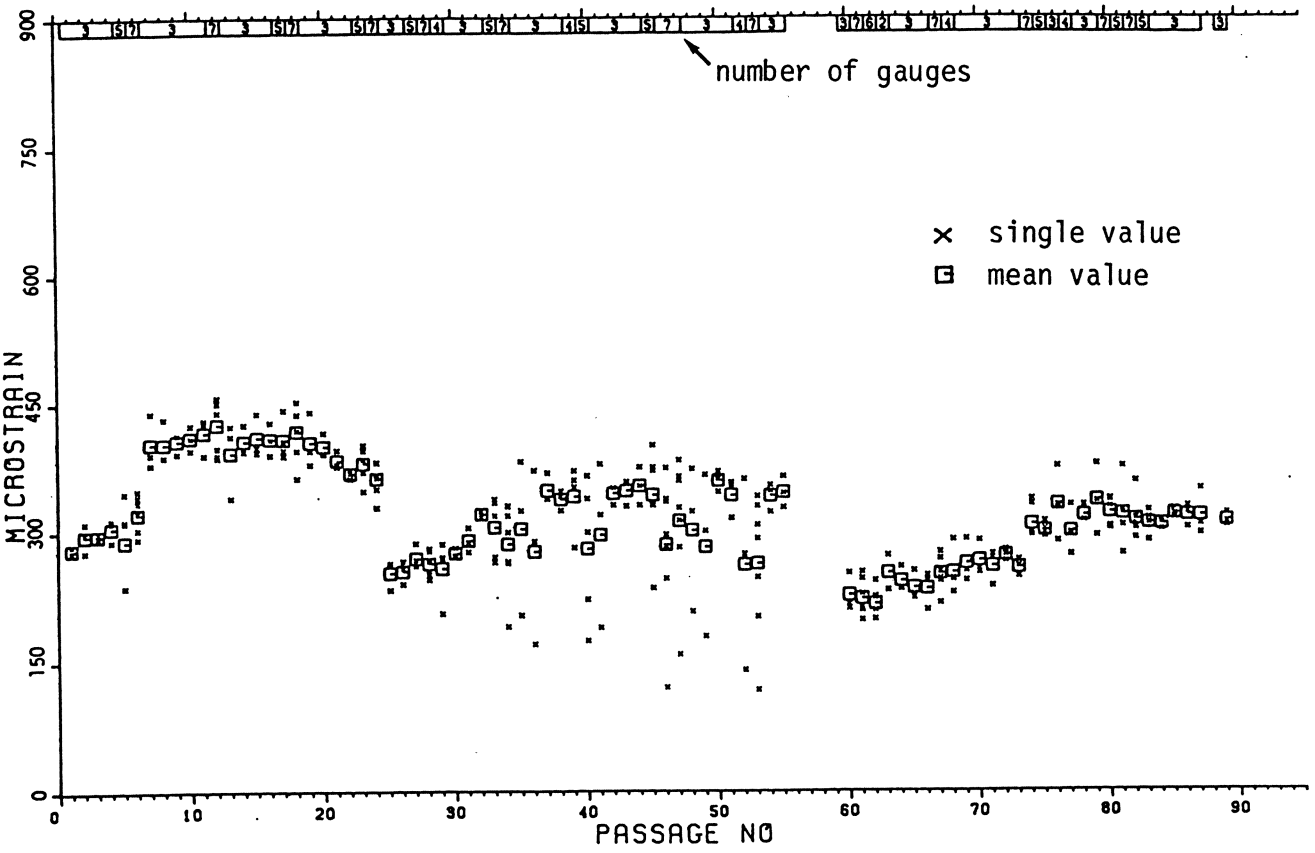
GAUGE GROUP 102-112-122-132
Type 1.1



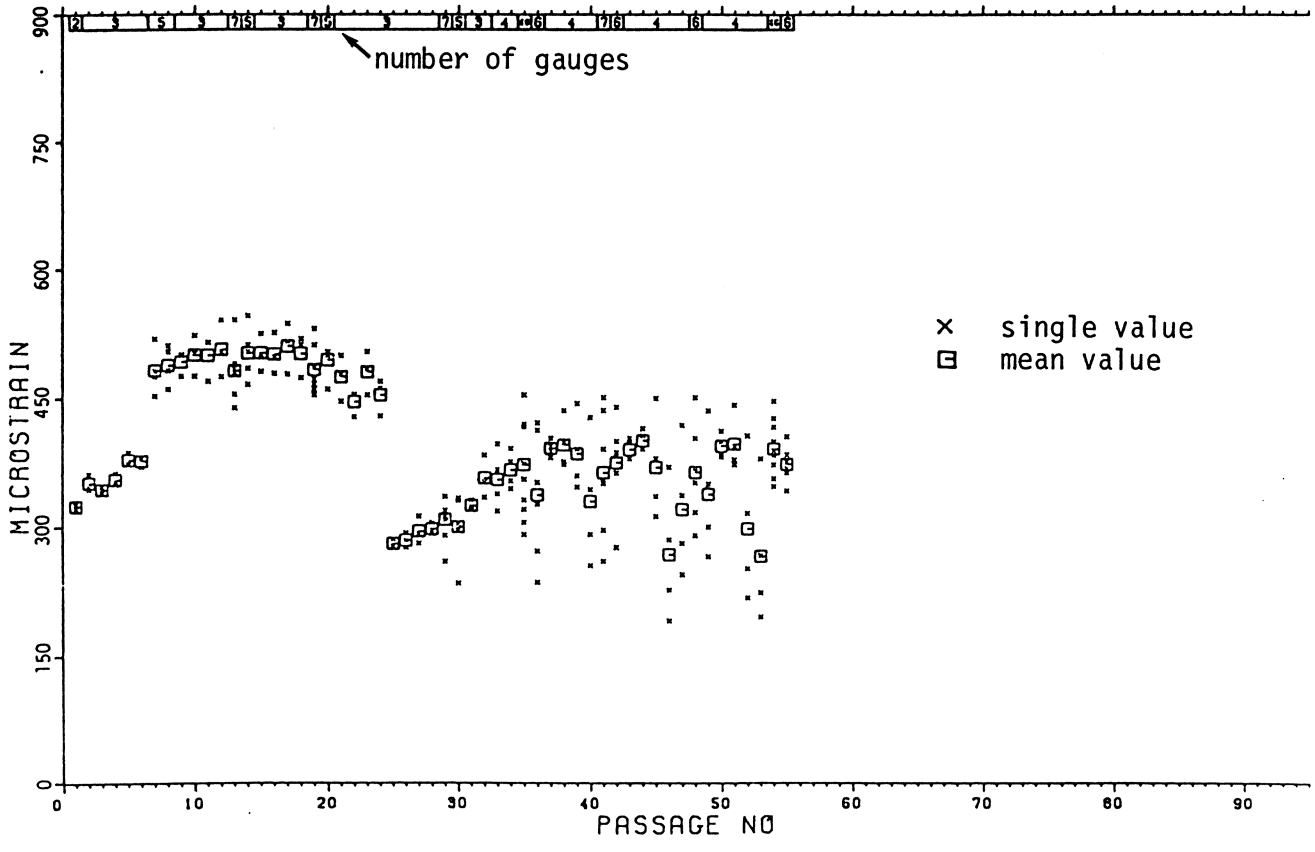
ANNEXE B/15

Team no. 7: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

GAUGE GROUP 103-113-123-133
Type 1.1

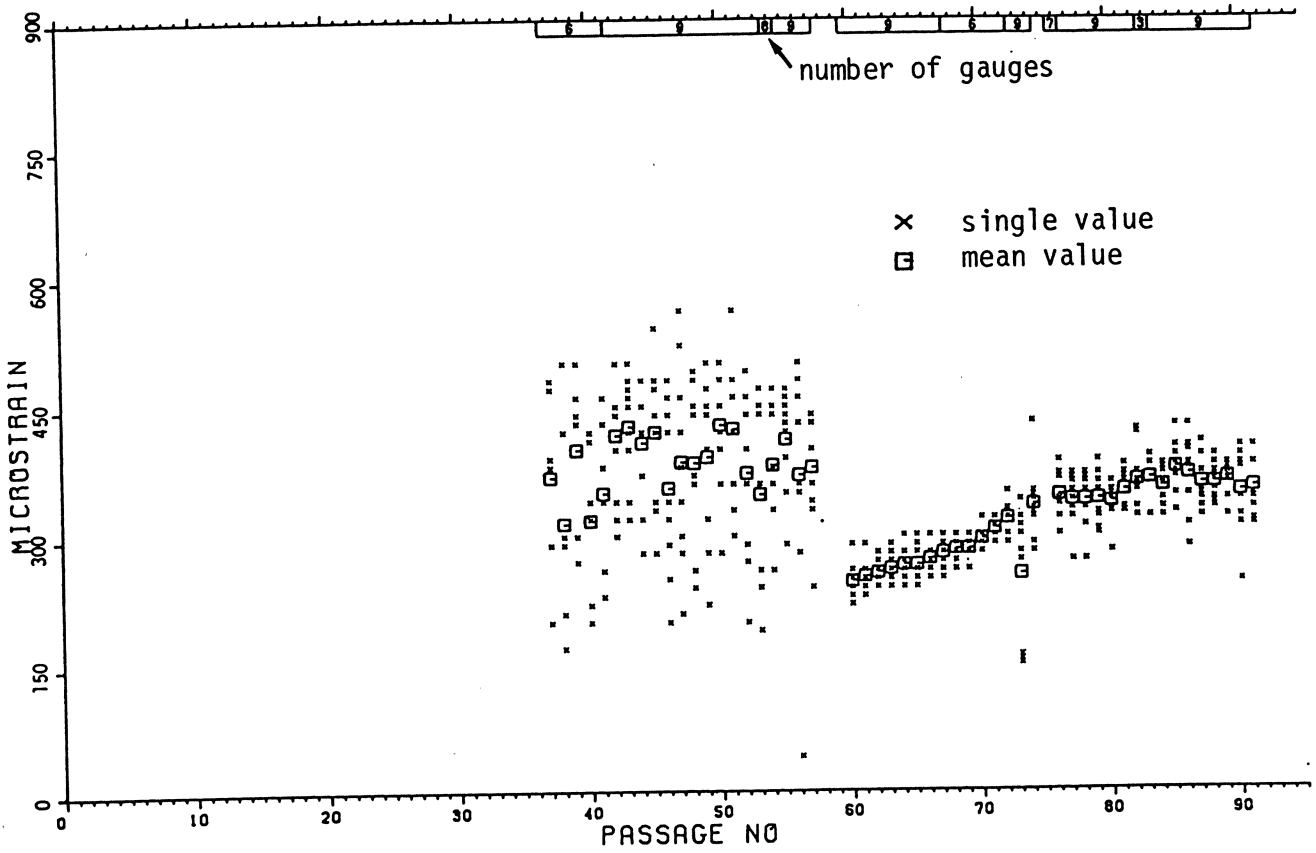


GAUGE GROUP 104-114-124-134
Type 1.1

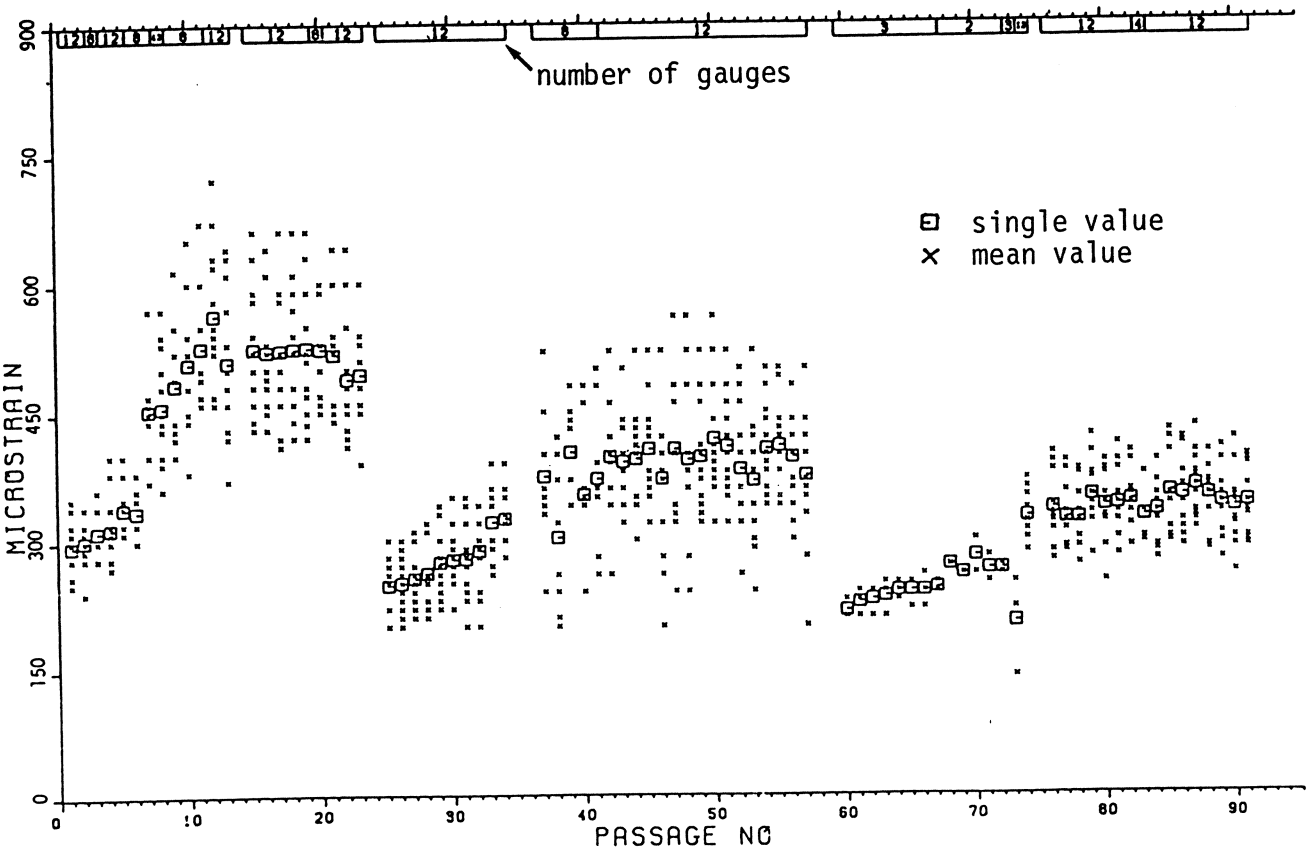


Team no. 8: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

GAUGE GROUP 101-111-121-131
Type 3.1



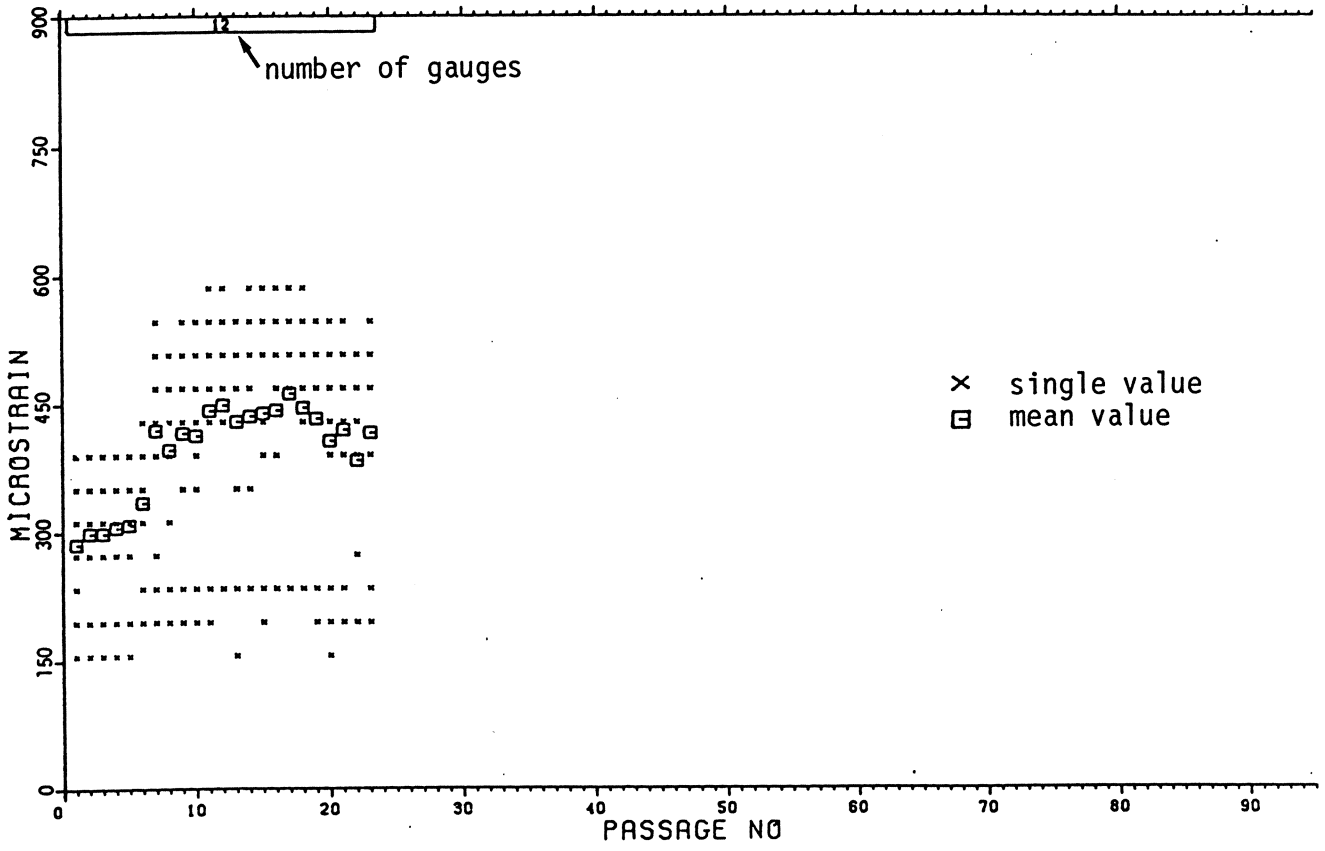
GAUGE GROUP 102-112-122-132
Type 3.1



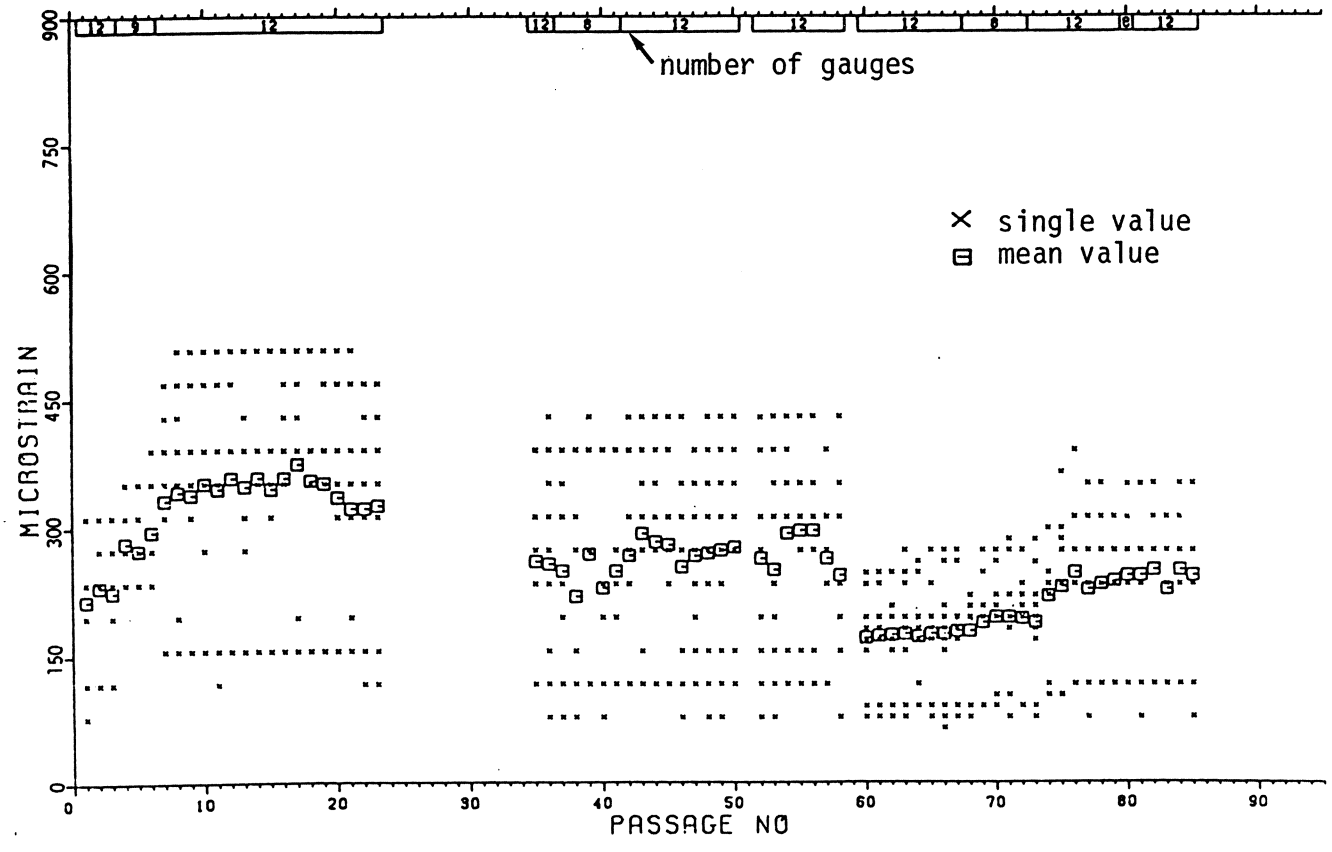
ANNEXE B/17

Team no. 9: STRAIN MEASUREMENTS RESULTS

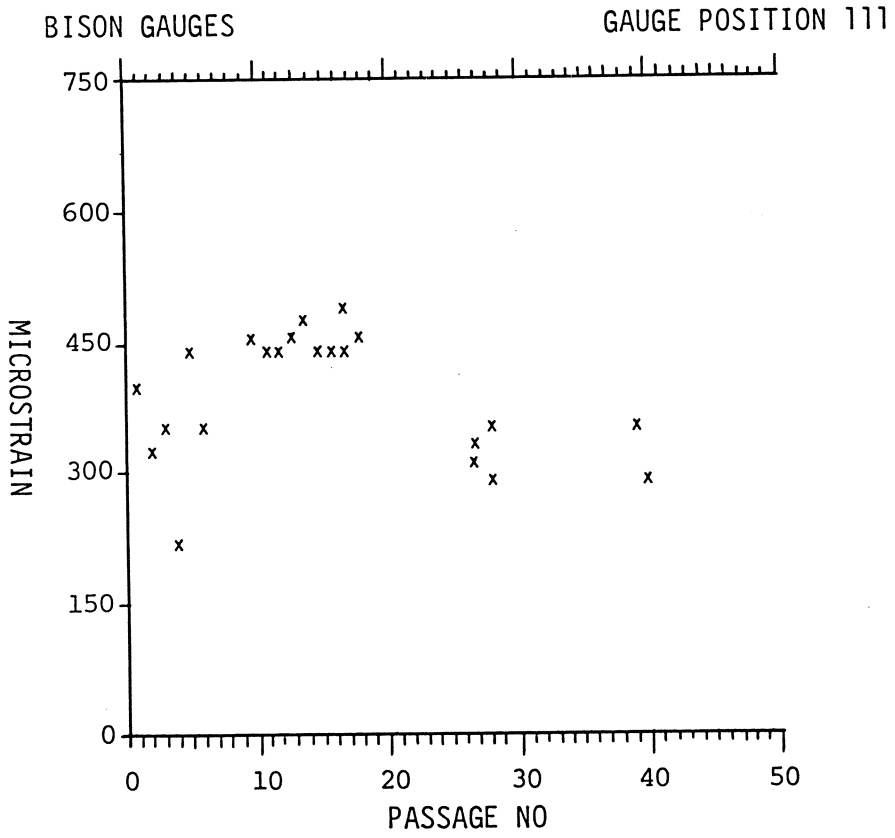
GAUGE GROUP 101-111-121-131
Type 2.2



GAUGE GROUP 102-112-122-132
Type 2.2



STRAIN MEASUREMENTS RESULTS



Passage Number	1	2	3	4	5	6	10	11	12	13	14	15	16	17	17	18	27	27	28	28	39	40
Vehicle	A	C	B	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	B	A	C	B	C	C	A
Tensile strain Axle 1 (μstrain)	223	-	357	-	-	312	312	401	401	357	446	379	379	357	223	580	290	-	223	178	312	268
Tensile strain Axle 2 (μstrain)	401	334	357	223	446	357	468	446	446	468	479	446	446	446	490	468	312	334	290	357	357	290

Annexe C

DETAILS DE CONSTRUCTION DES JAUGES

Annexe C/1: Equipe No 1, type 1.3..... 154
Annexe C/2: Equipe No 1, type 2.1..... 155
Annexe C/3: Equipe No 1, type 3.1..... 156
Annexe C/4: Equipe No 2, type 1.2..... 157
Annexe C/5: Equipe No 3, types 1.1 et 3.1..... 158
Annexe C/6: Equipe No 4, type 2.3..... 159
Annexe C/7: Equipe No 5, type 1.1..... 160
Annexe C/8: Equipe No 6, type 1.2..... 161
Annexe C/9: Equipe No 7, type 1.1..... 162
Annexe C/10: Equipe No 8, type 2.1..... 163
Annexe C/11: Equipe No 9, type 2.2..... 164

ANNEXE C/1

ENQUETE SUR LES CAPTEURS
INQUIRE ON GAUGES

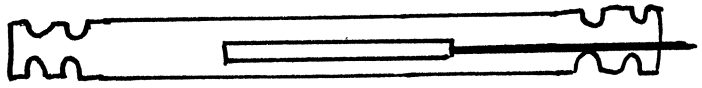
1. Equipe: No 1
   Team :

2. Type de capteur: DA 3
   Type of gauge :

3. Fabricant : Hottinger Baldwin Mess. HBM
   Manufacture:

   Fournisseur:
   Supplier :

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes)
   Schematic drawing (plan and profiles)



No protection

5. Utilisation (nombre, années, pertes):
   Use (number, years, loss-rate):

6. Coût 180 $
   Cost

7. Précision (théorique):
   Accuracy (theorical):

8. Câbles: HBM - MOD 5004 - Ø 0.17 x 4
   Cables specification: PVC PROTECTION - 0.40 p Farad/m

9. Commentaires:
   Comments:

ANNEXE C/2

ENQUETE SUR LES CAPTEURS
INQUIRE ON GAUGES

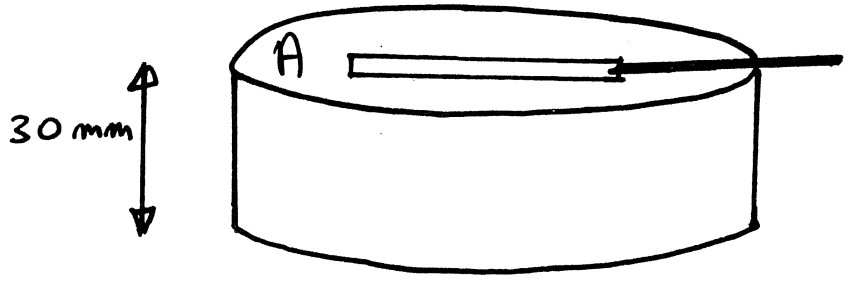
1. Equipe:
   Team : No 1

2. Type de capteur: LP 21 60 ¯ 120 on asphalt concrete specimens
   Type of gauge : obtained from Marshall specimens

3. Fabricant : Hottinger Baldwin Mess. HBM
   Manufacture:

   Fournisseur:
   Supplier :

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes)
   Schematic drawing (plan and profiles)



Face A at the base of the asphalt layer - Strain gauges protected by HBM X 60 glue

5. Utilisation (nombre, années, pertes): 60 , 10 years, loss-rate:
   Use (number, years, loss-rate): from 0 to 40%

6. Coût
   Cost (of the strain gauge) : 12 $

7. Précision (théorique):
   Accuracy (theorical):

8. Câbles:
   Cables specification: HBM - MOD 5004 - Ø 0.17 x 4
   PVC PROTECTION - 0.40 p Farad/m

9. Commentaires:
   Comments:

ANNEXE C/3

ENQUETE SUR LES CAPTEURS
INQUIRE ON GAUGES

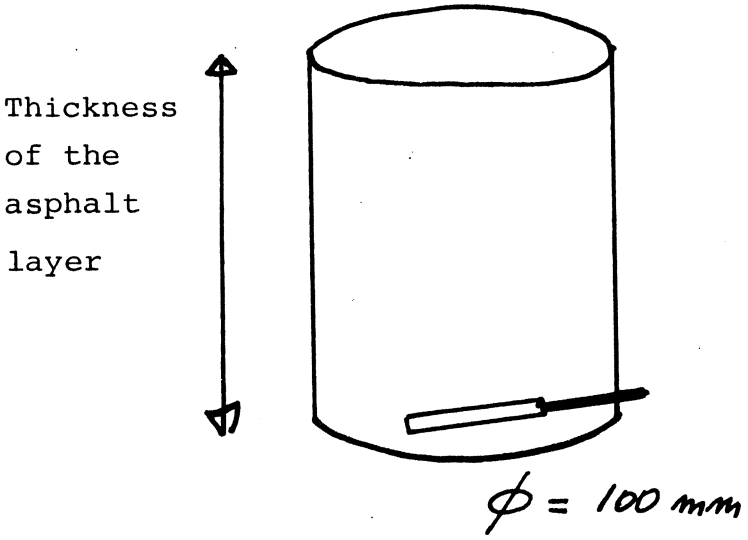
1. Equipe: / Team : No 1

2. Type de capteur: / Type of gauge : LP 21 60 - 120

3. Fabricant : / Manufacture: Hottinger Baldwin Mess. HBM

   Fournisseur: / Supplier :

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes) / Schematic drawing (plan and profiles)



5. Utilisation (nombre, années, pertes): / Use (number, years, loss-rate): 100, 8 years, 0%

6. Coût / Cost 20 $

7. Précision (théorique): / Accuracy (theorical):

8. Câbles: / Cables specification: HBM - MOD 5004 - Ø 0.17 x 4
   PVC PROTECTION - 0.40 p Farad/m

9. Commentaires: / Comments:

ANNEXE C/4

ENQUETE SUR LES CAPTEURS (avant et sans Nardò)
INQUIRE ON GAUGES (before and without Nardò)

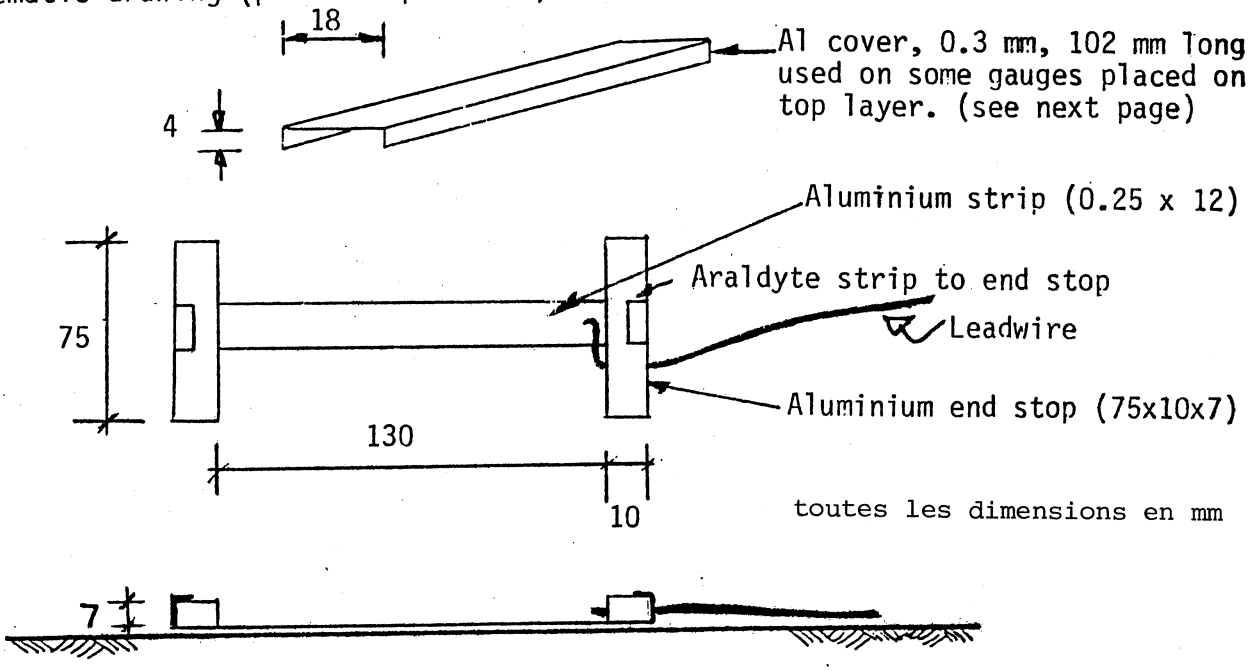
1. Equipe: / Team : No 2

2. Type de capteur: Kyowa wire 120 ohm strain gauge KC-70-A1-11 bonded to
   Type of gauge : 0.25 mm thick x 12 mm wide Aluminium strip with end stops.

3. Fabricant : Kyowa, Japan
   Manufacture:

   Fournisseur:
   Supplier : Townson & Mercer, Box 378, Glen Waverley 3150, Australia

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes)
   Schematic drawing (plan and profiles)



5. Utilisation (nombre, années, pertes): In 1981, 319 gauges were installed.
   Use (number, years, loss-rate): 50% of these survived material compaction.

6. Coût / Cost (US $): $40 Aust. each (approx. $35 US)

7. Précision (théorique): ?
   Accuracy (theorical):

8. Câbles: Australian Standard Cable 71TK3.501.
   Cables specification: 3 core twisted with shield. PVC coated.

9. Commentaires: Recording equipment used supplied by Autostrade, Italy.
   Comments: Recording of data performed by Autostrade.

ANNEXE C/5

ENQUETE SUR LES CAPTEURS (avant et sans Nardò)
INQUIRE ON GAUGES (before and without Nardò)

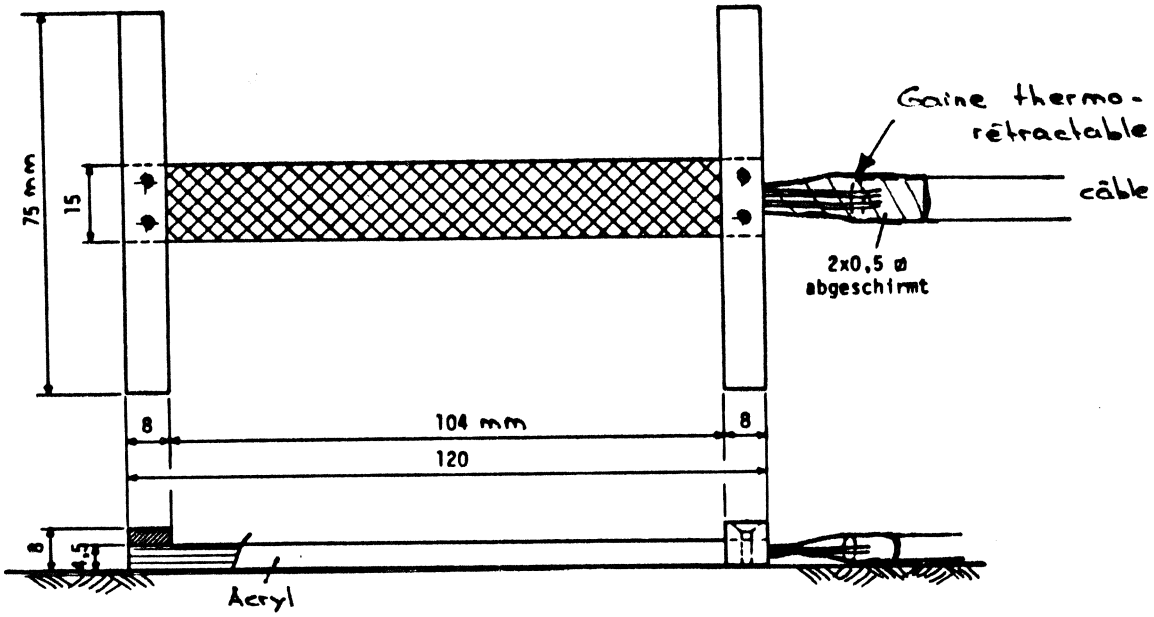
1. Equipe: No 3
   Team :

2. Type de capteur: 1) KIOWA KM - 120 - H2 - 11 L 100-3
   Type of gauge : 2) HBM 60 / 600 LP 61

3. Fabricant : 1) KIOWA - Japon
   Manufacture: 2) Hottinger Baldwin Messtechnik - Allemagne

   Fournisseur: 1) Traco AG - Zürich (CH)
   Supplier : 2) Schenk AG - Wanikon + Yverdon (CH)

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes) KIOWA (k = 2.00)
   Schematic drawing (plan and profiles)



5. Utilisation (nombre, années, pertes): KIOWA : 100 depuis 4 ans ;
   Use (number, years, loss-rate): perte : essai 2 ≃ 30 % / essai 3 ≃ 15 %
   HBM : ~ 10 depuis 1 année ; perte = 0 % (carottes)

6. Coût (US $): KIOWA : ~ 35 - 40 $ (matériel + travail)
   Cost HBM : ~ 15 $ (jauge nue) + carottage + montage + epoxy

7. Précision (théorique): KIOWA : 120 Ω ± 1 %
   Accuracy (theorical): HBM : 600 Ω ± 0.25 %

8. Câbles:
   Cables specification: Cables blindés type 2546 F 2 x 0.40 mm²

9. Commentaires:
   Comments: —

ANNEXE C/6

ENQUETE SUR LES CAPTEURS (avant et sans Nardò)
INQUIRE ON GAUGES (before and without Nardò)

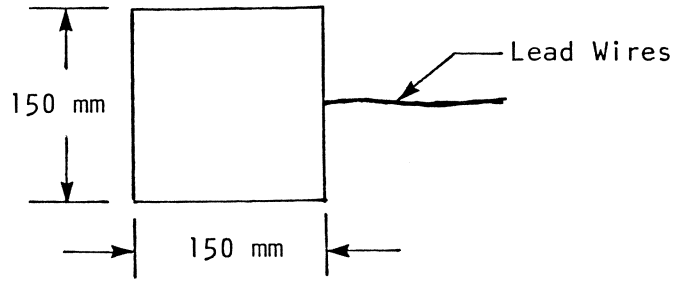
1. Equipe:
   Team : No 4

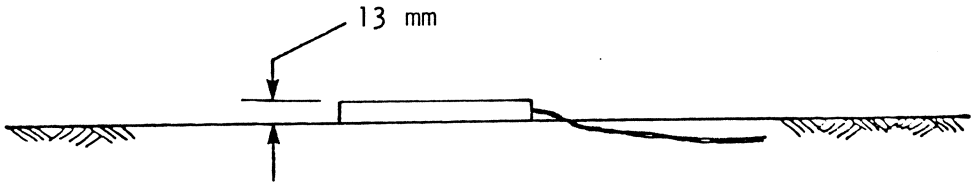
2. Type de capteur:
   Type of gauge : Metal Foil Gauge, Asphalt Embedded

3. Fabricant :
   Manufacture: Micro-Measurements, U.S.A.

   Fournisseur:
   Supplier : InterTechnology Limited, Canada

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes)
   Schematic drawing (plan and profiles)





5. Utilisation (nombre, années, pertes):
   Use (number, years, loss-rate): 60 Pieces
   1973 - 1984
   22% Loss

6. Coût (US $):
   Cost Gauge cost only - $15.00 Can.

7. Précision (théorique):
   Accuracy (theorical): Dependent on recording process, Typically 1 X 10^{-6}

8. Câbles:
   Cables specification: Belden 8434, 2 Pair, each shielded.

9. Commentaires: Service life unknown, gauges still
   Comments: operational since 1973.

ANNEXE C/7

ENQUETE SUR LES CAPTEURS (avant et sans Nardò)
INQUIRE ON GAUGES (before and without Nardò)

1. Equipe: / Team : No 5

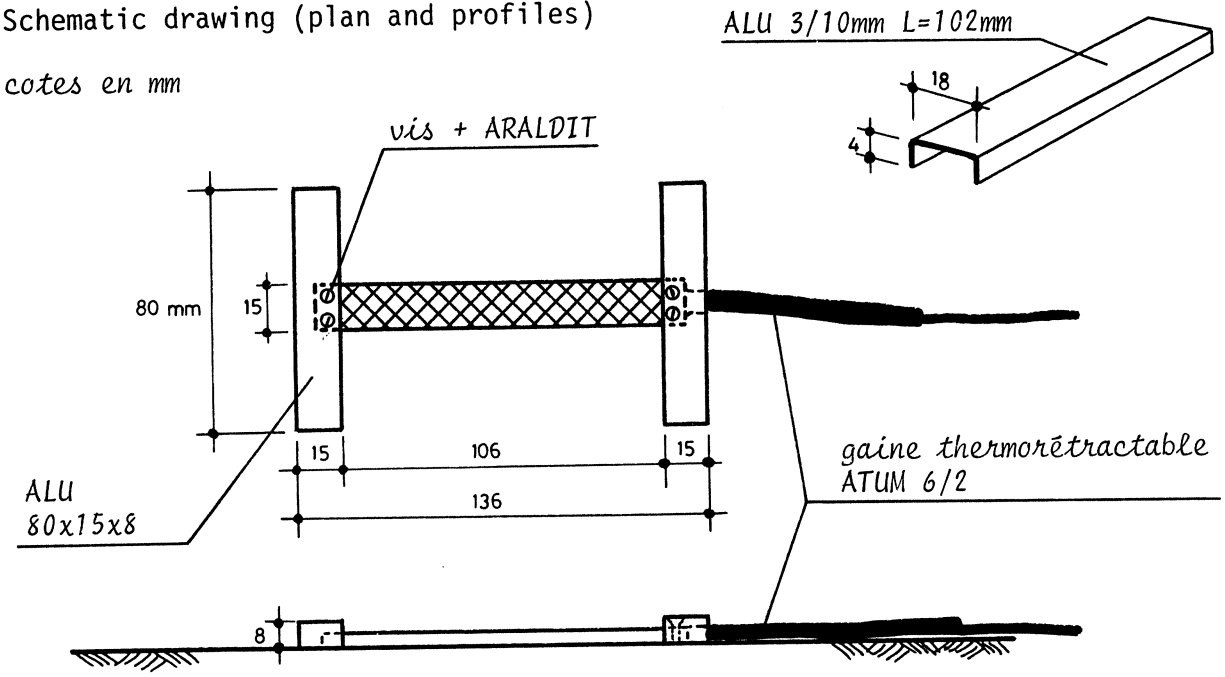
2. Type de capteur: / Type of gauge : KYOWA KM-120-H2-11 L100-3 (jauge de déformation dans protection de résine, module = 28 000 kg/cm^2 R = 120 ohm ± 1%)

3. Fabricant : / Manufacture: KYOWA JAPON

   Fournisseur: / Supplier : TRACO ELECTRONIC AG - 8002 ZURICH

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes)
   Schematic drawing (plan and profiles)

   cotes en mm



5. Utilisation (nombre, années, pertes): / Use (number, years, loss-rate): depuis 1980 80 pièces, 40% de perte

6. Coût (US $): / Cost (US $): 35 $

7. Précision (théorique): / Accuracy (theorical): inconnue

8. Câbles: / Cables specification: COLORFLEX CY 2x0,25 mm^2 + blindage

9. Commentaires: / Comments: ----------

ANNEXE C/8

ENQUETE SUR LES CAPTEURS (utilisés à Nardò)
INQUIRE ON GAUGES

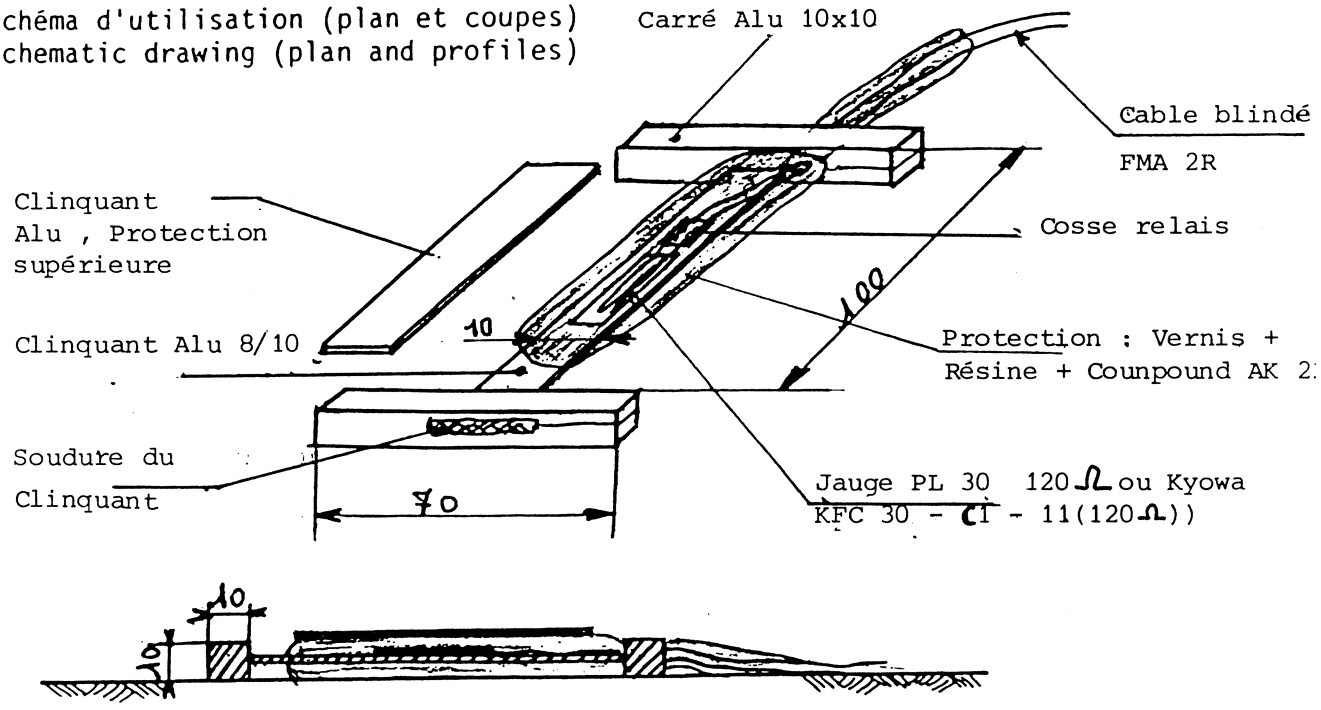
1. Equipe:
   Team : No 6

2. Type de capteur:
   Type of gauge :

3. Fabricant : L.C.P.C (Section Mécanique des Chaussées)
   Manufacture:

   Fournisseur:
   Supplier :

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes)
   Schematic drawing (plan and profiles)



5. Utilisation (nombre, années, pertes):
   Use (number, years, loss-rate):

6. Coût (US $): 200 F (23 $)
   Cost

7. Précision (théorique):
   Accuracy (theorical):

8. Câbles: FM 1R et FM 2R
   Cables specification:

9. Commentaires: Collage de la jauge délicat
   Comments:

ANNEXE C/9

ENQUETE SUR LES CAPTEURS (avant et sans Nardò)
INQUIRE ON GAUGES (before and without Nardò)

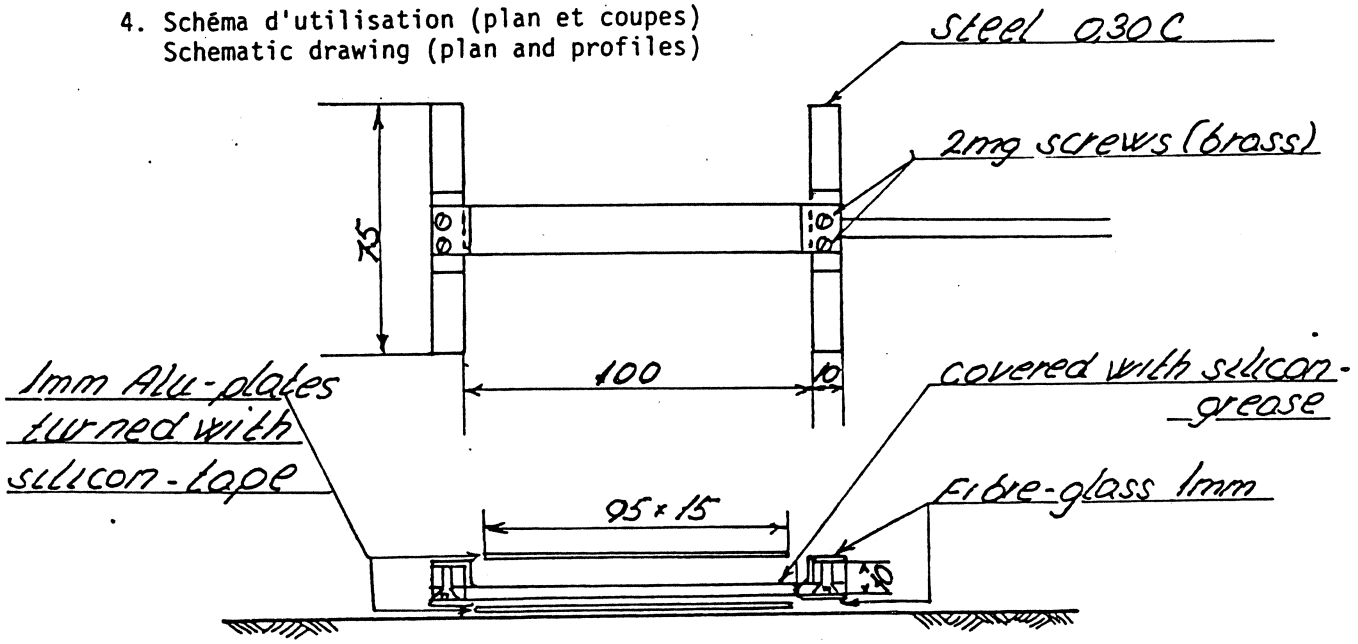
1. Equipe: / Team : No 7

2. Type de capteur: / Type of gauge : Kyowa KM-120-H2-11L 100-3

3. Fabricant : / Manufacture: Kyowa Japan

   Fournisseur: / Supplier : Instrutek 8700 DK

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes) / Schematic drawing (plan and profiles)



5. Utilisation (nombre, années, pertes): / Use (number, years, loss-rate): 150 p. 1972

6. Coût (US $): / Cost (US $): 75 $

7. Précision (théorique): / Accuracy (theorical): EM: 28000 kp/cm²

8. Câbles: R : 120 Ω ± 1% / Cables specification: Tygadure PTFE-wire 4 x 0,1mm² (2 x 0,2mm²) nr CD 3463/1616.

9. Commentaires: / Comments: – Loss-rate unknown, similar models have been made.

ANNEXE C/10

ENQUETE SUR LES CAPTEURS (avant et sans Nardô)
INQUIRE ON GAUGES (before and without Nardô)

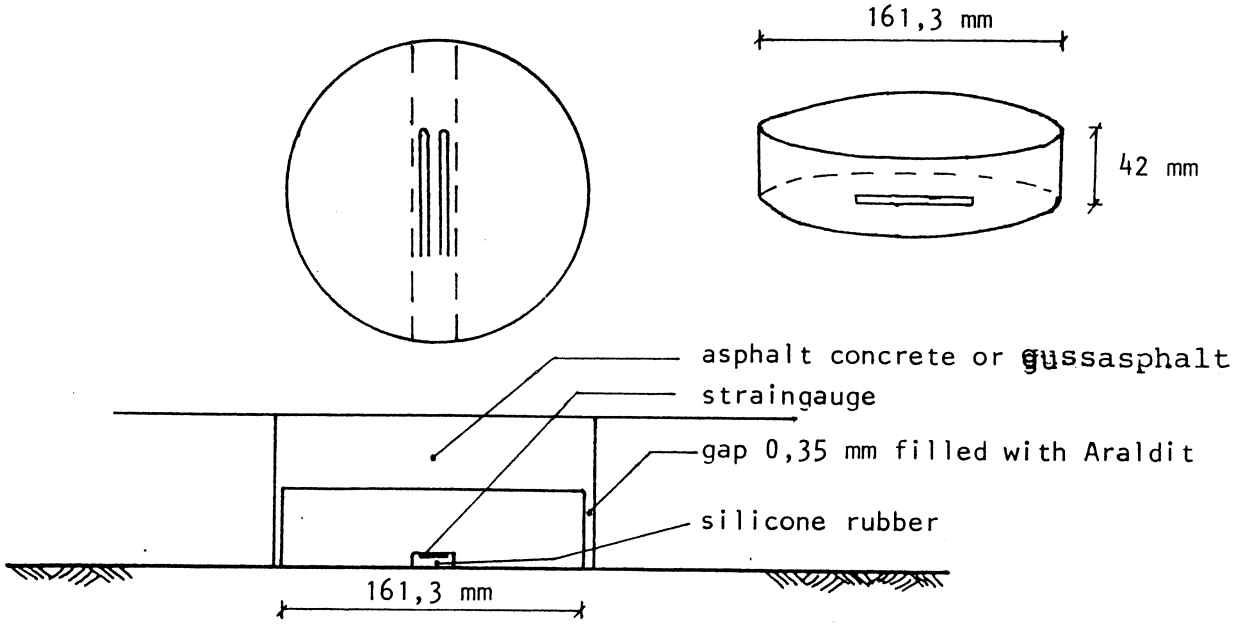
1. Equipe:
   Team : No 8

2. Type de capteur: in-cores-placement
   Type of gauge : FAE 2-300-35 PL (dual gauge)
   active length 76 mm, R= 350 ohm

3. Fabricant : BLH-Electronics, USA
   Manufacture:

   Fournisseur: Suomen Bofors Oy, Helsinki
   Supplier :

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes)
   Schematic drawing (plan and profiles)



5. Utilisation (nombre, années, pertes):
   Use (number, years, loss-rate): depuis 1983, 6 pieces, 0% de perte

6. Coût (US $): 35 $
   Cost

7. Précision (théorique): inconnue
   Accuracy (theorical):

8. Câbles:
   Cables specification: NOKIA KJMS 4x0,5 mm^2

9. Commentaires:
   Comments:

ANNEXE C/11

ENQUETE SUR LES CAPTEURS (avant et sans Nardò)
INQUIRE ON GAUGES (before and without Nardò)

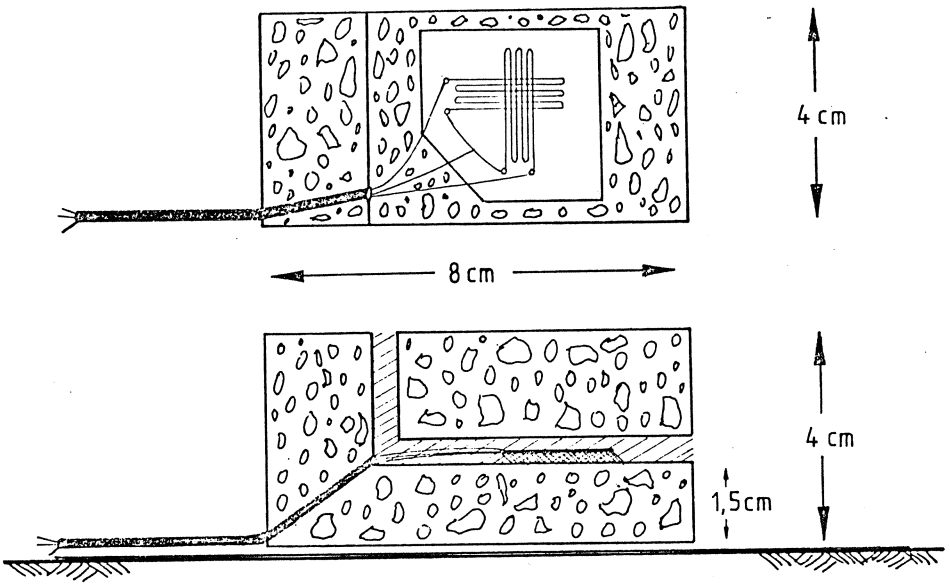
1. Equipe:
   Team : No 9

2. Type de capteur:
   Type of gauge : Strain gauge within a block of asphalt concrete

3. Fabricant :
   Manufacture: Strain gauge HBM Typ 20/600 XA21

   Fournisseur:
   Supplier : Preparation of complete gauge: BASt

4. Schéma d'utilisation (plan et coupes)
   Schematic drawing (plan and profiles)



5. Utilisation (nombre, années, pertes):
   Use (number, years, loss-rate): ca. 200, 20, ca. 25 %

6. Coût (US $):
   Cost ca. 10

7. Précision (théorique):
   Accuracy (theorical): un known

8. Câbles:
   Cables specification: Teflon insulated cable, 2 wires + screen

9. Commentaires:
   Comments: Principle of methode adopted from SHELL

ANNEXE D

Liste des participants — List of the participants

PROGRAMME COMMUN DE MESURES

COMMON PROGRAM OF MEASUREMENTS

Nardo

Equipe Team	Nom Name	Institut
ALLEMAGNE GERMANY	BUSECK H. RUND H. DOMMERMUTH F.J.	Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST) Bergisch-Gladbach
AUSTRALIE AUSTRALIA	SHARP K. MAVIN K.C.	Australian Road Research Board (ARRB), Nunawading
CANADA CANADA	CHRISTISON J.T. CHASE L.M.	Alberta Research Council Edmonton
DENEMARK DENMARK	ULLIDTZ Per SJOLIN Finn.Ole GREGERSEN Vagn	Institut for Veje, Trafik og Byplan (DTH) Lyngby
FINLANDE FINLAND	HUHTALA Matti KOKKONEN Matti	Technical Research Center Road and traffic laboratory, Espoo
FRANCE FRANCE	KERZREHO J.-Pierre NERFIE J.-Paul	Laboratoire central des ponts et chaussées, Bouguenais
ITALIE ITALY	BATTIATO Gianfr. ANTENOZIO Paolo MINORA Carlo	RO. DE. CO. s.a.s., Voghera Autostrade SpA, Roma Autostrade SpA, Roma
SUISSE/Zürich SWITZERLAND	JACOT Alain BURGSTALLER Jakob	Institut für Strassen- Eisenbahn- und Felsbau (ISETH), Swiss Federal Institut of Technology, Zürich
SUISSE/Lausanne SWITZERLAND	DUMONT André-G. HEFTI Jean-Jacques	Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), Ecole polytechnique fédérale, Lausanne

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE

Président : Monsieur W. KNOBEL, Suisse

ALLEMAGNE	Dr. H. BUSECK Bundesanstalt für Strassenwesen Brüderstrasse 53 Postfach 10 01 50 D-5060 BERGISCH GLADBACH 1
AUSTRALIE	Dr. J. METCALF Deputy Director Australian Road Research Board (ARRB) P.O. Box 156 (Bag 4) NUNAWADING, Victoria 3131
BELGIQUE	M. J. VERSTRAETEN Directeur adjoint au Centre de Recherches routières Chef de la Division "Recherches" Bd de la Woluwe 42 B-1200 BRUXELLES
CANADA	Mr. W. CULLEY † Mr. J. SCOTT Saskatchewan Highways and Transportation 1610 Park Street REGINA, Saskatchewan, S4P 3V7
	Dr. T. CHRISTISSON Alberta Research Council Terrace Plazza Office Tower 4445 Calgary Trail South EDMONTON, Alberta, T6H 5R7
DANEMARK	Mr. P. ULLIDTZ Denmarks tekniske Hojskole (The Technical University of Denmark) Building No 115 DK-2800 LINGBY

ETATS-UNIS	Mr. R.A. Mc COMB Mr. C. SCHEFFEY Federal Highway Administration Turner-Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike McLEAN, Virginia 22101
FINLANDE	Mr. HUHTALA, M.Sc. (Civ. eng.) Technical Research Center Road and Traffic Laboratory Lämpömiehenkuja 2 A SF-02150 ESPOO 15
FRANCE	M. P. AUTRET M. A. de BOISSOUDY Laboratoire Central des Ponts et Chaussées B.P. 19340 F-44340 BOUGUENAIS
ITALIE	M. G. CAMOMILLA M. M. MALGARINI AUTOSTRADE s.p.a Via A. Bergamini 50 I-00159 ROME M. G. BATTIATO RO.DE.CO. s.a.s. Via Flli Rosselli 30 I-27058 VOGHERA/PV
JAPON	Mr. D. FUJITA, Director of Road Department Mr. T. IIJIMA, Head, Pavement Division Public Works Research Institute Asahi 1-banchi, Toyosato-machi TSUKUBA-GUN, IBARAKI-KEN 305
ROYAUME UNI	Mr. R.R. ADDIS Pavement Design & Maintenance Divison Transport & Road Research Laboratory Old Wokingham Road CROWTHORNE, Berks. RG11 6AU
SUISSE	M. W. KNOBEL Office fédéral des routes (OFR) Monbijoustrasse 40 CH-3003 BERNE M. I. SCAZZIGA Ecole polytechnique fédérale de Zürich IVT/ETH-Hönggerberg CH-8093 ZURICH

M. A.G. DUMONT
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
LAVOC/EPFL
CH-1015 LAUSANNE

OCDE

M. B. HORN

Les rapporteurs des travaux du sous-groupe furent : MM. Addis, Battiato, Buseck, Dumont, Jacot, Scazziga, Ullidtz et Verstraeten.

Les membres du comité de rédaction furent : MM. Dumont, Scazziga.