

Copie Pour Wisner

COLLOQUE DE BIOMECHANIQUE - LILLE 22 MARS 1972

====

QUELQUES PERSPECTIVES NOUVELLES
DANS L'ETUDE BIOMECHANIQUE DES VIBRATIONS

PAR A. BERTHOZ

====

L'étude biomécanique des vibrations a pour premier objet de décrire les transformations que subissent les vibrations mécaniques solides lorsqu'elles se propagent à travers le corps humain. La découverte de nouveaux signes cliniques de la pathologie vibratoire (troubles vasculaires de l'oeil, syndromes vestibulaires ...), mais aussi le développement de méthodes thérapeutiques ou de prothèses basées sur l'application des vibrations, exigent que soient poursuivies des recherches spécifiquement biomécaniques.

Les progrès récents des méthodes expérimentales et les changements des modèles représentatifs indiquent des directions à prendre. Mais la biomécanique des vibrations doit aussi se préoccuper de développer les connaissances sur les mécanorécepteurs physiologiques, sur le contrôle neuromusculaire de ces récepteurs, et de façon plus générale, sur les mécanismes biologiques qui sous tendent les propriétés biomécaniques des tissus et des os du corps humain.

Méthodes et modèles

Depuis quelques années, des techniques basées sur le couplage électromagnétique permettent d'appliquer directement en divers parties du corps, des forces variables et contrôlables. Les méthodes d'exploration de laboratoire qui en sont issues, complètent ou remplacent les traditionnelles tables vibrantes. L'analyse des systèmes linéaires et la présentation des courbes de réponse sous forme de diagrammes de BODE contribue à rapprocher l'évaluation

des systèmes biomécaniques de celle des systèmes mécaniques classiques. Dans les mesures sur le terrain, l'usage de l'algorithme de COOLEY-TUKEY permet l'analyse de FOURIER sur calculateur digitaux de faible capacité. Ceci rend accessible des mesures comme la densité spectrale croisée pour l'évaluation simultanée des bruits et des vibrations et la détection des sources vibratoires qui sont à l'origine des bruits. En même temps on assiste à un développement de l'étude des non-linéarités qui, dans bien des cas, caractérisent la réponse biomécanique aux vibrations.

Des méthodes d'investigation basées sur les variables d'état ont aussi été proposées.

Biomécanique des mécanorécepteurs

Des progrès sensibles ont été réalisés dans la connaissance des mécanorécepteurs du corps humain : la modélisation des propriétés des récepteurs labyrinthiques, des fuseaux neuromusculaires, des récepteurs tactiles visceux ne peut être dissociée de l'étude des vibrations. Ces investigations rejoignent en réalité sur de multiples points les travaux plus généraux sur la biomécanique du mouvement. Ce sont d'ailleurs des stimulations vibratoires qui sont employées maintenant couramment pour étudier ces récepteurs.

Mécanismes de contrôle centraux

Il semble difficile d'envisager une étude biomécanique des vibrations sans tenir compte du contrôle central qui s'exerce sur les muscles et les récepteurs. Par exemple le reflexe tonique vibratoire (R.T.V.) obtenu par vibration à 100-200 Hz appliquée au tendon d'un muscle modifie par voie réflexe la raideur de la musculature squelettique. Or l'efficacité de cette variation de raideur est fortement sous contrôle central. On tentera d'éclairer ce point sur des exemples empruntés aux effets des vibrations sur le maintien de la tête, les propriétés des réflexes segmentaires, et le problème du mouvement des viscères.

Ainsi la biomécanique des vibrations doit dégager une méthodologie originale, différente de celle de la mécanique, et qui tient compte du caractère activement autoréglables des systèmes biologiques.

LIVRES/366/BERTHOZ

Gabriel Horn et Robert A. Hinde,
**Short-term Changes in Neural
Activity and Behaviour**,
628 pages, £ 10.40,
Cambridge University Press, 1970.

Ce volume contient les textes présentés lors d'un congrès qui s'est tenu à Cambridge (G.B.). Le thème choisi était celui des « changements qui se produisent dans le comportement et donc dans le fonctionnement du système nerveux et les rapports qui existent entre les aspects neurophysiologiques et les modalités du comportement ». Le problème ainsi posé laisse le lecteur dans l'incertitude étant donné la confusion à laquelle prête le mot de « changement ». Mais il est rapidement précisé qu'en réalité le congrès s'est donné pour sujet principal « l'habituation » analysée à des niveaux de complexité divers : comportemental, neuronique, subcellulaire, et moléculaire. Par habituation, l'on entend le fait que la probabilité d'observer une réponse à une stimulation diminue avec la répétition de la stimulation. C'est ainsi que, dans la première section, R. Hinde définit l'habituation comportementale et le retour aux conditions initiales ou déshabituation. Cette tentative de méthodologie générale est basée sur des concepts assez mécanistes de « vitesse » et de « décrétement » et les exemples sont tirés d'expériences faites essentiellement sur l'animal. Puis, J.W. Kling et J.G. Stevenson précisent la différence entre habituation et extinction, cette dernière étant la diminution de la réponse lorsque celle-ci correspond à un conditionnement de type pavlovien ; les auteurs préfèrent ne donner aucune réponse définitive sur l'éventualité de mécanismes communs à ces deux phénomènes. Enfin cette section de généralités se termine par une analyse critique de la notion de « mémoire immédiate ». L. Weiskrantz conteste une validité particulière à la dénomination d'immédiat, mais ne s'aventure pas réellement dans une comparaison entre la disparition des informations retenues par la mémoire et l'habituation.

La deuxième section du volume est consacrée à des revues de questions sur l'habituation dans les circuits neuroniques chez l'animal. Le problème posé est de savoir si l'on trouve au niveau cellulaire des mécanismes semblables à ceux décrits pour tout l'organisme. J.P. Segundo et C.C. Bell, puis O. Vinogradova répondent de façon affirmative pour les neurones du cerveau des vertébrés. J.P. Griffin et P.D. Wall analysent des données cellulaires obtenues dans la moelle. Chez les invertébrés C.A.G. Wiersma décrit des changements de réactivité chez les systèmes neuroniques des crustacés et C.H.F. Rowell des processus incrémentiels et décrétementiels chez l'insecte. Enfin E.R. Kendell et collaborateurs rendent compte de mécanismes de ce qu'ils nomment « plas-

LIVRES/348/BERTHOZ

Ragnar Granit,
The Basis of Motor Control,
346 pages, 14.50 Shillings,
Academic Press.

Le sous-titre de ce livre est : « L'intégration de l'activité des muscles, les motoneurones alpha et gamma et leurs principaux systèmes de contrôle ». Il s'agit d'un résumé de résultats récents, obtenus surtout sur le chat et le singe, concernant la neurophysiologie de la motricité. Les huit premiers chapitres sont consacrés à la triade (1) muscle, (2) récepteurs cutanés, musculaires, tendineux et articulaires, (3) motoneurones alpha et gamma ; puis deux chapitres résument très rapidement des données concernant le cortex sensorimoteur, le tronc cérébral, la moelle et le cervelet ; enfin un chapitre s'attarde un peu sur les problèmes particuliers du mouvement des yeux et de la marche. En somme une place prépondérante est accordée aux organes d'exécution du mouvement et aux récepteurs qui transmettent l'information sur les grandeurs mécaniques mises en jeu. On y trouve un résumé très précis des recherches effectuées dans les vingt dernières années à ce sujet. La pondération des résultats correspond, malgré tout, surtout aux recherches personnelles de l'auteur, prix Nobel, qui exprime lui-même son désir de rassembler en ce petit livre les résultats dont il a été soit un des participants, soit un des initiateurs.

Les propriétés mécaniques de la fibre musculaire sont réexaminées avec soin à la lumière des données récentes sur la dualité entre fibres « lentes » et fibres « rapides », à laquelle correspond la distinction entre motoneurones « phasiques » et motoneurones « toniques ». Sur chaque point, mention est faite des articles de synthèse, ce qui fait de cet ouvrage un précieux outil pour le chercheur.

Granit, Eldred et Merton (1953) ont été à l'origine d'une théorie selon laquelle le contrôle de l'activité musculaire au cours d'un mouvement pourrait se faire à travers la « boucle gamma », c'est-à-dire qu'il y aurait activation par les centres moteurs supérieurs des motoneurones gamma qui activeraient les récepteurs musculaires lesquels à leur tour pourraient, par voie réflexe, entraîner la contraction du muscle. R. Granit examine dans le plus grand détail, l'ensemble des résultats obtenus sur les propriétés des mécanorécepteurs et des motoneurones pour dégager dans quelle mesure l'hypothèse ci-dessus a été vérifiée. Sans revenir véritablement sur la formulation de l'hypothèse, l'auteur insiste finalement plus sur le concept de *coactivation* alpha-gamma que sur l'idée d'une

ticité» chez l'aphysie; de même que J. Bruner et J. Kehoe qui utilisent à la fois l'enregistrement intracellulaire et l'observation du comportement chez l'aphysie, ils concluent que l'habituation n'est pas le résultat d'un simple mécanisme d'inhibition qui serait inclus dans les circuits de neuroniques.

La troisième et dernière section du livre est intitulée : « Les bases neuroniques des changements plastiques autres que l'habituation ». Le mot de « plasticité », en dépit de son emploi par tous les participants, n'est nulle part correctement défini. On trouve ici mêlées plusieurs approches au problème des modifications des propriétés neuroniques au cours de l'activité ou de l'inaction. Chaque auteur a fait un effort, qui sera apprécié par les lecteurs non spécialisés, pour résumer les travaux effectués dans son domaine propre d'investigation. J. Bures, et D. Buresova présentent des données sur le conditionnement des neurones dans le cerveau des mammifères et P.L. Miller chez l'insecte; c'est O.C.J. Lippold qui résume les résultats obtenus sur le cortex par polarisation corticale ou stimulation sensorielle. Un résultat qui surprendra certains est donné par W.A. Spencer et R.S. April qui montrent que l'inactivité peut engendrer un accroissement de l'efficacité synaptique. Enfin, l'aspect neurochimique de ces phénomènes est abordé, peut-être trop brièvement, par les rapports de S. Griffith, S.P.R. Rose, et P.P.G. Bateson.

En somme un livre assez hétérogène qui rassemble des données préliminaires, et qui, malgré le ton déçu de l'épilogue de G. Horn, fournit un document de travail pour ce champ assez nouveau de l'investigation neurophysiologique.

rante de la voie gamma. Il est encore une fois fait une assez grande distinction entre mouvements rapides volontaires et contraction tonique. La réponse musculaire à des vibrations de hautes fréquences (100 à 200 Hz) est largement décrite, parce que le « réflexe tonique vibratoire », attribué à l'activation des fibres issues des terminaisons primaires des récepteurs musculaires, est considéré par l'auteur comme un important outil d'investigation neurophysiologique et clinique chez l'animal et chez l'homme.

De ce livre qui mériterait une traduction française afin d'être mis à la portée d'un grand nombre d'étudiants, de cliniciens et chercheurs, on peut regretter peut-être la faible part attribuée aux deux avant-derniers chapitres intitulés « Le cortex sensorimoteur » et « Le tronc cérébral, la moelle et le cervelet ». Bien qu'ils contiennent, remarquablement résumés, les concepts les plus nouveaux sur le contrôle supraspinal de la motricité, on n'y trouve pratiquement pas de mention des importants travaux concernant par exemple la physiologie vestibulo-spinale; la grande compétence de l'auteur aurait justifié un éclairage plus complet de ce problème. Encore une fois, il faut attribuer sans doute cela au désir de rester dans le champ de ses investigations personnelles qu'a eu R. Granit, qui est d'ailleurs déjà l'auteur d'un ouvrage plus général sur les capteurs sensoriels⁽¹⁾.

(1) R. Granit, 1955, *Receptors and sensory perception*, New Haven : Yale Univ. Press, 366 pp.

TITRE

Date

WISNER

BERTHOZ

DUTHEIL

FORET

JARRIAULT

LANTIN

LAVILLE

MARCELIN

ROSTOLLAND

SEVIN

TEIGER

Reçu le :

Short term changes in Neural Activity and Behaviour

Gabriel HORN et Robert HINDE - Cambridge Univ. Press 1970

Ce volume contient les textes présentés lors d'un Congrès qui s'est tenu à Cambridge (G.B.). Le thème choisi était celui des "changements qui se produisent dans le comportement et donc, dans le fonctionnement du système nerveux et les rapports qui existent entre les aspects neurophysiologiques et les modalités du comportement". Le problème ainsi posé laisse le lecteur dans l'incertitude étant donné la confusion à laquelle prête le mot de "changement". Mais il est rapidement précisé qu'en réalité le Congrès s'est donné pour sujet principal "l'habituation" analysée à des niveaux de complexité divers : comportemental, neuronique, subcellulaire, et moléculaire. Par habituation, l'on entend le fait que la probabilité d'observer une réponse à une stimulation diminue avec la répétition de la stimulation. C'est ainsi que, dans la première section R. HINDE définit l'habituation comportementale et le retour aux conditions initiales ou déshabituation. Cette tentative de méthodologie générale est basée sur des concepts assez mécanistes de "vitesse" et de "décrément" et les exemples sont tirés d'expériences faites essentiellement sur l'animal.

Puis, J.W. KLING et J.G. STEVENSON précisent la différence entre habituation et extinction cette dernière étant la diminution de la réponse lorsque celle-ci correspond à un conditionnement de type Pavlovien, les auteurs préfèrent ne donner aucune réponse définitive sur l'éventualité de mécanismes communs à ces deux phénomènes. Enfin cette section de généralités se termine par une analyse critique de la notion de "mémoire immédiate". L. WEISKRANTZ conteste une validité particulière à la dénomination d'immédiat mais ne s'aventure pas réellement dans une comparaison entre la disparition des informations retenues par la mémoire et l'habituation.

La deuxième section du volume est consacrée à des revues de questions sur l'habituation dans les circuits neuroniques chez l'animal. Le problème posé est de savoir si l'on trouve au niveau cellulaire des mécanismes semblables à ceux décrits pour tout l'organisme. J.P. SEGUNDO et C.C. BELL puis O. VINOGRADOVA répondent de façon affirmative pour les neurones du cerveau des vertèbres. J.P. GRIFFIN et P.D. WALL analysent des données cellulaires obtenues dans la moëlle. Chez les invertébrés C.A.G. WIERSMA décrit des changements de réactivité chez les systèmes neuroniques des crustacés et C.H.F. ROWELL des processus incrémentiels et décrémentiels chez l'insecte. Enfin E.R. KANDELL et coll. rendent compte

de mécanismes de ce qu'ils nomment "plasticité" chez l'aphysie de même que, J. BRUNER et J. KEHOE qui utilisent, comme les précédents, à la fois l'enregistrement intracellulaire et l'observation du comportement chez l'aphysie concluent que l'habituation n'est pas le résultat d'un simple mécanisme d'inhibition à décrire et qui serait inclus dans les circuits de neuroniques.

La troisième et dernière section du livre est intitulée : "Les bases neuroniques des changements plastiques autres que l'habituation". Ce n'est pas la première fois que le mot de "plasticité" est utilisé, mais en dépit de son emploi par tous les participants, il n'est nulle part correctement défini. On trouve ici mêlées plusieurs approches au problème des modifications des propriétés neuroniques au cours de l'activité ou de l'inaction. Chaque auteur a fait un effort, qui sera apprécié par les lecteurs non spécialisés, pour résumer les travaux effectués dans son domaine propre d'investigation. J. BURES et D. BURESOVA présentent des données sur le conditionnement des neurones dans le cerveau des mammifères et P.L. MILLER chez l'insecte, et c'est O.C.J. LIPPOLD qui résume les résultats obtenus sur le cortex par polarisation corticale ou stimulation sensorielle. Un résultat qui surprendra certains est donné par W.A. SPENCER et R.S. APRIL qui montrent que l'inactivité peut engendrer un accroissement de l'efficacité synaptique. Enfin, l'aspect neuro^{lim}clinique de ces phénomènes est abordé, peut être trop brièvement, par les rapports de S. GRIFFITH, S.P.R. ROSE et P.P.G. BATESON.

En somme un livre assez hétérogène qui rassemble des données préliminaires, *de qui* mais, malgré le ton assez déçu de l'épilogue de G. HORN, qui établit un document de travail pour ce champ assez nouveau de l'investigation neurophysiologique.

A. Jerthoz

Do not fold this sheet.
Use cardboard back-
ing when mailing.

Mail to: SECRETARIAT
XXV International Congress of Physiological Sciences
Theresienhoehe 15, 8000 Munich 2, German Fed. Rep.

ABSTRACT OF VOLUNTEER PAPER

Type Abstract here - Use English, if possible

FREQUENCY ANALYSIS OF VESTIBULAR INFLUENCE ON NECK AND FORELIMB EXTENSOR MOTONEURONES IN THE CAT. A. Berthoz, J. Anderson, T.A. Mc Kean. Lab. of Neurophysiology, Univ. of Minnesota, Minneapolis, Minn. 55455 U.S.A.

Decerebrate cats with spinal transection at T 12 level were subjected to whole body, sinusoidal or triangular, low frequency (.1 to 2 Hz) rotations, around longitudinal (X), transverse (Y) and vertical (Z) axis, at peak to peak velocities ranging from 10 to 100°/sec. Single, or groups of motor unit activity was recorded by EMG of neck extensor and triceps muscle. A Modulation of Motor Unit Frequency (MMUF) was observed during rotation, it was shown to be of vestibular origin. For MMUF related linearly to stimulation, the gain and phase between applied sinusoidal oscillation velocity and output MMUF was computed by Fourier analysis on a IBM 1800 computer. During X axis rotation, the gain drops by about 10 dB from .1 Hz to 1 Hz for constant velocity input. The phase is constant over the frequency range studied and is slightly lagging (30°) velocity of input oscillations. A striking phase shift was observed following hemilateral labyrinthectomy: the contralateral triceps MMUF was then lagging acceleration of input oscillation by about 30° (90° phase advance). In both normal and hemilabyrinthectomised cats motoneurone activity of neck extensors was in phase with the contralateral triceps. MMUF was also measured during Y and Z axis rotation. This study shows how, within physiological range, overall vestibular dynamic control on neck and limb extensors is related to velocity of movement.

Your abstract will be PHOTOGRAPHED and will appear in Congress publications EXACTLY as typed in the box outlined above. Read instructions CAREFULLY before typing abstract. See reverse side for sample abstract and typing instructions.

Please classify your abstract according to the classification list on the reverse side of Form A. Insert in the spaces provided here the numbers corresponding to the 2 areas to which your abstract is most closely related.

Projection Requirements

If your paper is scheduled for presentation, what will your projection requirements be?

- Slide Projectors: 2"x2" (35 mm)
- 3 1/4"x4" (82x102 mm)
- Other

EACH REGISTERED MEMBER MAY SUBMIT ONLY ONE ABSTRACT.

1.)

1	4	3	0
---	---	---	---

2.)

1	3	3	0
---	---	---	---

Name of author (must be a registered member) who will deliver the paper:

English presentation

A. BERTHOZ
(Please print)

ABSTRACT REPRINT ORDER FORM

Remittance must be included in total amount of payment on Form A.

Please send me 100 (DM 40,-) 200 (DM 80,-) 300 (DM 120,-) copies of the above abstract, reprinted from the Abstracts Volume.

Name A. BERTHOZ
(Please print)

Mailing address Laboratoire de Physiologie du Travail - 41 rue Gay-Lussac - Paris 5ème (France)



Deadline for Receipt of Abstract: January 15, 1971

Do not fold this sheet.
Use cardboard back-
ing when mailing.

Mail to: SECRETARIAT

XXV International Congress of Physiological Sciences
Theresienhoehe 15, 8000 Munich 2, German Fed. Rep.

ABSTRACT OF VOLUNTEER PAPER

Type Abstract here – Use English, if possible

SLOW AND FAST PHASE NYSTAGMUS OF VESTIBULAR ORIGIN AS STUDIED BY INTRACELLULAR RECORDINGS IN TROCHLEAR MOTONEURONS. R. Baker and A. Berthoz. Div. Neurobiol., Dept. Physiology & Biophysics, Univ. of Iowa, Iowa City 52240, U.S.A., and Laboratoire de Physiologie du Travail du C.N.R.S., Paris 5, FRANCE.

In encéphale isolé cats, acute lesion of the vestibular nerve produces spontaneous nystagmus with the slow component directed toward the lesioned side. Intracellular recordings from trochlear motoneurons (TMn's) show slowly rising depolarizations (slow phase) interrupted by abrupt hyperpolarizations (fast phase) occurring with a period of about 400 msec. A totally different nystagmic mechanism is elicited by a brief electrical stimulation of the labyrinth on the lesioned side. In this case, a succession of sudden intense membrane depolarizations are recorded in TMn's. Each burst has a duration less than 100 msec (fast phase) and is followed by gradual membrane hyperpolarization (slow phase). The frequency and duration of the nystagmic bursts could be driven by labyrinth stimulation. The injection of polarizing current and ions from the microelectrode demonstrates both depolarizations to be EPSPs. Active nystagmic modulation of the TMn, during the slow and fast phase, is thereby generated from two characteristic patterns of EPSPs in the TMn, each terminated mainly by a disfacilitation and in some cases combined with an added IPSP component. It is concluded that nystagmus is not produced at the level of the trochlear nucleus, but represents motoneuronal recruitment by an intermittent and highly synchronous presynaptic barrage whose origin resides in the vestibular complex of the brain stem.

Your abstract will be PHOTOGRAPHED and will appear in Congress publications EXACTLY as typed in the box outlined above. Read instructions CAREFULLY before typing abstract. See reverse side for sample abstract and typing instructions.

EACH REGISTERED MEMBER MAY SUBMIT ONLY ONE ABSTRACT.

Name of author (must be a registered member) who will deliver the paper:

R. Baker

(Please print)

Please classify your abstract according to the classification list on the reverse side of Form A. Insert in the spaces provided here the numbers corresponding to the 2 areas to which your abstract is most closely related.

1.) 1 3 4 0

2.) 1 4 3 0

Projection Requirements

If your paper is scheduled for presentation, what will your projection requirements be?

- Slide Projectors: 2"x2" (35 mm)
 3 1/4"x4" (82x102 mm)
 Other

English
Language of presentation

ABSTRACT REPRINT ORDER FORM

Remittance must be included in total amount of payment on Form A.

Please send me 100 (DM 40,-) 200 (DM 80,-) 300 (DM 120,-) copies of the above abstract, reprinted from the Abstracts Volume.

Name
(Please print)

Mailing address

Voyage à FRANCFORT 23 - 24 Octobre 1970

Le but du voyage était la visite du département de Neurophysiologie de l'Institut de recherche sur le cerveau, dirigé par le Professeur HASSLER. Le Docteur W. FRECHT qui n'a regu, de retour des Etats Unis, y installe deux laboratoires. L'un pour l'enregistrement intracellulaire où vont être étudiés des problèmes liés à l'organisation du mouvement des yeux et aux rapports entre les structures mésencéphaliques et corticales avec le système vestibulo-cerebello-oculomoteur. Une recherche sur la Substance Nigra et les noyaux de la base est aussi inscrite au programme de recherche. L'autre laboratoire comportera une table oscillante qui permettra d'appliquer des stimulations vestibulaires naturelles et d'étudier par enregistrement extracellulaire les réponses évoquées en diverses parties du tronc cérébral.

Ce département contient aussi d'autres groupes de recherche qui étudient notamment les réponses du système nerveux central à des étirements mécaniques divers, et des problèmes d'apprentissage moteur chez le singe (par la méthode des lésions chroniques).

Le Docteur FRECHT avec qui j'ai travaillé aux U.S.A. est d'accord pour que nous entretenions des rapports suivis et éventuellement, collaborions sur certaines recherches

! - Je lui ai suggéré un projet de recherche sur le sacculis qu'il juge intéressant. Il m'a conseillé de le lier à l'étude du contrôle efférent. Des travaux récents non publiés semblent montrer en effet que lors d'un nystagmus opto-cinétique il se produit une modulation de l'activité efférente. Si cela peut être confirmé sur des mammifères on obtient une description extrêmement différente de celle que l'on imaginerait des rapports entre position dans l'espace et activité labyrinthique.

Le mécanisme du contrôle efférent serait alors le suivant : Un signal visuel en mouvement serait suivi par l'œil jusqu'à un certain point, à partir de ce point la tête doit alors se mettre en mouvement, mais ce mouvement entraîne d'habitude un mouvement compensatoire de l'œil qui serait dans ce cas inhibé par un contrôle efférent. On aurait donc, et ceci ne sont encore que des suppositions, un contrôle direct à la source même des commandes vestibulaires, par le système visuel.

2 - Nous avons discuté sur le problème de la fatigue, où au moins de l'endormissement léger provoqué par des oscillations de très basse fréquence chez l'homme dans les moyens de transport. Le Docteur PREGIER n'a pas considéré nos hypothèses à ce sujet comme hors de la réalité physiologique.

3 - A propos de la recherche que nous avons faite aux U.S.A. sur le chat, il semble qu'il y ait en effet des résultats récents qui suggèrent que le labyrinthe est susceptible de donner des réponses avec des constantes de temps beaucoup plus courtes qu'on ne l'a cru jusqu'à présent. En particulier lorsqu'il y a hémilabyrinthectomie, les constantes de temps enregistrées centralement sont assez courtes.

4 - A l'issue de cette courte visite et étant donné le rapport entre nos préoccupations et celles du Docteur PREGIER, je propose que nous l'invitions à venir faire à la fin du mois de Novembre ou au début de Janvier, une visite avec conférence au laboratoire.

aanw. 0110 (2)

Compte rendu de visite aux Usines

Sidérurgiques de HAYANGE et MOYEVRE

Médecins du Travail :

- | | |
|---------------------|--|
| - Docteur RANIZETTE | MOYEVRE - HAYANGE |
| - Docteur KREMER | Hauts Fourneaux de HAYANGE |
| - Docteur VILLE | Acierie et laminoirs de FENDERIE (HAYANGE) |

Directeur du groupe Hauts Fourneaux de HAYANGE :

- Monsieur STEINES

Directeur de l'Usine de FENDERIE :

- Monsieur BAY

Monsieur BAY empêché, a délégué Monsieur VILLERE - ingénieur en chef pour nous recevoir.

Laboratoire de Physiologie :

- BERTHOZ - TISSERAND.

Situation économique

Unités anciennes condamnées par les groupes sidérurgiques du bord de mer
(DUNKERQUE - FOS)

Usine de Moyevre : quelques années de survie.

Usine de Hayange : 10 à 15 ans.

Historique : Essor avant 1.914 - Absence d'investissement entre les deux guerres. Modernisation après 1.945, mais encore beaucoup d'ensembles anciens.

Postes étudiés :

A - Usine des Hauts Fourneaux de Havange.

1) Chargement haut fourneau - 1er type :

Chargeuse autonome montée sur pneus. Trajet sur dalles de béton en bon état. Conducteur debout.

2) Chargement haut fourneau - 2ème type :

Chargeuse type LORRY montée sur rail, ayant pour fonction :

- Recevoir charbon et minéral des silos.
- Peser.
- Déverser sur la chaîne sans fin d'approvisionnement.

Problème de disposition des commandes sur la plate-forme de travail longue et étroite. Cette disposition, ainsi que les impératifs visuels interdisent la posture assise. Des vibrations de hautes fréquences et faibles amplitudes sont transmises par la plate-forme.

Temps de travail approximatif : 1 heure, puis 10 minutes de repos. Un deuxième ouvrier surveille l'ensemble des opérations. Les deux postes de travail sont permutés toutes les semaines.

3) Font roulant :

Le charbon et le minéral de fer (brut ou aggloméré) arrivent dans des wagons-trémies à déchargement instantané (parois amovibles). Les voies dominent les silos de stockage.

La répartition entre les giles et fosses de stockage est faite par un pont roulant monté avec godet.

Nous constatons : - des oscillations lors des déplacements dans le plan horizontal et des vibrations hautes fréquences provenant du moteur, pendant la remontée du godet chargé.

- Le sujet est assis, et le travail nécessite une vision verticale vers le bas.

- Les commandes sont dispersées et mal disposées, le siège rudimentaire. La durée de travail à ce poste varie de 2 à 7 heures.

L'ouvrier se plaint - de douleurs abdominales lors des séquences de travail prolongées.

- durant son apprentissage, de troubles d'origine vestibulaire, dus apparemment aux mouvements simultanés du pont et des wagons. Ce phénomène est peut-être important pour l'utilisation sporadique de pont-roulants par un personnel non spécialisé.

4) Salle des pompes.

L'air injecté dans les hauts fourneaux est comprimé par des moteurs-compresseurs linéaires ou par des groupes rotatifs modernes.

Le niveau sonore est important.

L'aspiration d'air par les compresseurs linéaires entraîne une gêne due aux infra-sons plus sensible à l'extérieur de la salle à proximité des orifices d'aspiration.

5) Locotracteur.

L'usine possède un parc de locotracteurs à moteurs diésel, avec ateliers d'entretien et réparation.

Le poste de conduite est composé de deux petites cabines latérales reliées par un passage étroit. Les commandes sont dispersées.

Le champ de vision des hublots frontaux (un pour chaque cabine) est extrêmement faible. Pratiquement la conduite nécessite de se pencher à l'extérieur par les hublots latéraux.

Lors de la marche, le conducteur se tient dans la cabine de gauche et fait de rapides incursions à droite pour surveiller la voie.

Il fait très chaud l'été dans ces cabines.

Les vibrations engendrées par le moteur sont modestes, elles pourraient toutefois être mieux filtrées. Par contre un parcours de quelques dizaines de mètres, à vitesse réduite, a montré que les accidents de la voie (joints, aiguillages etc ...) se traduisent par des chocs importants transmis par le plancher. L'adaptation dimensionnelle du sujet à la cabine est insuffisante.

CONCLUSION

Les postes étudiés se caractérisent par une combinaison de facteurs de l'environnement. Les vibrations ne sont jamais des nuisances dominantes majeurs, elles peuvent toutefois aggraver sensiblement la situation.

Il est à noter que le temps froid et très humide depuis plusieurs jours supprimait les poussières habituelles et diminuait la charge de température.

Les ouvriers diagnostiquent souvent des gênes importantes mais acceptent toujours leur charge avec philosophie et peut-être, résignation. Ne pas oublier que des reclassements très importants ont lieu actuellement du fait de l'arrêt des unités les moins récentes.

B - Usine de FENDERIE Acierie - Laminoirs

1 - Laminoir du train 2

Le déplacement du lingot métallique (mouvement alternatif) dans le laminoir est commandé d'une cabine disposée à une dizaine de mètres, sur la machinerie (moteurs, réducteurs etc ...).

Cabine

- Niveau sonore important.

- L'opérateur dispose d'un siège BAO - La position est instable. L'opérateur manœuvre des leviers dans un plan parallèle au train. Il regarde donc latéralement de façon constante (à 90° du plan sagittal). Un repose-pied rudimentaire (caisse en bois) assure un point d'appui. Le tapis de sol ne peut filtrer suffisamment les vibrations hautes fréquences de la machinerie. Ce poste va semble-t-il disparaître.

Laminoir

Niveau sonore important, en particulier au poste de commande de la projection de vapeur sur le lingot (bruit d'échappement).

2 - Salle des compresseurs.

Niveau de bruit moyenne fréquence important.

3 - Chargeuse de fours Martin.

Une batterie de fours disposés côte à côte est alimentée par l'intermédiaire de bennes de 1 à 2 m³ de capacité. Ces bennes sont véhiculées à l'extrémité d'un bras horizontal par une chargeuse sur rail. La géométrie et les fonctions de cet engin rappellent la pelleuse de travaux publics. Les rails sont parallèles aux fours, la partie supérieure de la chargeuse est mobile ce qui permet d'avancer et reculer vis à vis des fours. En outre, des mouvements rotatifs de la cabine et du bras dans le plan horizontal sont possibles, mais peu fréquents.

La cabine est construite sur un ensemble d'engrenages qui apparaissent du fait de l'absence de plancher sur la majeure partie de la surface. Le conducteur dispose d'un strapontin en bois fixé à la paroi arrière de la cabine. Le niveau de ce siège est relativement élevé. Le plancher est inexistant à l'emplacement des pieds. Deux repose-pieds sommaires ont été fixés par le personnel pour assurer un point d'appui.

Nous constatons de grosses trépidations, source de vibrations de hautes et basses fréquences. Lors du recul, des oscillations verticales dans la gamme 4 à 6 Hz excitent les résonances des masses corporelles.

4 - Pont roulant N° 52.

- Sa construction est relativement récente (une dizaine d'années). Ce pont sert à transporter des lingots à haute température. La cabine est suspendue à l'infrastructure ce qui permet des mouvements pendulaires importants dans une gamme de fréquence située autour de 2 Hz.

- Cette cabine est cloisonnée intérieurement, ce qui limite le poste de travail à une surface de 2 m² environ. Le conducteur dispose d'un siège mais l'a éliminé pour incompatibilité avec le travail.

Les parois latérales métalliques limitent le champ de vision à une direction. La faible inclinaison de la vitre donne une vision verticale vers le bas (indispensable au travail) très faible. Le conducteur doit se pencher vers l'avant en manipulant des leviers disposés derrière lui.

Du fait de leur disposition au-dessus de sources de chaleur importantes, ces postes sont très pénibles du fait de la température. Selon les déclarations des anciens et de la maîtrise, des températures maximums de 50°C sont enregistrées en été.

5 - FENWICK.

Contrairement à l'usine des hauts fourneaux, l'unité de Fenderie comporte de nombreux postes permanents de conducteurs de chariot type Fenwick. Ils sont tous équipés en car à fourche. Nous retrouvons les difficultés classiques inhérentes à ce matériel. Le seul problème spécifique est la présence de nombreuses voies de chemin de fer.

Les conducteurs se plaindraient de l'inégalité des sols. Certains endroits sont recouverts de plaques de fer épaisses qui se déforment à l'usage.

CONCLUSIONS

L'usine de FENDERIE présente incontestablement les problèmes les plus intéressants.

- du fait de la situation économique de ce groupe qui laisse envisager une durée de travail encore appréciable.

- du fait de l'importance et de la nature des nuisances constatées : vibrations, dimensions, bruits.

Le poste de conducteur de chargeuse de fours Martin semble à priori, être la source d'étude la plus importante.

C - Usine de NOYEVRE - Hauts fourneaux, Aciérie.

1 - Dameur.

Des revêtements de sable pour les fours sont tassés entre deux parois métalliques. Un ouvrier dispose d'une dame à air comprimé d'un poids approximatif de 10 Kg. La fréquence de travail est environ 10 à 15 coups par seconde. Les efforts sont apparemment modérés. Cette technique est dépassée et condamnée à brève échéance.

2 - Pont roulant.

Même problème que pour le N° 52 de FENDERIE. La visibilité est légèrement meilleure mais la vétusté du matériel est importante : les fonctions de chaque commande sont très rudimentaires (absence de freinage et de contact de fin de course) compliquant le travail de ce poste dont la prise d'information est déjà difficile.

D - Port de HAYANG

Un grand nombre d'engins (chargeuse, Bulldozer, Fennick) sont utilisés dans ce port que nous n'avons pas visité.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Nous avons décrit des postes qui sont tous susceptibles d'être à l'origine de troubles pour l'opérateur : la chaleur, le bruit, les vibrations, sont des facteurs permanents et présents avec des niveaux élevés. Seule la chaleur, et parfois le bruit sont des caractères majeurs. Les vibrations (sauf pour la chargeuse de four Martin et les Fennick) atteignent rarement des niveaux considérables, si on les compare aux marteaux-piqueurs ou aux engins de chantier. Il ne faut pourtant pas oublier que le travail se fait en trois postes et que s'ajoutent des contraintes comme la poussière, la fumée, le confinement et l'isolement des opérateurs. La plupart des ouvriers que nous avons trouvés sur ces postes étaient des étrangers.

ASPECTS PHYSIOLOGIQUES DE LA CONDUITE DES VEHICULES TOUTS TERRAINS

par

le Docteur Alain WISNER,

Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers

et

M. Alain BERTHOZ, Docteur-Ingénieur

Attaché de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique.

fig	1 (0082)	4 (1.985)
	2 (0588)	5 (2.007)
	3 (1984)	6 (1.966)

Il n'est pas possible de faire fonctionner de façon satisfaisante un système composé d'un Homme et d'une machine en ignorant les lois d'un bon fonctionnement d'un des éléments du système. La connaissance de la biomécanique, de la physiologie, de la psychologie humaines est indispensable à l'ingénieur qui conçoit un nouvel objet et en particulier un véhicule tous-terrains. Du côté des spécialistes des Sciences de l'Homme, on note actuellement un souci de présenter les connaissances de telle sorte que celles-ci soient utilisables dans les bureaux d'études et les ateliers. A l'exigence technique ressentie par les ingénieurs, une réponse est donnée ; c'est l'Ergonomie.

Le développement des études ergonomiques n'a pas lieu de façon égale dans tous les secteurs du monde du travail ; il est dû à trois facteurs qui pèsent différemment suivant les types d'activité : le premier facteur est technique, un autre est social, un troisième économique.

1 - Techniquement, on atteint maintenant un tel degré de complexité, de précision et de rapidité dans le fonctionnement des machines, qu'il n'est plus possible d'estimer à priori que l'homme pourra dans tous les cas en assurer le fonctionnement avec l'efficacité désirée. On lui demande souvent, à la fois de conserver toutes ses facultés, et de travailler à la limite de ses possibilités physiologiques. Il faut donc connaître ces limites et les intégrer dans les projets de système homme-machine pour éviter de surcharger l'homme ou de risquer qu'il constitue un goulot d'étranglement dans la chaîne des opérations.

L'évolution des techniques ne permet d'ailleurs plus d'approcher la bonne solution par tâtonnement. Les données relatives à l'homme doivent être introduites sur la planche à dessin, toute intervention après la réalisation étant coûteuse et souvent peu efficace. C'est pourquoi, entre l'intervention ergonomique de correction et l'étude ergonomique de conception, la seconde est de loin la plus souhaitable.

2 - Les enquêtes des médecins du travail, des sociologues et des psychologues ont mis en évidence une très grande variété de troubles résultant du travail. ~~Dans le cas des engins de chantier~~ ^{On note} ~~par exemple~~ ^{que} 90% des malades hospitalisés, en 1945, dans un hôpital américain pour douleurs sacrolombaires, étaient des conducteurs de camions. Une enquête auprès de 378 chirurgiens américains a confirmé le rôle des camions et des tracteurs dans l'apparition des syndromes vertébraux. Une autre enquête, faite en Allemagne de l'Est, montre la fréquence des troubles digestifs propres à une population de 371 conducteurs de tracteurs agricoles (76 %) dont, sont en partie responsables les secousses des engins. Des anomalies radiologiques du rachis lombaire et thoracique sont nettes dans 71 % des cas, pour une population dont l'âge moyen est de 26 ans, alors que normalement, pour cet âge, on est en droit de s'attendre à une proportion beaucoup moins élevée de troubles.

Or, on accepte de moins en moins que la rançon inévitable du travail soit la fatigue, l'inconfort ou la dégradation de la santé. Les exigences en matière de conditions de travail deviennent d'autant plus grandes qu'une augmentation de salaire ou un léger accroissement du temps de repos ne peuvent pas toujours compenser financièrement, moralement et physiquement, les effets des perturbations apportées à l'organisme.

3 - Les incidences économiques d'un mauvais fonctionnement d'ensembles mécaniques de plus en plus coûteux constituent un autre argument en faveur de l'étude ergonomique. Ainsi, un organisme public qui utilise plusieurs centaines de véhicules lourds du type chargeuse-pelleteuse, tracteurs lourds, engins de manutention, s'est aperçu que la substitution de pneumatiques à basse pression aux traditionnelles chenilles facilitait le déplacement sur route de ces véhicules. Les avantages d'une telle solution sont connus : grande mobilité des engins, rapidité des déplacements (40 à 50 km/h). Malheureusement, les conducteurs qui ont fait quatorze heures de route éprouvent de grandes difficultés à faire ensuite un travail de terrassement.

Une enquête professionnelle montre qu'ils ne restent pas longtemps dans le métier; quelques accidents graves suivis de l'immobilisation d'un matériel coûteux achèvent de poser le problème et une équipe d'ingénieurs et de physiologistes est appelée en consultation. Les conclusions de l'étude ergonomique ont conduit à introduire dans les spécifications concernant les nouvelles séries, des clauses concernant l'homme.

Bien que l'Ergonomie possède des aires de recouvrement avec les disciplines voisines, elle diffère de la médecine du travail, de la Sécurité, de l'organisation et des Relations humaines. Elle ne repose que sur des résultats expérimentaux obtenus chez l'homme normal. Elle ne propose à l'utilisateur que des données limitées mais possédant un degré élevé de certitude. Chaque critère, comme la force musculaire maximale disponible, l'optimisation des contrastes d'éclairage, les rapports entre la cadence et la charge de travail, reposent sur des études scientifiques poussées où les recherches fondamentales de longue durée, multidisciplinaires, alternent avec le recueil des données sur le terrain et la "traduction" des résultats dans un langage utilisable par l'ingénieur.

L'Ergonomie fournit des lois, des critères, des constantes qui, s'ils doivent être utilisés avec discernement, représentent un corps de connaissances qui en fait une discipline charnière entre la science et la technique, contrastant de façon radicale avec des méthodes comme le Taylorisme dont on connaît les conséquences néfastes pour les travailleurs.

Pour préciser de façon plus concrète les éléments que l'Ergonomie propose à l'utilisateur ou au constructeur d'engins de chantier, nous allons considérer quelques exemples empruntés à de récentes études sur les problèmes posés par les engins de chantier.

A la suite des observations cliniques que nous avons citées plus haut, diverses études ont été menées pour améliorer le poste de conduite des véhicules tous terrains et des engins de manutention. Les recherches ont été réalisées, soit par des entreprises privées, pour leur propre compte (BOSTROM aux U.S.A., RENAULT en FRANCE) ou par des organismes publics (Institut MAX-PLANCK à DORTMUND et à Bad Kreuznach en ALLEMAGNE, Centres de Recherches Agricoles en ANGLETERRE et en FRANCE; Laboratoire de Physiologie du Travail).

L'U.R.S.S., l'ESPAGNE, le JAPON, la TCHECOSLOVAQUIE, la POLOGNE, entretiennent des équipes qui apportent régulièrement leur contribution. Jusqu'à présent, le plus grand nombre de données disponibles concerne les études dimensionnelles et la protection contre le bruit et les vibrations. Nous allons voir successivement l'état des connaissances dans ces trois domaines, puis nous décrirons rapidement d'autres problèmes pour lesquels l'étude ergonomique est susceptible d'apporter des résultats utiles.

ETUDES DIMENSIONNELLES

L'adaptation du poste de conduite à l'homme commence par une adaptation à ses dimensions. Dans le domaine de l'anthropométrie, il est étonnant de voir la quantité de véhicules qui ont été construits en France suivant des normes américaines. Or, les soldats américains mesurés pour obtenir ces normes, ont une taille supérieure de 5 à 6 cm à celles des conducteurs de camions français. De même, il convient de se rappeler que les femmes ont une taille moyenne inférieure de 12 cm à celle des hommes. Or, une mauvaise adaptation dimensionnelle du poste de conduite à son utilisateur, même lorsqu'elle n'excède pas quelques centimètres, risque d'entraîner des troubles vertébraux et une atteinte vasculaire des membres inférieurs. Elle risque aussi de gêner le maniement des commandes, soit en créant une fatigue musculaire précoce, si des forces importantes sont exigées, soit en diminuant de façon sensible la précision des gestes si les commandes sont assistées.

Des schémas dimensionnels comme celui de la figure 1 permettent maintenant d'introduire les dimensions de l'homme au niveau de la conception d'un poste de conduite, et d'estimer sur un véhicule existant l'écart entre la réalité et ce qui serait souhaitable. Dans l'élaboration de ces schémas, on a tenu compte des contraintes vasculaires, des nécessités d'un bon positionnement de la colonne vertébrale et des angles de confort indispensables par exemple à une bonne vision du travail. Il existe des abaques variés suivant le genre de travail à réaliser. En effet, il n'est pas suffisant de bien disposer les commandes et le siège pour un conducteur donné, encore faut-il qu'il puisse voir son travail. Ce problème de visibilité est essentiel sur les engins de chantier, on a montré en effet qu'une proportion très forte des accidents survenus avec des pelles mécaniques et des engins de manutention étaient dus à une mauvaise vision de l'environnement.

PROTECTION CONTRE LE BRUIT

Les engins de chantier sont souvent bruyants. Or on sait qu'un homme soumis à des bruits intenses devient sourd. Il existe des degrés de surdité : la fatigue auditive, la surdité audiométrique, la surdité infirmité. L'évolution de la surdité professionnelle se déroule selon ces trois phases, mais de façon irrégulière et imprévisible. Il y a, habituellement, une chute importante de l'audition pendant les premières années d'exposition au bruit, puis on note un palier et, plus tard, une nouvelle chute rapide et imprévue. Enfin, pour une même exposition au bruit, l'atteinte est très variable suivant les sujets.

On sait mesurer les bruits et les classer en fonction de leur intensité, de leur durée, de leur pureté et de leur situation dans le spectre sonore. On sait aussi mesurer la dégradation de l'oreille en faisant des audiogrammes sur lesquels on peut suivre la perte de sensibilité auditive en fonction de la fréquence des sons.

Cette double approche du problème, caractéristique de l'Ergonomie, a permis l'élaboration de critères concernant les risques de traumatisme sonore. On peut ainsi prédire la probabilité de surdité suivant les valeurs de l'intensité sonore exprimée en décibels en fonction de la fréquence.

Les mesures faites récemment sur des engins de chantier et sur des tracteurs agricoles au niveau de l'oreille des conducteurs indiquent des niveaux tels qu'ils risquent d'entraîner une surdité en cas d'exposition prolongée. Ceci montre la nécessité d'une insonorisation des cabines d'engins; mais la protection contre certaines fréquences demanderait souvent des épaisseurs trop grandes des matériaux appropriés et il est souhaitable, et d'ailleurs possible, de disposer sur les moteurs des silencieux efficaces, comme cela a été fait pour les automobiles.

On peut également noter le danger constitué par le fait que le bruit de l'engin peut masquer la parole (fig.2) Les signaux vocaux, avertisseurs de danger, ne sont pas perçus par le conducteur si le niveau de bruit est trop élevé.

PROTECTION CONTRE LES VIBRATIONS

Les secousses et les vibrations sont souvent, de toute évidence responsables de la fatigue des conducteurs et de la mauvaise maniabilité des engins. C'est pourquoi on a cherché à connaître la nature des vibrations, la façon dont elles sont transmises à l'homme, et les parties du système véhicule-siège-homme sur lesquelles on doit faire porter les efforts pour améliorer la situation.

Les premières études ont eu pour objectif d'élaborer des échelles de tolérance basées sur l'opinion de sujets soumis à des vibrations sinusoïdales. Ceci a donné des courbes dites de "tolérance subjective" comme celles de la figure 3 sur lesquelles sont portés divers résultats relatifs à des engins de chantier. Mais ces courbes ne sont pas satisfaisantes car, en particulier, elles ne conduisent pas à proposer des modifications précises des postes de conduite et elles négligent l'analyse de la transmission mécanique des vibrations à travers le système complexe constitué par le véhicule, le siège, et les masses du corps humain; transmission que connaissent bien les conducteurs qui cherchent à se protéger en portant des ceintures de contention abdominales

Les vibrations liées à la nature du sol sont transmises à un système composé de trois parties : le véhicule, le siège et l'homme. Chacun de ces sous-systèmes doit être étudié en rapport avec les autres, mais avec des concepts et des méthodes qui lui sont propres.

- Le véhicule -

En général, les engins de chantier ne sont suspendus que par leurs pneumatiques et on peut les représenter schématiquement par une masse suspendue par des ressorts. L'étude des modèles de masses suspendues montre que le mouvement des véhicules est une combinaison complexe de deux mouvements simples : un mouvement de rebondissement et un mouvement de rotation autour d'un centre situé entre les deux essieux.

Les caractéristiques principales de l'excitation peuvent être calculées approximativement et on montre qu'il y aurait intérêt à ce que les caractéristiques vibratoires figurent sur la fiche technique des véhicules au même titre que leur consommation en carburant.

Lorsqu'il est difficile de calculer ces paramètres, il est nécessaire de mesurer directement les fréquences dominantes d'oscillation des véhicules. Le calcul prévoit en effet, que celles-ci auront des valeurs déterminées, quel que soit le sol.

On dispose des accéléromètres à différents niveaux du poste de conduite et du corps du conducteur. L'enregistrement magnétique facilite l'obtention d'analyses de fréquence qui indiquent la répartition de l'énergie dans les différentes bandes de fréquence. La transmission des oscillations à travers le siège et le corps humain est obtenue grâce à l'analyse des distributions de l'amplitude.

Les résultats des mesures qui ont été effectuées sur divers engins révèlent que, conformément à la théorie, les véhicules oscillent de façon permanente ou transitoire à des fréquences caractéristiques de chaque type d'engin et comprises entre 1 et 6 Hz (fig. 4). Il se produit ensuite, entre chaque élément du système véhicule-siège-homme, des amplifications et des déphasages et l'homme est finalement soumis à des oscillations d'amplitude très élevée (0,5 à 3 g) - (1).

- Le système homme-siège - (fig. 5)

De très nombreux travaux ont été consacrés aux sièges. On peut faire l'étude sur le terrain de la transmission des oscillations à travers le siège et les masses du corps humain et employer les méthodes que nous avons décrites ci-dessus en disposant des capteurs entre le bassin du conducteur et le siège, au sternum et à la tête.

Mais les mesures sur le terrain ne donnent pas la courbe de réponse du siège et ne permettent pas de connaître avec précision les modes d'oscillation des masses du corps humain. La pureté des fréquences d'oscillation qui sont imposées au siège et la nécessité de contrôler les facteurs et les variables propres au corps humain justifient l'étude du système homme-siège sur des tables vibrantes animées de mouvements sinusoïdaux.

Pour l'étude de la transmission des vibrations verticales, la transmissibilité (ou rapport des accélérations) et le déphasage entre le bassin et la table vibrante fournissent le moyen de donner une description satisfaisante des qualités dynamiques des sièges. De nombreux sièges de conceptions technologiques diverses ont été essayés avec des sujets humains. Ils se comportent tous comme des filtres passe bas, c'est à dire qu'ils n'atténuent les oscillations qu'au-delà d'une certaine fréquence (3,5 à 4 Hz).

(1) g = accélération de la pesanteur

Si certains, comme les sièges suspendus, offrent une protection assez efficace contre les chocs, aucun d'entre eux ne peut soustraire l'homme à des mouvements dont l'amplitude est en général très supérieure à celle du véhicule. Les réglages de raideur introduits par les constructeurs sont, de plus, trop souvent illusoire. Si ces restrictions sont acceptables dans le cas de camions évoluant sur route ou de voitures particulières, c'est-à-dire pour une excitation modérée, elles ne sont pas admissibles pour les engins qui se déplacent sur tous les terrains et qui présentent sur route des oscillations d'amplitude élevée.

Par ailleurs, on sait que le thorax se déplace verticalement devant le rachis avec une résonance vers 4-5 Hz, pour laquelle son mouvement est trois ou quatre fois plus grand que celui du bassin. Le siège devrait donc, pour ces fréquences, offrir une atténuation très grande. Les déphasages qui interviennent au-delà de la résonance risquent de provoquer des déplacements relatifs qui font subir, comme le confirment de récentes études par radioscopie, aux viscères et à la colonne vertébrale des étirements et des compressions dangereux. Des mesures accélérométriques et photographiques montrent, de même, que la tête est animée, entre 3 et 6 Hz, d'un mouvement de rotation sur le pivot constitué par la colonne vertébrale cervicale. (fig. 6)

Ainsi, on dispose maintenant de méthodes et de moyens pour évaluer les caractéristiques des véhicules sur le terrain et les propriétés dynamiques des sièges sur table vibrante. Mais on ne peut guère intervenir directement sur les véhicules. La conception de sièges basés sur un principe de fonctionnement nouveau (amortissement dynamique, asservissements) sera sans doute déterminante pour réaliser la protection des conducteurs. Des études de tels systèmes sont actuellement en cours en France.

Des recherches sont également en cours, par le moyen de contrats passés entre des organismes publics (Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier, Direction des Recherches et Moyens d'Essais du Ministère des Armées, etc....) et des laboratoires de recherche, pour trouver des critères de tolérance physiologique aux vibrations.

AUTRES PROBLEMES ERGONOMIQUES

Le bruit et les vibrations ne sont pas les seuls agents physiques de l'environnement qui risquent de gêner l'opérateur humain. Le développement de grands chantiers dans les pays de climats tropicaux a posé le problème du travail à la chaleur, sur lequel se penchent plusieurs équipes de chercheurs et d'ergonomistes. Sur certains véhicules s'est posée avec acuité la question de la protection contre les poussières qui ne peut pas être résolue uniquement en exigeant le port de masques, gênants pour le travail et pratiquement délaissés surtout en ambiance chaude (mines de fer).

Mais la lutte contre les agents physiques ne représente pas le seul domaine de l'Ergonomie. En admettant que l'ambiance soit supportable, il faut étudier la tâche principale du conducteur. Sur un engin de chantier, son rôle consiste à recueillir l'information fournie par une multitude de paramètres (position et vitesse de l'engin, état du sol, avancement du travail, etc...), puis il transmet des ordres à la machine sous forme de manoeuvre des commandes.

Ceci pose des problèmes variés que nous allons énumérer rapidement.

- Instruments de bord :

Le conducteur doit être informé sur les paramètres propres à l'engin par des cadrans et des voyants lumineux; ces dispositifs de contrôle doivent être lisibles rapidement et dans erreur. Il existe maintenant des documents, utilisables facilement, qui définissent les qualités d'un bon instrument de bord.

- Etude dynamique des commandes :

L'action des mains et des pieds sur les commandes doit être adaptée à la fois aux capacités neuro-musculaires de l'homme et aux mouvements du véhicule qui correspondent. Il faut connaître la fréquence d'utilisation de chaque commande et, par conséquent, faire une analyse du travail détaillée; on doit aussi tenir compte des retards dus aux délais de transmission dans le corps humain (fonctions de transfert de l'homme). Ce genre d'étude a été très poussé dans l'aviation par suite du développement des systèmes d'asservissement. L'introduction de commandes assistées sur les véhicules lourds justifie sans doute des recherches à ce sujet.

La suppression de tout effort sur les commandes n'est pas toujours souhaitable ; sur les avions par exemple, on a dû raidir artificiellement le manche avec des ressorts ("sensibilité artificielle"), car son maniement exigeait trop peu de force, ce qui gênait le pilote.

- Mesure de la charge de travail :

Un autre chapitre concerne la mesure de la charge qui résulte finalement de la superposition de l'ambiance (bruit, vibrations, chaleur) et de la tâche de conduite. Si on dispose de critères valables pour évaluer des effets physiques, on ne sait pas encore mesurer avec certitude la charge qu'impose un travail plus perceptif que musculaire. Des recherches, entreprises récemment sur les conséquences du travail rapide et précis, comme on le trouve dans l'industrie électronique ou à propos des pilotes d'avions rapides, devraient faire progresser les connaissances concernant la conduite d'engins terrestres, sur lesquels les performances des véhicules risquent d'être limitées par leur mauvaise adaptation à l'opérateur humain.

- Le véhicule et le chantier :

L'engin et son conducteur sont rarement isolés. Ceci pose le problème du choix des meilleures formes de signalisation qui peut être visuelle ou auditive. Un signal visuel a l'avantage d'être vu, même lorsque le bruit est intense un signal auditif d'être entendu même lorsqu'on ne fixe pas son attention sur lui, à condition qu'il ne soit pas "masqué" par d'autres sons situés dans la même bande de fréquence que lui.

Enfin, les questions d'entretien des véhicules, de formation professionnelle des conducteurs, de division du travail entre les engins et les autres moyens mécaniques ou humains disponibles posent des problèmes pour lesquels l'analyse ergonomique aide à trouver des solutions précises.

En conclusion, on voit que de nombreux problèmes rencontrés dans l'utilisation des engins tous terrains se posent de façon plus claire quand ils ont été étudiés en collaboration avec un ergonomiste. Dans bien des cas, le seul fait d'avoir mieux défini les questions qui se posent conduit à proposer des solutions. Malheureusement ces dernières exigent le plus souvent des remaniements profonds de l'engin. C'est dire que la collaboration de l'ingénieur d'étude et de l'ergonome est une oeuvre de longue haleine, exigeant de chacun la confiance et le sens du possible.

VOYAGE D'ETUDE AUX U.S.A.

31 Août - 14 Septembre 1968

A. BERTHOZ, Attaché de Recherche C.N.R.S.
Laboratoire de Physiologie du Travail
41, rue Gay-Lussac - Paris 5ème

Ce compte rendu concerne uniquement les visites de Laboratoires qui ont été effectuées grâce au soutien de l'O.N.S.E.R.

L'objet du voyage était de faire le point sur l'état d'avancement des recherches dans le domaine du contrôle du mouvement. Ceci impliquait la visite de laboratoires de vocations sensiblement différentes : des centres d'essais où sont menées des recherches appliquées de biomécanique et des laboratoires de recherche fondamentale où les travaux sont orientés plutôt vers l'explication des mécanismes neurophysiologiques. Les uns font surtout de l'expérimentation humaine, les autres travaillent sur l'animal.

En réalité, il est difficile de catégoriser de façon parfaitement claire les laboratoires visités. Dans plusieurs d'entre eux, la nouveauté des problèmes abordés et les possibilités limitées de l'expérimentation humaine ont entraîné le développement de recherches sur l'animal; réciproquement, il n'est pas rare de voir des physiologistes dont l'oeuvre passée est uniquement consacrée à des phénomènes élémentaires, s'orienter vers des protocoles expérimentaux sur l'animal chronique, sinon sur l'Homme.

C'est pourquoi ce bref compte rendu ne prendra pas l'aspect d'un exposé divisé suivant le type de recherches; les laboratoires seront envisagés les uns après les autres, et c'est à propos de chacun que seront décrites à la fois les activités en cours et les orientations principales.

Les laboratoires qui seront décrits ici ne sont qu'un échantillon limité de ceux qui travaillent dans le domaine du contrôle du mouvement. Ils ont été choisis en fonction de plusieurs critères parmi lesquels : la qualité des publications des cinq dernières années, la notoriété de certains chercheurs les moyens matériels dont ils disposent, la nouveauté des méthodes en cours d'élaboration ... Seuls les laboratoires qui se trouvent à l'est des U.S.A. ont été retenus. On trouvera à divers endroits, dans ce compte-rendu, des adresses de laboratoires dont la visite doit être considérée comme souhaitable. A l'intérieur même de chaque laboratoire une sélection a été opérée de façon à permettre dans les délais imposés par le calendrier, des contacts aussi approfondis que possible avec les différentes recherches. Une attention particulière a été portée aux thèmes suivants :

- Techniques d'enregistrement des paramètres physiologiques et biomécaniques chez l'homme et chez l'animal. Electromyographie.

- Etudes biomécaniques des conséquences de l'application, à l'homme ou à l'animal, de perturbations mécaniques telles que les chocs ou les vibrations.

- Etudes expérimentales sur l'animal des mécanismes périphériques et centraux de la régulation musculaire. Recherches sur les mécano-récepteurs musculaires, articulaires, cutanés, vestibulaires ; intégration des messages sensitifs au niveau segmentaire et au niveau supra-spinal.

- Chez l'homme : étude de l'orientation spatiale et en particulier du rôle des organes vestibulaires. Recherches sur le contrôle du mouvement avec contrôle visuel (Tâches de poursuite...)

- Emploi simultané des techniques d'investigation neurophysiologiques et des méthodes d'analyse des données par la théorie des asservissements.

NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH. BETHESDA. MARYLAND

Le National Institute of Health est un des plus grands centres de recherche en Biologie des U.S.A. ; il finance de nombreuses équipes réparties sur tout le territoire des Etats-Unis. Il est situé à quelques kilomètres de Washington D.C. Je n'y ai visité qu'un seul laboratoire : celui de E.V. EVARTS. Mr. EVARTS travaille sur le singe chronique. Il conditionne des singes à effectuer un mouvement simple : une rotation du poignet. Cet apprentissage demande plusieurs mois pendant lesquels on apprend successivement à l'animal à se tenir tranquille dans un dispositif de contention, puis à accomplir la tâche : effectuer ce mouvement du poignet chaque fois qu'une lampe s'allume ; l'animal est alors récompensé par du jus de fruit. Les Macaques semblent bien adaptés à cette situation expérimentale.

EVARTS utilise ces animaux pour étudier les activités de différents centres supra-spinaux avant, pendant, et après le mouvement. Il a étudié, en particulier, les relations entre l'activité dans la voie pyramidale et la force exercée pendant un mouvement. Des recherches sur le contrôle du mouvement par le cervelet sont actuellement en cours. Il utilise un ensemble de techniques d'enregistrement tout à fait remarquables. La technique de descente des microélectrodes a été décrite dans ses publications, le mouvement du poignet est enregistré par une jauge de contrainte située sur le levier qu'actionne l'animal. Une étude préliminaire non publiée a montré l'excellente corrélation qui existe entre l'électro-myogramme et la tension développée sur le levier. Les cellules sont enregistrées dans le cerveau en même temps que le mouvement. Leur fréquence de décharge est comptée par un convertisseur fréquence-tension construit à partir d'amplificateurs opérationnels et de circuits logiques ; ceci permet une discrimination extrêmement fine des cellules d'après leur amplitude.

L'ensemble des paramètres est enregistré sur bande magnétique (Enregistreur SANBORN 2000) de façon à pouvoir être directement traité sur ordinateur si nécessaire. L'électronique de base est essentiellement de marque Tektronix comme d'ailleurs dans la plupart des laboratoires que j'ai visités. On doit noter l'utilisation extensive non seulement des oscilloscopes de cette marque, mais aussi de modules qui effectuent les opérations électroniques nécessaires au traitement des variables enregistrées.

Parmi ses projets de recherches, EVARTS compte faire effectuer une tâche de poursuite à un singe. Celui-ci aurait à maintenir l'un en face de l'autre une flèche et un point qui seraient projetés sur un écran en face de lui. En déplaçant un levier l'animal pourrait à chaque instant ramener la flèche en face du point ; ceci est très semblable à des tâches de poursuites utilisées en expérimentation humaine dans des recherches sur la fonction de transfert de l'opérateur humain. Nous avons là l'exemple d'une tendance qui se manifeste dans plusieurs autres équipes de recherches, non seulement aux U.S.A. mais aussi dans d'autres pays. Il s'agit d'étudier l'intégration chez l'animal normal, non anesthésié, de toutes les activités dont les mécanismes élémentaires ont été étudiés séparément. Ceci permettra sans doute de combler progressivement le fossé qui existe entre la physiologie analytique sur l'animal, et l'exploration extrêmement superficielle et globale que l'on pratique chez l'homme.

Il est frappant de noter le petit nombre de paramètres qui sont enregistrés à chaque expérience et le souci de simplification et de standardisation tant des conditions expérimentales que de la présentation des données. EVARTS fait, je pense, la démonstration que l'on peut obtenir d'excellents résultats sur l'animal chronique en choisissant quelques paramètres dont la signification est bien cernée et la technique d'enregistrement et de traitement conduite au plus haut degré d'élaboration. Ceci par opposition à une tentation qui serait celle de faire sur le chronique des enregistrements polygraphiques où le nombre de paramètres enregistrés ne compenserait pas la confusion de leur signification et la rusticité de leur traitement.

La laboratoire d'EVARTS n'est évidemment pas le seul qu'il serait intéressant de visiter au N.I.H. L'on m'a cité l'équipe de Karl FRANKE qui travaille actuellement sur la mise au point d'une technique d'enregistrement de l'activité des nerfs chez l'animal chronique.

L'on m'a signalé, par la suite, l'existence d'une équipe qui travaille avec le Dr OMMAYA (Institute of Neurological Diseases and Blindness N.I.H. BETHESDA MARYLAND.) sur des problèmes relatifs aux lésions de la colonne cervicale (coup de fouet) consécutives aux accidents d'automobiles. J'avais espéré pouvoir rencontrer l'équipe de Mrs F. ALT, W. HARLOW et H. METZ compétents sur les techniques de mesure en Biomécanique (Instrument Engineering and Design Branch).

A WASHINGTON deux autres centres de recherches auraient mérité une visite :

- le U.S. NAVAL MEDICAL RESEARCH INSTITUTE (BETHESDA MARYLAND.)

Cet institut militaire est orienté vers des recherches appliquées ; il est situé à côté du N. I. H.

- le WALTER REED ARMY INSTITUTE OF RESEARCH. Où sont menées entre autres des recherches sur les problèmes d'environnement thermique (Bioénergétique) et de comportement.

U.S. NAVAL AEROSPACE INSTITUTE - (PENSACOLA, FLORIDA)

Ce centre de recherche est dans une situation analogue à celle du Laboratoire de Médecine Aéronautique du centre d'essais en vol de Brétigny, il fait partie d'une base militaire aéronavale. Son activité est essentiellement centrée sur l'étude du comportement psychophysiologique de l'homme dans un environnement mouvant analogue à celui dans lequel se trouvent les pilotes d'avion, les navigateurs et les astronautes. La plupart des recherches sont financées sur contrat avec la N.A.S.A. Les thèmes de ces recherches sont souvent orientés vers les mécanismes de l'équilibration abordés sous l'angle de la physiologie vestibulaire ; les effets d'une stimulation rotatoire ou vibratoire sur l'ensemble des fonctions physiologiques ont été étudiés de façon systématique.

Le centre dispose d'une série de chambres pivotantes et de fauteuils tournants grâce auxquels on peut imposer à des sujets des mouvements dans toutes les directions de l'espace et pendant des durées allant de quelques fractions de secondes à plusieurs semaines. La chambre d'expérimentation principale permet à plusieurs hommes de vivre dans un environnement tournant dans des conditions habituelles de confort, pendant plusieurs semaines, tout en subissant de façon régulière des tests physiologiques, sans quitter cette chambre tournante.

Il est intéressant de constater qu'en dehors des plus grosses machines, ont été construits de très nombreux dispositifs, d'usage plus restreint, mais d'utilisation à la fois plus facile et plus féconde pour un véritable travail de recherche. Ce laboratoire peut s'enorgueillir d'avoir l'un des plus gros simulateurs d'accélération et de vibration que l'on connaisse, mais finalement l'on est amené à se demander si les résultats les plus convaincants n'ont pas été obtenus avec les appareillages de moindre importance.

Le centre est dirigé par le Dr GRAYBIEL connu pour ses travaux sur les effets d'une stimulation vestibulaire chez l'homme. Le Dr GRAYBIEL a organisé le premier Symposium sur "le rôle des organes vestibulaires dans l'exploration de l'espace" qui s'est tenu à Pensacola en 1965 et se tient annuellement depuis cette date, rassemblant les meilleurs spécialistes sur ce sujet. Le Dr GRAYBIEL pense que le vestibule joue un rôle important dans le contrôle de la motricité. Au cours d'une discussion trop longue pour être résumée ici, il a insisté sur les effets

prolongés de la stimulation vestibulaire, même lorsqu'elle n'est pas d'une intensité considérable. Cette prolongation des effets suggère une explication qui ferait appel à des mécanismes endocriniens.

Un court essai fait dans une chambre tournante à la vitesse relativement faible de 10 tours par minutes suffit pour provoquer des illusions visuelles intenses. Le plancher paraît être très incliné et un cube de lumière fabriqué en perçant un cube métallique de trous le long de ses arêtes est perçu comme complètement déformé.

Les recherches sur l'homme concernant la physiologie vestibulaire comprennent, en général, des enregistrements des mouvements des yeux suivant les techniques habituelles de la Nystagmographie. Mr W.C. HIXSON a mis au point une intéressante expérience ayant pour but l'étude des relations entre la régulation oculo-motrice et la perception de l'orientation dans l'espace. Il enregistre les mouvements des yeux et utilise ce signal pour asservir la position d'un fauteuil tournant. Le sujet peut ainsi régler la position de son siège en déplaçant ses yeux ; les oscillations du système ainsi constitué sont étudiées. La notion de fonction de transfert est largement utilisée dans l'ensemble des recherches et les données sont souvent traitées sur ordinateur, bien que cela ne soit pas systématique.

Dans le même domaine d'investigations le Dr F.E. GUEDRY effectue des travaux sur les effets d'une stimulation vestibulaire pendant l'exécution d'une tâche de poursuite (Tracking). Il obtient des perturbations étonnantes de la compensation visuelle. La vitesse maximale à laquelle un sujet peut suivre des yeux une cible en effectuant un contrôle de sa position est à peine de 10 degrés par seconde lorsqu'il y a stimulation vestibulaire, alors que normalement la vitesse maximale atteinte est voisine de 80 à 90 degrés par seconde. Il suffit de stimulations vestibulaires très faibles pour entraîner cette dégradation.

Le Dr GUEDRY a mis au point une batterie de tests destinée à évaluer l'état fonctionnel du système vestibulaire chez l'homme. Il a cherché à obtenir des tests à la fois très efficaces et très simples à mettre en oeuvre. Il m'a confirmé que l'épreuve la plus difficile pour un délabrynthé était la marche les yeux fermés. Il serait trop long de résumer l'ensemble des discussions que nous eûmes, un point est toutefois à souligner en raison de son importance pratique : réalisant une recherche de l'effet de l'alcool sur les fonctions vestibulaires, le Dr FREGLY a montré que des doses aussi faibles que 50 mg d'alcool étaient suffisantes pour provoquer une dégradation sensible de ces fonctions. Il a vérifié que les effets observés n'étaient pas dus à un endormissement par l'alcool en faisant effectuer aux sujets une tâche de poursuite qui, elle, n'était pas dégradée.

Si l'on compare les recherches menées par les Dr GRAYBIEL, GUEDRY et FREGLY, il est frappant de constater, en dehors des résultats particuliers à chaque recherche, à quel point les résultats convergent pour suggérer que les systèmes qui permettent l'orientation dans l'espace et le contrôle visuel des mouvements sont sensibles à des perturbations mécaniques ou aux effets de l'alcool, et ceci pour des valeurs faibles de la perturbation imposée.

Mr HIXSON m'a donné plusieurs indications d'ordre technique :

- Il recommande vivement l'enregistreur magnétique LOCKEED 417 B ; cet enregistreur est muni de 7 pistes d'enregistrement qui peuvent être lues après enregistrement. Il est portable, de faible encombrement, semble être à l'épreuve des chocs ; il m'a été recommandé dans un autre laboratoire (MAN-VEHICULE LABORATORY M.I.T.)

è Il conseille l'utilisation des électrodes miniaturisées BECKMAN à condition de les plonger, entre chaque expérience, dans de la pâte BECKMAN en connectant les électrodes entre elles. Ceci diminuerait de façon sensible la dérive continue.

- Il conseille l'utilisation de capteurs de force d'une technologie nouvelle (Force-balance transducers.) au sujet desquels une documentation pourrait lui être demandée par écrit.

Dans le Laboratoire le Dr. GERLANDT dirige une section dans laquelle se poursuivent des recherches sur les effets des influx d'origine vestibulaire sur la motricité. Dans cette section les expériences sont uniquement faites sur l'animal. Les travaux de GERLANDT sont bien connus des spécialistes du vestibule. Il a étudié respectivement les effets d'une stimulation vestibulaire artificielle (Stimulation électrique non spécifique du nerf VIII) sur l'activité médulaire, la compétition entre les influx vestibulaires et les afférences corticales, cérébelleuses, et celles d'autres mécano-récepteurs (Muscles et articulations cervicales...)

Parmi les résultats que le Dr GERLANDT cite comme les plus importants, j'ai retenu :

- La prépondérance des informations en provenance des muscles de la nuque sur les messages vestibulaires

- La prépondérance de l'activité d'origine vestibulaire sur l'activité corticale. GERNANDT interprète certains accidents de voiture de la façon suivante : lorsqu'une voiture doit franchir deux virages se succédant très rapidement, le franchissement du premier entraîne une stimulation vestibulaire ; celle-ci serait suffisante pour bloquer la commande corticale donnant à la musculature les ordres pour effectuer les gestes nécessaires à la prise du second virage. C'est ainsi, d'après le Dr GERNANDT que le conducteur se retrouve à l'hôpital et déclare qu'il a continué tout droit sans comprendre pourquoi. Un signe extérieur de l'existence de cette stimulation vestibulaire pendant le premier virage serait le fait que les conducteurs ont tendance à incliner la tête.

Il faut remarquer que ceci est une extrapolation à l'homme, de données obtenues sur le chat. Cette réserve mise à part, nous avons ici encore un témoignage montrant que l'on peut obtenir des effets d'origine vestibulaires pour des stimulations mécaniques d'expérience courante.

- L'action d'origine vestibulaire sur les muscles serait non spécifique. C'est-à-dire que l'on n'obtient pas de différence nette entre les effets sur le tonus des fléchisseurs et sur celui des extenseurs.

- Le système gamma serait plus sensible que le système alpha, à l'excitation vestibulaire. Ces résultats ont été obtenus par enregistrement dans les racines ventrales. La distinction entre fibres alpha et gamma se fait par leurs amplitudes respectives. (Les fibres alpha donnent des potentiels d'action d'amplitude supérieure à ceux des fibres gamma). On observe un accroissement de la fréquence de décharge des fibres gamma par suite de la stimulation vestibulaire.

- Plus récemment l'effet d'une excitation vestibulaire sur les influx qui descendent par la M.F.A. a été exploré. Aucun effet net n'a pu être observé.

Les travaux concernant le Rôle des organes vestibulaires dans l'exploration de l'espace sont consignés en grande partie dans les comptes-rendus des symposia dont la référence est : NASA SP-77 NASA SP-152 et NASA SP 115 que l'on peut obtenir à l'adresse suivante :

N. A. S. A.

Scientific and technical information division

U.S. Government Printing office

WASHINGTON D.C. 20402

LABORATOIRE DE NEUROPHYSIOLOGIE, MILLARD HALL.

UNIVERSITY OF MINNESOTA, MINNEAPOLIS 14 MINN. 55455

Ce laboratoire est dirigé par le Pr. TERZUOLO, l'activité de recherche y est orienté vers les problèmes du contrôle périphérique et central du mouvement. Les expériences sont faites uniquement sur l'animal. Le laboratoire comprend quatre ensembles expérimentaux connectés avec un ordinateur I.B.M. loué par le laboratoire. A part une recherche sur la vision, toutes les autres recherches engagées actuellement sont destinées à explorer systématiquement les différentes parties du système de régulation du mouvement :

- Les propriétés mécaniques du muscle dénervé et désinséré sont étudiées. Le muscle est soumis à des étirements mécaniques sinusoïdaux de fréquence et d'amplitude variable. On calcule la fonction de transfert du muscle et la linéarité de la réponse, par analyse de Fourier. Les résultats sont exprimés sous forme de diagrammes de Bode donnant le gain en décibels et le déphasage entre la stimulation et la réponse. Un programme de l'ordinateur permet d'évaluer la linéarité du système de deux façons : L'on mesure, en premier lieu, le degré de distorsion de la réponse en chiffrant le pourcentage d'harmoniques. L'on compare, en deuxième lieu, la fonction de transfert calculée à partir de la réponse à une impulsion, avec la fonction de transfert mesurée à partir des étirements sinusoïdaux. On sait que le système peut être considéré comme linéaire si ces deux réponses sont identiques. Nous n'insisterons pas sur les résultats qui peuvent être cherchés dans les publications du laboratoire.

Au lieu d'étirements mécaniques, la stimulation consiste, dans certaines expériences en des trains d'impulsions électriques dont on varie, à la fois la fréquence et l'amplitude, de façon à obtenir une simulation de la commande motrice (accroissement de la fréquence des unités motrices, et recrutement de nouvelles unités). Ce mode de stimulation est utilisé par PARTRIDGE dans un autre Laboratoire pour des études de physiologie vestibulaire.

- Les propriétés du fuseau neuro-musculaire sont étudiées par des méthodes similaires. L'activité des voies afférentes a été enregistrée et les caractéristiques de la transmission le long de la boucle myotatique explorées.

- Les effets d'une stimulation vestibulaire sur la motricité sont actuellement étudiés en utilisant une table pivotante qui permet d'imposer à l'animal une

stimulation vestibulaire NATURELLE. Cette recherche des moyens d'imposer des stimulations naturelles est une préoccupation de la plupart des laboratoires que j'ai visités. Et l'utilisation de tables pivotantes ou vibrantes en est le moyen le plus accessible.

- Enfin l'un des chercheurs de l'équipe s'est penché sur les propriétés formelles de la transmission nerveuse qui, comme on le sait, se fait par modulation de fréquences d'impulsions dont l'amplitude est constante. Il y a quelques années que je cherche une étude mathématique sur les propriétés d'un tel mode d'échantillonnage. Malheureusement les ingénieurs en transmission n'ont pas retenu ce procédé pour les télécommunications. L'analyse faite à Minneapolis aboutit à des résultats qui ne paraissent de première importance : un tel procédé d'échantillonnage, lorsqu'il existe plusieurs voies parallèles de transmission de fréquences voisines. (ce qui est le cas des voies afférentes) a au moins deux avantages : il accroît la linéarité de la transmission et opère une véritable extraction du signal principal hors du "bruit", effectuant ainsi un filtrage essentiel pour une bonne transmission du signal d'origine à travers de multiples voies et à partir de l'information obtenue par de nombreux capteurs.

Cette analyse reste encore au niveau du modèle mais elle est susceptible je crois, de développements féconds.

Sur le plan technique, et en dehors de l'utilisation "On line" du calculateur j'ai noté l'emploi généralisé du matériel Tektronix, et d'amplificateurs opérationnels. Le laboratoire fait de l'auto-financement en vendant certains appareils qu'il a mis au point, par exemple, un convertisseur fréquence tension. Il suffit d'écrire pour avoir des renseignements.

ALBERT EINSTEIN INSTITUTE - Department of Rehabilitation Medicine

Laboratoire du Dr HERMANN

Le laboratoire du Dr HERMANN est réparti en divers endroits du complexe hospitalo-universitaire de l'Institut.

1) Dans le département de réadaptation de l'hôpital, un ensemble expérimental est destiné à l'exploration fonctionnelle chez l'homme. Le dispositif principal consiste en une machine qui permet d'imposer des rotations du pied autour de la cheville. Les études menées jusqu'à présent ont été centrées sur les propriétés du réflexe myotatique et la mesure de l'état d'excitabilité des récepteurs. Peu de publications sont disponibles.

Le Dr HERMANN monte actuellement un ensemble de stimulation qui comprendra les éléments suivants : une machine à imposer des forces. Ces forces seront obtenues grâce à un moteur couple asservi en force et en position. Trois générateurs de fonctions permettront de superposer divers types de stimulation mécanique. Le Dr HERMANN compte traiter les informations mécaniques et électrophysiologiques sur un ordinateur PDP 8 qui sera installé dans le laboratoire.

Nous avons discuté avec le Dr HERMANN un certain nombre de problèmes dont je retiendrai quelques points pour mémoire :

- Sur le plan de la technique d'enregistrement de l'E.M.G. il existe maintenant des fils fabriqués industriellement par la maison MEDWIRE CORP.

121 S. COLUMBUS AV. Mt VERNON, NEW-YORK

- Dans le domaine de l'interprétation des résultats, nous avons évoqué les expériences d'étirements musculaires :

En réponse à une force appliquée rapidement, le Dr HERMANN m'a dit avoir obtenu des bouffées d'électromyogramme prolongées se présentant parfois sous la forme de doubles bouffées, ce qui irait dans le sens de certains résultats que nous avons obtenus. Il aurait tendance à décomposer l'activité E.M.G. ainsi obtenue en trois parties : une première activité d'origine myotatique, une deuxième d'origine cutanée et une troisième d'origine visuelle. Il donne comme latence du réflexe myotatique 30 ms pour le membre supérieur et 60 ms pour les membres inférieurs. Les réponses d'origine visuelle auraient une latence assez longue (150 ms).

Notons que la présence d'une activité d'origine cutanée dans la réponse à un étirement brusque est confirmée par les expériences récentes faites à Seattle

par BROOKHART que j'ai rencontré à Washington. Il a entraîné des chiens à rester immobiles sur une table mécanique à laquelle on impose un déplacement horizontal rapide. En bloquant de façon sélective les afférences cutanées chez ces chiens non anesthésiés, on observe un accroissement sensible des oscillations posturales consécutives à l'ébranlement de la table.

- Le Dr HERMANN dit ne pas vouloir travailler sur le Biceps en raison des difficultés que l'on rencontre pour maintenir la position du bras dans des limites rigoureusement fixées. Il a pourtant un programme de recherches qui comprend l'application au membre supérieur de forces semblables à celles qu'il projette d'appliquer aux membres inférieurs.

- Sur le sujet très controversé des fuseaux neuro-musculaires et des organes de Golgi, il est en désaccord avec certaines des conclusions de HOUK sur la fonction du fuseau. Celui-ci serait aussi un capteur de forces.

- Enfin il a essayé d'utiliser l'enregistrement de potentiels évoqués pour explorer les réponses centrales. Il combine des potentiels évoqués moteurs et visuels.

2) Sur l'animal le Dr HERMANN effectue plusieurs recherches. Je ne rapporterai ici que la construction d'un dispositif d'application de forces, analogue à celui que l'on a décrit pour l'homme. Le système d'application de la force diffère par sa taille, mais aussi par son principe puisque c'est un système électrodynamique basé sur le même principe que les hauts parleurs qui est utilisé et non pas un moteur couple. Dans les deux cas les éléments de base ont été achetés et complètement remaniés au Laboratoire pour répondre aux spécifications demandées.

BIOMECHANICS RESEARCH CENTER WAYNE STATE UNIVERSITY. DETROIT. MICHIGAN

Le centre de recherches Biomécaniques de Detroit est connu par les travaux du Pr. PATRICK. Il s'agit de recherches appliquées sur les effets des chocs, en particulier sur les chocs survenant lors des accidents d'automobiles. La très courte visite que j'ai faite au Laboratoire du Pr PATRICK ne m'a d'ailleurs pas révélé de méthodes ou de recherches qu'une lecture attentive de ses publications ne mettait en évidence.

Par contre, et un peu par hasard, j'ai eu la possibilité de visiter le "Medical Research Building" (550 East Canfield), où j'ai rencontré plusieurs chercheurs :

- Mr HODGSON dirige une section où sont effectuées des recherches concernant les effets des impacts sur des cadavres humains ou sur des animaux. Dans son Laboratoire trois dispositifs sont actuellement en service : une glissière à piston qui propulse une masse variable à des vitesses réglables sur des têtes d'animaux ou d'hommes ; un petit banc d'accélération linéaire qui permet de soumettre des singes à divers types de décélérations, et enfin un banc d'essai statique des paramètres mécaniques des crânes. En plus des films sur caméras ultra rapides, on enregistre l'impédance mécanique grâce à des capteurs spéciaux.

Mr HODGSON a réalisé d'intéressantes expériences en vue de la fabrication d'un modèle dynamique du crâne humain.

- Dans le même laboratoire A.I. KING fait des expériences d'accélération verticale sur des singes. Ce travail est relié à des études de sièges éjectables pour les pilotes d'avion.

- Enfin j'ai rencontré Mr VULCAN qui fait des modèles mathématiques du mouvement de la tête chez l'homme et l'animal.

Utilisant des moyens techniques relativement modestes, les travaux de cette équipe m'ont paru dignes d'être suivis. On peut remarquer toutefois l'absence de mesures d'ordre neurophysiologique. Mr KING m'a dit avoir essayé, sans succès, l'enregistrement de l'E.M.G. sur le singe pendant les accélérations.

Sur le plan technique l'on m'a signalé une drogue, le SERNYLAN, qui injectée à l'animal supprime la douleur sans affecter le tonus postural, ce qui facilite la réalisation de certaines expériences.

MAN-VEHICLE LABORATORY (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 02139

CAMBRIDGE, MASS.

Ce laboratoire est dirigé par le Pr L. YOUNG et le Dr J. MEIRY. Les recherches concernent le contrôle du mouvement chez l'homme. L'ensemble des problèmes que pose l'introduction d'un opérateur humain dans les dispositifs de contrôle d'un véhicule a été étudié dans la perspective de la modélisation des caractéristiques fonctionnelles de l'homme. En fait les efforts du Laboratoire ont porté plus particulièrement sur certains points parmi lesquels on retiendra :

- Des recherches sur le rôle des organes vestibulaires dans l'équilibration. Une maquette de cabine d'avion, à laquelle on peut faire subir divers mouvements oscillants est utilisée, la performance de l'opérateur humain enregistrée.

- Les causes du mal des transports sont étudiées avec un dispositif original. Un sujet est assis dans un fauteuil tournant à faible vitesse ; des lignes verticales sont projetées devant les yeux du sujet. Ces lignes défilent à une vitesse variable que le sujet peut régler à volonté. On demande au sujet, lorsque la nausée commence à apparaître de régler la vitesse de défilement des lignes de façon à ce que la nausée cesse. Il pourrait ajuster la vitesse des lignes pour qu'elles soient immobiles dans l'espace, ou encore qu'elles soient immobiles par rapport à lui-même, ou pour une vitesse intermédiaire. C'est cette dernière solution que choisit le sujet. Le Pr YOUNG pense qu'il s'agit là d'une action destinée à diminuer le conflit entre les afférences d'origine vestibulaires et les afférences d'origine visuelles.

Si j'ai décrit cette situation expérimentale c'est parce qu'elle me semble représentative de la façon dont j'ai vu plusieurs chercheurs poser les problèmes de l'investigation, chez l'homme des mécanismes qui contribuent au contrôle de la motricité. Encore une fois, le dispositif expérimental est extrêmement simple.

D'autres recherches menées dans ce laboratoire concernent d'autres aspects du contrôle du mouvement. Une expérience est destinée à étudier l'efficacité de l'utilisation par l'homme de la régulation en force. Un système extrêmement simple de levier sert à contrôler la position d'un spot sur un oscilloscope. Mais on demande au sujet d'exercer une régulation en force. Il semble que la régulation obtenue soit très fine. Ceci est à rapprocher des recherches fondamentales sur l'animal ; celles-ci suggèrent en effet que les informations sur la tension

du muscle, fournies par les divers mécano récepteurs seraient essentielles pour le contrôle du mouvement.

La plupart des expériences menées dans ce laboratoire sont connectées en direct avec un calculateur hybride, c'est-à-dire comportant une partie de calcul digital et un calculateur analogique.

Le Dr MEIRY a réalisé des études sur l'apprentissage visuel et moteur en essayant de trouver des modèles interprétatifs. Ce sujet intéressant n'a pu être débattu faute de temps.

Sur le plan technique, le Pr YOUNG n'a recommandé l'emploi d'un dispositif commercialisé, qui permet la mesure du mouvement des yeux sans gêner le sujet et en pleine lumière. Il s'agit d'un système à cellules photo-électriques fixées sur des lunettes. Le fabricant de cet appareil est :

SPACE SCIENCES INCORPORATED

301 Bear Hill Road, Waltham, Massachusetts, 02154

(Type SG - Eye Movement Monitor)

MAN-MACHINE SYSTEM LABORATORY (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 02139

(CAMBRIDGE MASS.)

Ce laboratoire est dirigé par le Pr. Thomas SHERIDAN. Il travaille en relation avec le Laboratoire du Pr YOUNG et le but des deux laboratoires est très proche ; réaliser des modèles de l'opérateur humain à partir d'expériences sur l'homme. Au jour de ma visite, trois recherches étaient en cours :

- Une étude de main artificielle. Il s'agit de commander à partir de la terre une main artificielle qui sera située sur la Lune. Le dispositif technique comprendra deux calculateurs : le premier sera situé sur la terre et sera commandé manuellement par un homme, le second sera sur la lune, recevra des ordres de la terre, et commandera la main artificielle. Le but de la recherche est de définir les modes opératoires de l'ensemble de façon que soient évitées les erreurs ou oscillations.

- Une simulation de la conduite automobile. Le simulateur se compose d'une piste circulaire disposée autour de la pièce d'expérience et sur laquelle se déplace un modèle réduit d'automobile. Le conducteur est assis au milieu de la pièce dans une cabine. Il voit sur un écran de télévision les images de la piste expérimentale qui lui sont fournies par une caméra fixée sur l'automobile, à la place de l'oeil de celui qui la conduirait si elle avait la taille d'un véhicule réel.

Des obstacles apparaissent subitement devant la voiture, des signaux sont mis en place, des situations de conduite pouvant ainsi être créés à volonté et les réactions du conducteur étudiées.

- Une autre expérience de simulation est en cours de construction. Elle a pour but de déterminer quel rôle jouent les informations d'origine proprioceptives dans la conduite d'une automobile. On projette au sujet le film d'une route, en laboratoire dans une cabine expérimentale ; puis on lui projette le même film dans une voiture réelle qui se déplace sur une piste d'essai. Les vitres de cette voiture sont peintes en noir de façon que les seules informations dont le conducteur dispose sont d'une part le film, et d'autre part les sensations qui proviennent du mouvement de la voiture et qui n'existaient pas en laboratoire. Il y aurait bien des commentaires à faire sur les qualités et les défauts de cette expérience, mais au moment où se pose à beaucoup d'entre nous le problème de la simulation, je pense que cette recherche, comme les deux précédentes est susceptible d'alimenter utilement la réflexion.

AUTRES LABORATOIRES VISITES ET POUR LESQUELS UN COMPTE-RENDU NE FIGURE PAS
DANS CE RAPPORT

American Medical Association. Laboratory of Neurophysiology
535 Dearborn Street. CHICAGO

Harvard Medical School Laboratoire du Pr HENNEMAN. Laboratoire du Dr HOUK
BOSTON 02115

University of Illinois at Chicago Circle Department of Biomedical Engineering,
Presbythian-St. Luke's Hospital and College of Engineering (Pr. L. Stark) 1753
W. Congress Parkway - Chicago (663.8670).

Dans ce laboratoire sont conduites des recherches sur les propriétés dynamiques du contrôle visuel et moteur chez l'homme comme chez l'animal : Contrôle manuel (Fonction de transfert, modèles de l'opérateur humain) pendant des tâches de "poursuite" ; dynamique du contrôle visuel.

Le Pr. STARK qui dirigeait ce laboratoire est maintenant Professeur d'Optique Physiologique à l'Université de Californie.

LABORATOIRES DE RECHERCHE APPLIQUEE DONT LA VISITE SERAIT INTERESSANTE

La liste des laboratoires ci-dessous n'est en rien exhaustive. Elle comprend quelques noms qui m'ont été signalés.

Aerospace Medicine Research Laboratory. Wright Patterson Air Force Base Dayton, Ohio

Cet ensemble de laboratoires est un des plus grand des U.S.A. On y conduit des recherches dans tous les domaines de la Médecine Aérospatiale. On y trouvera les recherches appliquées les plus avancées dans les domaines de la Biomécanique, de la Bionique, de l'Acoustique. J'avais projeté la visite de ce centre mais il est nécessaire de faire des demandes officielles assez longtemps à l'avance en raison de son caractère militaire.

On pourra y rencontrer, entre autres, les chercheurs suivants :

- C.E. CLAUSER. Behavioral, Sciences Laboratory. Auteur de travaux sur les moments d'inertie du corps humain
- H.E. Von GIERKE. Bio-acoustics branch. Connue pour ses travaux en Acoustique et en Bionécanique. C'est à lui qu'il faut s'adresser en premier lieu
- R. HEADLY a fait des études sur les vibrations
- G.G. FROST. Electronic Engineering Design Branch Maintenance. A contribué au "Bioastronautic data book"

Hamilton Standard Division. United Aircraft Corp. Department of Biophysics
Windsor Lock Connecticut U.S.A. (Mr CASHBY)

Institute of Transportation and Traffic Engineering. University of California.
Los Angeles

Dans ce centre de recherches sont simulés des accidents de voiture avec des mannequins ; études de repose-tête, lésions du visage. Etudes sur cadavre

Les deux chercheurs qui m'ont été signalés sont les Dr SEVERY et le Dr A. NAHAUM.

CORNELL Aeronautic Laboratory. Buffalo N.Y.

Mr R. Mc HENRY y fait des simulations sur ordinateur de la cinématique des accidents

SECTION OF PHYSICAL MEDICINE. STRITCH SCHOOL OF MEDICINE LOYOLA UNIVERSITY
MILES ILLINOIS

Le Pr LIBERSON dirige dans cet établissement un Laboratoire de médecine physique. Il a aussi un département de recherches dans le cadre du VETERAN'S HOSPITAL. Je devais visiter ce Laboratoire sur l'invitation du Pr LIBERSON. Le temps m'a manqué pour le faire.

BIOMECHANICS GROUP. RESEARCH DIVISION. COLLEGE OF ENGINEERING
NEW-YORK UNIVERSITY 401 WEST 205 STREET. NEW-YORK 34

Dans ce Laboratoire que je n'ai pas pu visiter, sont faites d'intéressantes recherches de Biomécaniques. Les principaux chercheurs sont : le Dr CONTINI, J.R. DRILLIS, SCHNECK, GAGE et BLUESTEIN

BIOASTRONAUTICS SECTION. AIR PLANE COMPANY - SEATTLE. WASH.

INSTITUTE OF REHABILITATION MEDICINE, NEW-YORK UNIVERSITY MEDICAL CENTER
NEW-YORK 10016

Le Dr TICHAUER dirige ce département de recherches Biomécaniques. On y étudie les problèmes suivants : études électromyographiques dans un environnement industriel, rôle des différents groupes musculaires du membre supérieur en fonction de la disposition du poste de travail, problèmes de l'apprentissage moteur...

DOCUMENTATION TECHNIQUE

Une documentation technique a été rapportée. Elle concerne les problèmes suivants :

- Electrodes pour Electromyographie
- Capteurs de force, d'accélération, etc...
- Calculateurs et analyse des données
- Enregistrement magnétique
- Enregistrement sur papier photographique
- Amplificateurs, stimulateurs
- Stéréotaxie
- Mesure du mouvement des yeux
- etc...

Cette documentation est à la disposition des personnes intéressées.

plan Wisner

Contrat C.E.C.A. N° 6242/22/025

Compte Rendu des mesures effectuées à la Mine de Moutiers
le 11 et 12 Décembre 1967
(Diffusion restreinte)

Le but du séjour que nous avons effectué était de faire des mesures dans les trois domaines suivants : bruits, vibrations, dimensions du poste de conduite. Ces mesures devaient porter sur la chargeuse transporteuse WAGNER dont nous avons décrit le principe de fonctionnement dans le C.R. précédent. A la suite d'un échange de correspondance le plan du séjour avait été fixé de la façon suivante.

Arrivée, dimanche soir.

Installation des chaînes de mesure, lundi matin

Mesures, lundi après-midi et jours suivants selon besoins.

La préparation de cette campagne a demandé l'équivalent d'une semaine à plein temps pour GUERIN et l'équivalent d'une journée pour BERTHOZ. Nous sommes partis avec le matériel suivant :

Bruit : - Sonomètre B et K.

- Magnétophone UHER.

Vibrations: Chaîne d'accélérométrie ACB - Equipée avec 5 voies de mesure, 10 capteurs.

- Equipement de développement des films.

- Petit matériel.

Dimensions: Plans du poste d'après le relevé fait précédemment.
Petit matériel.

Films : - Caméra KODAK.

- Projecteur.

1 - Déroulement des essais :

Nous sommes partis à trois le dimanche soir, nous étions comme prévu, attendus par un chauffeur à METZ.

LUNDI :

Dès l'arrivée à la mine le Lundi matin nous avons été accueillis par le chef d'exploitation, qui nous attendait. Descendus directement au fond avec le matériel nous avons pu installer la chaîne de mesure ACB sur la chargeuse, dans de bonnes conditions puisque cette chargeuse avait été conduite pour nous dans l'atelier du fond (Remise). Les fixations nécessaires, soudure de pattes etc... ont été effectuées sans retard par un personnel prêt à nous rendre tous les services et attendant visiblement que nous lui en demandions.

Pendant l'installation de la chaîne par GUERIN, nous avons pu nous rendre dans un quartier faire les mesures de bruit dans les conditions suivantes :

Mesures au Sonomètre et enregistrement magnétique des bruits lors du passage de la Chargeuse WAGNER, lors du chargement et du déchargement.

Mesures du bruit de la foreuse JUMBO avec les mêmes moyens.

L'ensemble de ces mesures, transport compris, a demandé environ une heure et demie. Deux personnes (Porion et Chef Porion) nous ont accompagné prêtes à nous aider, facilitant les arrêts de l'engin à notre discrétion.

Les niveaux enregistrés semblent élevés (98 à 108 dB) , le médecin du travail, ~~Dr~~ KESSLER, qui fait des audiogrammes du personnel tous les deux ans, nous a dit n'avoir pas encore de baisse sensible des courbes depuis la mise en oeuvre des engins (3ans), il reconnaît pourtant obtenir certaines anomalies qui seraient antérieures à l'introduction des engins.

Nous avons démarré les essais au début du poste de l'après-midi, soit à 14 H. L'ambiance de l'après-midi est réputée plus calme que le matin car l'activité est plus réduite : la régie (entretien, voies, canalisations) ne travaille que le matin et il n'y a que deux coffres, ou chantiers d'extraction, l'après-midi, contre trois le matin. Ceci dit la production doit être la même dans chaque chantier.

L'engin nous a rejoint sur le chantier, nous avons effectué les mesures de vibration sur le poste de conduite suivant le protocole décrit plus loin. La fréquence de manoeuvre d'une des commandes a été enregistrée. Le conducteur a effectué lui-même les mesures grâce à une poignée de commande fixée à portée de la main. Les mesures ont duré environ une demi-heure tout compris.

Nous avons alors décidé de remonter au jour développer le film. Ce qui a été fait entre 16 et 17 H.30. Puis les films étant satisfaisants nous sommes descendus à nouveau et, aidés d'un porion, nous avons profité du briquet pour détacher la chaîne. A 19H.30 nous étions au jour après avoir pris quelques photographies.

MARDI : Le mardi matin nous avons prévu de faire un film et les mesures de dimension. Nous avons rencontré le Docteur KESSLER qui nous a donné quelques indications, nous signalant notamment qu'il observait des anomalies vertébrales, mais qu'il était difficile de distinguer les effets des différents facteurs autres que la conduite des engins. Il a insisté sur le rôle aggravant que jouent sans doute les secousses. C'est un homme coopérant, qui connaissait WINER d'après les publications faites chez RENAULT. Il s'est plaint d'être la proie de trop de mineurs qui exploitent des tours de rein qu'ils se sont faits dans leur jardin, pour en tirer des pensions et mille autres petits ou grands avantages.

Nous sommes descendus au fond et nous sommes rendus dans les galeries choisies pour le film. De toute évidence l'endroit avait été sélectionné de façon à ce que les galeries soient bien nettes, le sol bien plat. Après environ une heure de travail nous avons pris les quelques séquences nécessaires pour avoir une idée du fonctionnement de l'engin.

Encore une fois l'engin comme le personnel était à notre disposition. Et nous avons terminé ces mesures par une vérification des cotes du poste de conduite.

A midi l'ensemble des mesures était terminé sans aucune hâte et avec le maximum de facilités. Les nombreuses allées et venues entre les chantiers et les puits (2 km environ) que nous avons dû faire pour assurer à notre travail la souplesse nécessaire ont été facilitées par la mise à notre disposition de tous les moyens de transport utilisables suivant les heures.

L'après midi nous avons rendu compte de notre travail au directeur de la mine, Monsieur CHERVET qui s'est étonné de la fin précoce de notre séjour. Il nous attendait pour une semaine environ et a été intéressé par l'idée de nous envoyer un siège à essayer en laboratoire.

Puis nous avons fait une visite à l'atelier où seront construites à partir de Janvier, les chargeuses WAGNER. Nous y avons rencontré Monsieur GODEL qui nous a dit avoir commandé des sièges BREMSHEY qui donnent satisfaction dans le bassin où plusieurs chargeuses WAGNER sont en service.

2 - Observations générales :

Le climat de cette campagne de mesures a donc été très favorable, puisque nous avons été bien reçus, aidés efficacement et avons réalisé le programme des essais précis en peu de temps malgré des difficultés techniques certaines, et ceci sans gêner trop la production.

On peut être étonné de la très courte durée de notre séjour et des essais. Nous avons voulu essayer de tester la valeur d'une intervention ergonomique courte, très soigneusement préparée et portant sur des objectifs limités. Si les résultats sont décevants cela doit être attribués à notre conception et à nos hypothèses, mais pas aux conditions de travail local. Nous pouvons donc espérer tirer de cette campagne quelques enseignements.

Ceci dit la mine de Moutiers prévoit quelques particularités qui diminuent quelque peu la valeur de cet exemple. Tout d'abord le personnel y est déjà très réduit, il flotte dans un vêtement trop grand et a visiblement plus de matériel qu'il ne lui en faut, la production ayant été réduite de trois fois. Des licenciements vont encore intervenir au mois de Mars, chacun se tient donc sur ses gardes et est particulièrement disposé à bien accomplir les vœux du patron, par qui nous étions expressément envoyés. Ensuite il est vraisemblable que dans sa stratégie de direction Monsieur CHERVET ne néglige pas d'effectuer des recoupements, il s'est déjà penché très attentivement sur le problème du conducteur de la chargeuse. Il est en possession de documents qui lui indiquent qu'il est difficile d'améliorer la situation et est sans doute prêt à nous laisser patauger pour bien montrer qu'il a fait tout ce qu'il a pu.

Des progrès peuvent être faits si nous savons exploiter certaines contradictions comme par exemple celle qui consiste à trouver, car beaucoup se résume ainsi un siège de 1000 F. sur un engin de 250 000 F., et celle qui veut que le siège d'origine n'existe plus sur aucun des engins actuellement en service. Mais ceci relève maintenant de la discussion orale.

3 - PROTOCOLE D'ESSAIS.

Les mesures de vibrations que nous avons à effectuer sur la chargeuse WAGNER ST4 ont été menées à bien grâce au matériel suivant :

- Un enregistreur photographique A1322 avec générateurs 22 V 1000 Hz et démodulateurs afin d'alimenter les capteurs d'accélération.
- La source de tension était constituée de piles 30 V.
- Les récepteurs étaient cinq galvanomètres à cadre mobile et un signal électromagnétique; les transmetteurs, des accéléromètres à mutuelle induction, et un micro contact mesurant la fréquence d'utilisation des commandes.

L'ensemble de la chaîne avait été monté et essayé en laboratoire. Suivant le protocole d'essai il a été prévu de mesurer les vibrations à trois niveaux, plancher de l'engin, bassin et thorax du conducteur.

Nous avons donc disposé sur des trièdres montés sur des supports trois capteurs placés suivant trois axes : Vertical - Longitudinal - antéro postérieur, ces capteurs étant repérés de façon à effectuer les branchements sans perte de temps. Le support des moyens d'enregistrement fut fixé sur l'engin à proximité du conducteur. C'est celui ci qui effectua les mesures, la poignée de commande de l'enregistreur se trouvant à proximité.

Les capteurs d'accélération furent placés aux différents niveaux choisis : plancher - bassin, grâce à un montage de cuvette de siège fixé par des sangles au conducteur, et thorax avec une fixation par sangles élastiques.

Le micro contact fut soudé sur l'aile de l'engin, la liaison avec la commande se faisant par un ressort.

Comme nous disposons de trois fois trois capteurs, la première mesure se déroula en enregistrant les vibrations recueillies au plancher dans les trois directions ainsi que les capteurs verticaux bassin et thorax pendant un trajet complet chargement, manoeuvres, déchargement. La vitesse de défilement du papier enregistreur étant de 30 mm/s puis pendant une portion de marche arrière, engin chargé, à vitesse de défilement du papier 150 mm/s.

La deuxième partie consista à mesurer les vibrations verticales au plancher de l'engin dans les trois axes au bassin, et verticalement au thorax.

Enfin la troisième partie, les mesures furent faites verticalement au plancher et au bassin et dans les trois axes au thorax.

Entre chaque phase d'enregistrement il était nécessaire de faire les commutations de capteurs, et d'effectuer le réglage du zéro.

Une pièce du dispensaire de la mine transformée en chambre noire nous permit de développer la bande enregistrée.

Les résultats étant satisfaisants, la chaîne fut démontée le soir même de notre arrivée, l'ensemble des mesures de vibrations ayant demandé une journée de travail.

La matinée du lendemain fut consacrée à la prise d'un film nous permettant de mieux connaître les conditions dans lesquelles évolue l'engin. La chargeuse et la rame de berlines furent déplacées vers un autre lieu de chargement, ceci nous permettant de travailler dans les meilleures conditions. La caméra utilisée était une Ciné Kodak Spéciale. Le film kodak tri X. Aucun éclairage existant dans la mine, un projecteur de 1 Kw fut utilisé.

Le film fut pris sur le trajet de l'engin, au point de chargement, de déchargement et entre ceux-ci. Profitant du changement de la rame de berlines, nous avons pu effectuer les mesures de dimensions du poste de conduite, ainsi que prendre des photographies de celui-ci (il est à conseiller de prendre des photographies du poste dans les trois plans suivant lesquels le schéma du poste est effectué, et de placer sur l'engin des références permettant de réparer approximativement les oublis ayant pu intervenir).

caaw. 04/0(3)

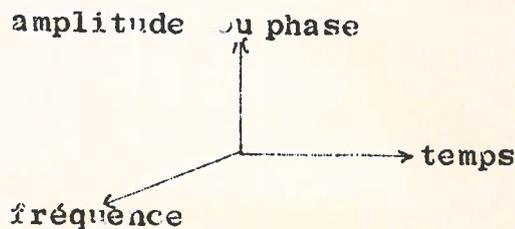
ETUDE PHYSIQUE D'UNE SOURCE DE VIBRATION

Ce qui suit rappelle les concepts essentiels pour l'analyse de la plupart des vibrations. Ces concepts et les méthodes de mesure indiquées servent dans l'analyse d'un très grand nombre de fonctions oscillantes (Vibrations stationnaires ou transitoires, chocs, bruits, électroencéphalographie, électromyographie...).

Les quatre paramètres les plus importants pour caractériser une vibration sont :

- le temps t (en secondes par exemple)
- la fréquence f (en cycles par secondes), ou son équivalent la pulsation $\omega = 2\pi f$ en radians par seconde
- la phase en degrés ou en grades
- l'amplitude (en unités de longueurs, de vitesse, d'accélération, etc...).

Analyser une vibration revient à étudier les variations de ces différents paramètres les uns par rapport aux autres. Le trièdre ci-dessous schématise les combinaisons possibles.



On obtiendra successivement :

- dans le plan amplitude-temps : l'"histoire" de la vibration (x en fonction de t) qui donne lieu à l'analyse de l'amplitude.
- dans le plan amplitude-fréquence : l'analyse de fréquence (ou analyse spectrale)
- dans le plan fréquence-temps : l'analyse sonagramme.

Nous dirons quelques mots de l'analyse par corrélation

I/ - ANALYSE DE FREQUENCE, ANALYSE DE L'AMPLITUDE.

1) - Vibrations sinusoidales

Une vibration sinusoidale se caractérise par le fait que le mouvement se produit à une fréquence f donnée, avec une amplitude maxi x_m constante et une amplitude instantanée $x(t)$ de la forme :

$$x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi) \quad \varphi \text{ constant}$$

Analyse de fréquence. Il n'y en a pas à faire, il suffit d'obtenir sur un papier le tracé du mouvement pour calculer ω et f .

Analyse de l'amplitude. On peut mesurer directement sur le tracé l'amplitude maxi $x_m(t)$. Mais on sait faire une description plus complète de l'amplitude : on peut calculer sa valeur moyenne \bar{x} , sa valeur quadratique moyenne $\sqrt{\overline{x^2(t)}}$ ou plutôt la racine carrée de $\overline{x^2(t)}$ que l'on note σ

Rappelons que pour une fonction $x(t)$ quelconque :

La valeur moyenne est $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$

La valeur quadratique moyenne est $\bar{x}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$ avec

$$\sigma = \sqrt{\bar{x}^2}$$

Autres descriptions

Il est commode de considéré un mouvement sinusoidal comme la projection sur l'axe ox du mouvement d'un vecteur d'amplitude x_0 tournant autour de 0 avec la vitesse angulaire ω . Une telle représentation permet d'assimiler la vibration à une grandeur dite "complexe" exprimée par un "nombre complexe". Ce qui, a son tour, permet de simplifier les calculs concernant ce type de vibrations.

On dit que l'amplitude instantanée $x(t)$ est la partie réelle de la vibration complexe $X(t)$

$$X(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)$$

j = symbole des "imaginaires" $j(\omega t + \varphi)$

on démontre que $\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi) = e^{j(\omega t + \varphi)}$
et on exprime la vibration complexe sous la forme: $X(t) = x_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$

2) - Vibrations périodiques.

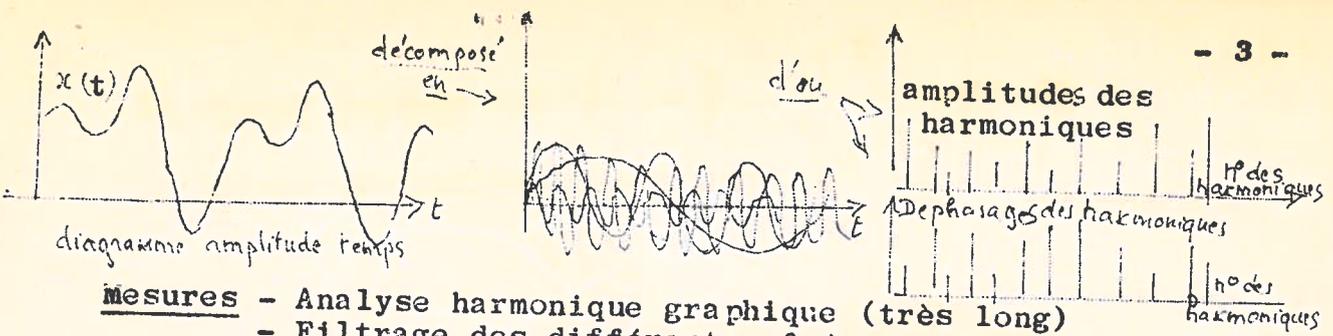
L'amplitude instantanée d'une fonction périodique est du type $x(t) = x(t + nT)$ ce qui veut dire qu'elle reprend la même valeur au bout d'un temps T . Pour étudier une telle vibration on démontre qu'on peut la décomposer en une somme de sinusoides appelées harmoniques. On dit qu'on décompose la vibration en série de Fourier.

L'amplitude instantanée est alors de la forme $x(t) = x(t + nT) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$

- ou ω est la pulsation dite fondamentale
- C_n est l'amplitude de l'harmonique n
- $n\omega$ est la pulsation de l'harmonique n
- φ_n est la phase de l'harmonique n

Le vecteur représentant la vibration sera donc la somme des vecteurs représentant les différentes harmoniques.

Pratiquement on aura décrit la vibration lorsqu'on disposera (1) du diagramme $x(t)$ en fonction de t ; (2) des amplitudes et des déphasages des divers harmoniques. La figure 1 récapitule les différentes étapes d'une telle étude.



- Mesures** - Analyse harmonique graphique (très long)
 - Filtrage des différentes fréquences par des filtres électriques (précis)
 - Analyse vectorielle wattmétrique
 (ne donne pas les déphasage entre les diverses harmoniques).
 - Analyse par calculatrice : on prend une période de la vibration, on la découpe en un certain nombre d'éléments (20, 50, 100) et on tabule les différentes valeurs de l'amplitude ainsi obtenue. On introduit ces valeurs dans une calculatrice programmée pour faire l'analyse de Fourier. La machine donne directement les amplitudes des différentes harmoniques et de leurs déphasages. Un programme de synthèse permet de reconstituer la courbe initiale. Cette méthode est très précise.

En somme il faut retenir que pour analyser une vibration périodique on peut la décomposer en une dérie discontinue de sinusoides et la représenter par un tableau de valeurs numériques (amplitudes et phases des harmoniques et de la fondamentale.)

3) Vibrations aléatoires
 a - Analyse spectrale

... une série discontinue de sinusoides. On cherche leur dérivée (la dérivée de la composition...)

Ces vibrations contiennent théoriquement toutes les fréquences et de façon imprévisible, on ne peut donc pas les décomposer en fractions de la fréquence. Pour cela on garde le principe de la décomposition de Fourier. On démontre que la série de Fourier doit être remplacée par sa limite si la fréquence de la fondamentale tend vers zéro: L'intégrale de Fourier

Si $x(t)$ est la vibration aléatoire $x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$
 avec $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$

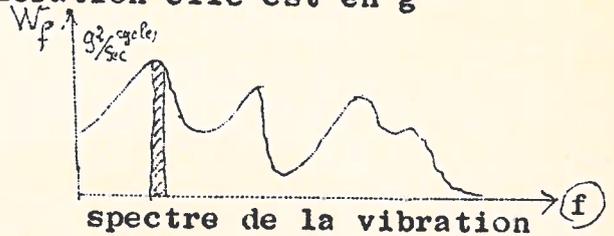
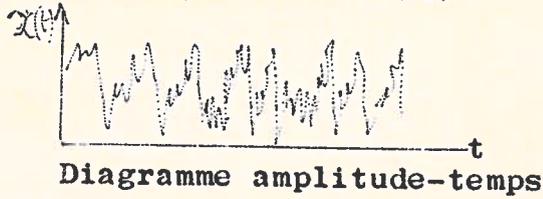
ce qui définit la densité spectrale $S(\omega)$ qui est une mesure de l'"intensité" ou de la "densité" des vibrations (ou des fréquences f) présentes dans la vibration.

On démontre que $\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt$
 T = période = $\frac{1}{f}$

$S(\omega)$ est donc une moyenne quadratique par unité de fréquence. Elle s'exprime en valeurs quadratiques moyennes par radian par seconde. On obtient donc une courbe continue ou spectre de la vibration aléatoire. La surface entre la courbe et l'axe des fréquences représente la moyenne quadratique totale de $x(t)$

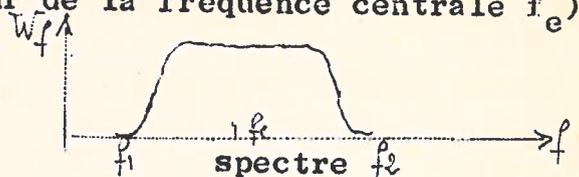
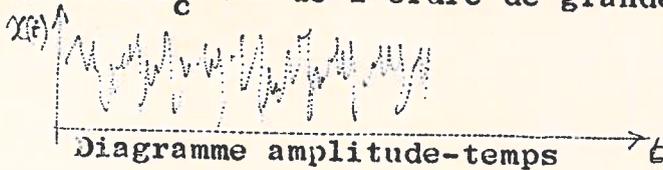
On utilise pratiquement le symbole $W_f = 4\pi S(\omega)$ -
 W_f est la densité spectrale mesurée; elle s'exprime en valeurs moyennes quadratiques par cycles par secondes

. Dans le cas des mesures d'accélération elle est en g^2 par cycle par seconde. (I).



CAS PARTICULIERS.

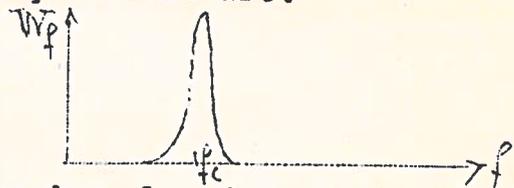
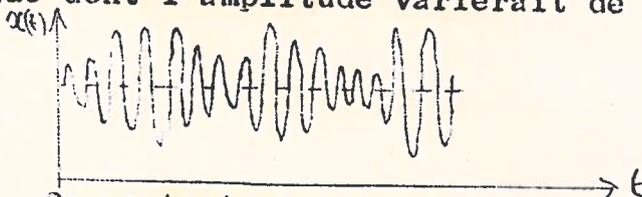
Spectre à bande large. C'est le spectre d'une vibration aléatoire qui ne contient qu'un nombre limité de fréquences (Alors qu'une véritable vibration aléatoire contient toutes les fréquences) La largeur de la bande est grande par rapport à la fréquence centrale f_c (ou de l'ordre de grandeur de la fréquence centrale f_c).



Dans ce cas l'intégrale de Fourier est prise de ω_1 , à ω_2 ou lieu de $-\infty$ à $+\infty$. La plupart des spectres aléatoires rencontrés dans la réalité sont de ce type (Par exemple le "bruit blanc" d'un générateur qui fonctionne entre deux fréquences).

Spectre à bande étroite. C'est le spectre d'une vibration aléatoire qui n'a de valeurs significatives que dans une bande de fréquence étroite par rapport à la grandeur de la fréquence centrale.

La vibration correspondante a les caractéristiques d'une sinusoïde dont l'amplitude varierait de façon aléatoire.



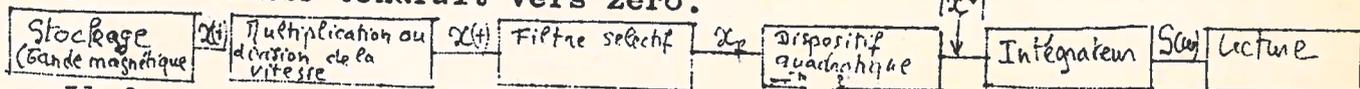
On rencontre ce type de vibration dans la réponse d'un système de masses suspendues excité par une vibration aléatoire. Ceci permet la prévision de l'ampleur des mouvements d'un tel système avant sa réalisation ou pour le modifier une fois réalisé (ex. : véhicule sur un terrain).

...

(I) - Une autre définition de la densité spectrale est la suivante : c'est la valeur limite de la réponse quadratique moyenne $|\bar{x}|^2$ d'un filtre sélectif parfait (gain zéro en dehors de la bande passante, gain 1 dans la bande passante, qui a une courbe caractéristique rectangulaire) divisée par la largeur de la bande passante du filtre lorsque cette largeur tend vers zéro. C'est d'ailleurs ainsi qu'on mesure pratiquement la densité spectrale. (Seulement la largeur de bande des filtres n'est pas vraiment nulle).

MESURES -

Le schéma ci-dessous indique les principales étapes de l'analyse spectrale. Nous avons indiqué un dispositif multiplicateur de vitesses qui est particulièrement intéressant pour l'étude des basses fréquences. Le schéma propose l'utilisation d'un seul filtre en changeant la vitesse de la bande magnétique. On peut aussi utiliser une vitesse unique et une batterie de filtres. La mesure réalisée est toujours une approximation puisque pour satisfaire à la théorie il faudrait disposer d'un filtre parfait dont la largeur de bande tendrait vers zéro.



Il faut retenir de l'analyse spectrale qu'on décrit la vibration par une fonction continue de la fréquence. Contrairement aux vibrations périodiques pour lesquelles on connaît exactement la valeur numérique des différents harmoniques on ne dispose que d'une courbe représentant les valeurs les plus probables de l'intensité (moyenne quadratique) des différentes fréquences.

b - Analyse de l'amplitude d'une vibration aléatoire.

La connaissance que l'on a de la valeur instantanée d'une vibration aléatoire $x(t)$ à un instant donné ne fournit aucune information sur la valeur qu'elle prendra à un instant ultérieur. On sait seulement qu'il y a une certaine probabilité pour que sa valeur soit située à l'intérieur d'un certain domaine de valeur. C'est-à-dire qu'on ne peut le décrire qu'en termes statistiques.

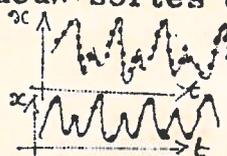
On connaît l'emploi ^{en} statistique classique des notions de :

- Densité de probabilité - La densité de probabilité $p(x)$ mesure la probabilité pour que la fonction $x(t)$ soit comprise entre x_1 et $x_1 + dx_1$.

- La probabilité cumulative - La probabilité cumulative $P(x \geq)$ est la probabilité pour que $x(t)$ dépasse une certaine valeur. On normalise les courbes en considérant le rapport $\frac{x}{\sigma}$. La probabilité cumulative est alors $P(\frac{x}{\sigma} \geq)$

Ceci posé on peut s'intéresser à deux sortes de valeurs de l'amplitude d'une vibration aléatoire :

- ses valeurs instantanées x_1
- ses valeurs maximales x_m



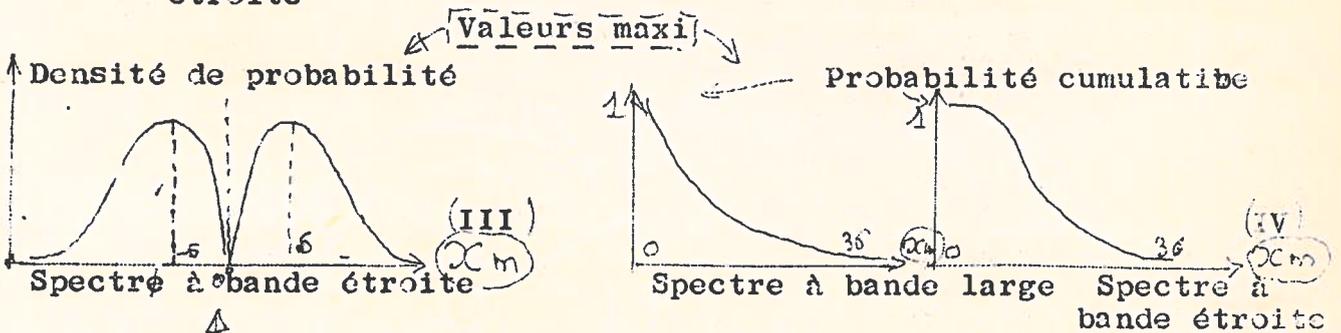
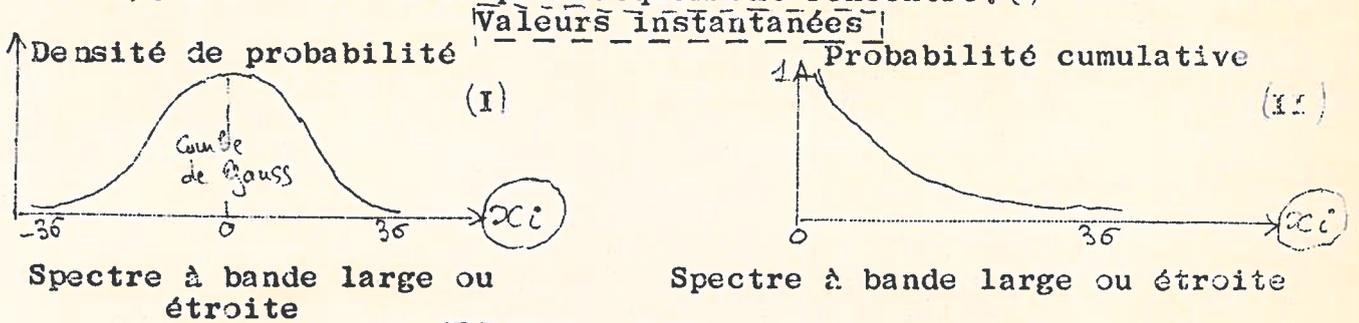
Le tableau ci-dessous indique les différentes analyses possibles et donc les différentes courbes que l'on peut obtenir.

	Densité de probabilité	Probabilité cumulative
(cc) Valeurs instantanées...	I	II
(cc) Valeurs maxi.....	III	IV

.....

Exemple :

Les courbes ci-dessous donnent quelques exemples de courbes dans le cas d'une vibration gaussienne à bande large ou étroite. Une vibration gaussienne est une vibration pour laquelle la distribution des amplitudes instantanées est une loi normale (ou de Gauss). C'est le cas le plus fréquemment rencontré. (1)



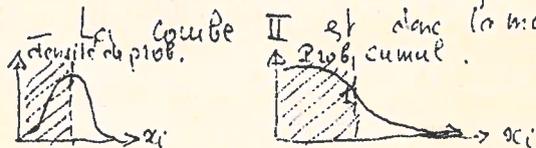
(Distribution de RAYLEIGH).

MESURES. L'ensemble des résultats obtenus ci-dessus montre que l'analyse de l'amplitude d'une vibration aléatoire ne tient pas compte de la fréquence. On peut bien sûr appliquer les différents concepts à l'analyse de la vibration globale. On utilisera pour cela des compteurs statistiques de niveaux ou de la tabulation manuelle.

Si on veut utiliser la théorie correctement on doit filtrer la vibration et les fonctions de probabilité doivent être les signaux de sortie $x'(t)$ d'un filtre sélectif appliqué à la vibration aléatoire $x(t)$.

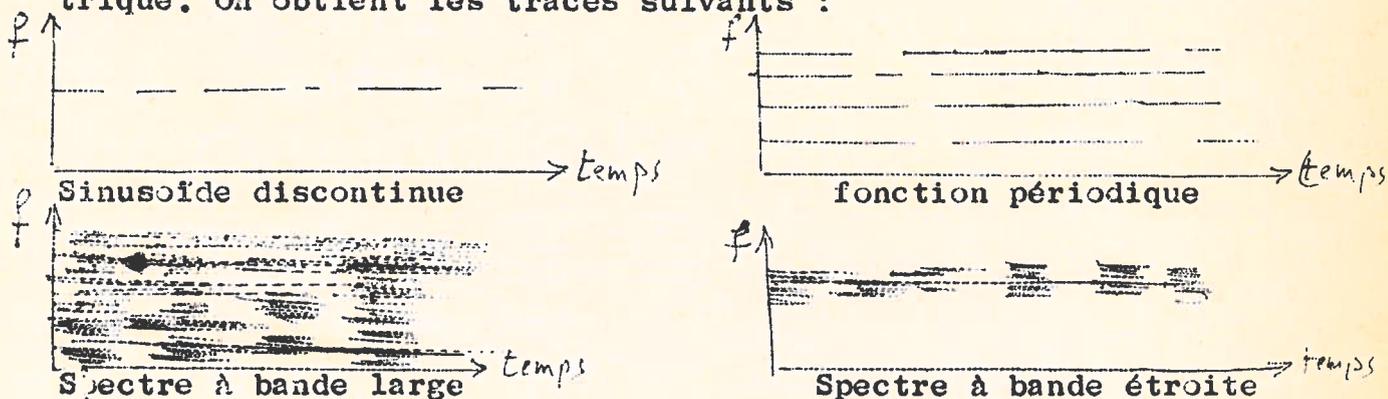
On peut alors utiliser diverses techniques et en particulier des papiers de probabilité. Ces techniques permettent de caractériser l'amplitude de la vibration par des paramètres simples dont on pourra facilement étudier la variation.

(1) les courbes de probabilités cumulatives sont dessinées seulement pour des valeurs positives de x (de 0 à 3σ) d'une origine de Gauss classique.



II/ - ANALYSE FREQUENCE - TEMPS

Quelle que soit la nature de la vibration on peut obtenir la variation de la fréquence en fonction du temps. Cette méthode permet de faire en même temps une analyse de fréquence et l'étude de la répartition temporelle des différentes fréquences. La technique utilisée consiste à envoyer le signal analysé dans une batterie de filtres. Suivant l'intensité du courant sortant du filtre un papier spécial sera plus ou moins brûlé par un petit arc électrique. On obtient les tracés suivants :



Ceci est intéressant pour voir si les phénomènes vibratoires sont continus, intermittents et pour chiffrer exactement leur répartition temporelle. On l'obtient avec un appareil nommé sonographe d'où le tracé de sonagramme.

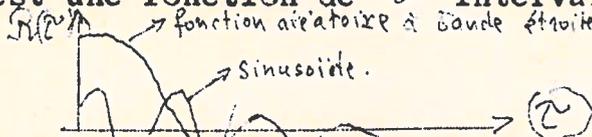
III/ - ANALYSE PAR CORRELATION.

Autocorrélation. On fait l'étude de la vibration en effectuant la moyenne temporelle du produit des valeurs instantanées d'une fonction $x(t)$ à deux instants t et $t + \tau$

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot x(t + \tau) dt$$

$R_x(\tau)$ est la fonction d'autocorrélation.

$R_x(\tau)$ est une fonction de τ intervalle entre les 2 mesures.



Corrélation croisée même chose entre deux fonctions $x_1(t)$ $x_2(t)$

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x_1(t) \cdot x_2(t + \tau) dt$$

$R(\tau)$ est la fonction de corrélation croisée

On démontre que la connaissance de $R(\tau)$ entraîne la connaissance de $S(\omega)$ et réciproquement. L'étude de $R(\tau)$ peut être intéressante lorsqu'il y a un bruit de fond important.

Rapport d'Activité

A. BERTHOZ - Attaché de Recherche

Laboratoire de Physiologie du Travail du C.N.R.S.

(Pr. J. SCHERRER)

Entre le mois de Janvier et le 1^{er} Octobre 1965 (1) le travail concernant les vibrations de basses fréquences (1-20 Hz) qui avait été entrepris au cours des années précédentes a été poursuivi sous la direction du Dr. A. WISNER.

1- La recherche des modes oscillatoires de divers véhicules sur le terrain a été complétée par l'étude d'un tracteur lourd (CR 8) - les accélérations à divers niveaux du poste de conduite (Plancher, Siège, Thorax et tête du conducteur) ont été mesurées. L'enregistrement magnétique des vibrations a permis d'établir des spectres de fréquence dont nous avons assuré l'interprétation.

Les résultats confirment les conclusions de l'étude précédente sur la Chargeuse Michigan: ce type de véhicule oscille suivant des fréquences déterminées qui correspondent à deux mouvements composés de galop et de pseudo rebondissement.

On a exploré les possibilités d'une analyse statistique de l'amplitude des accélérations qui faciliterait la comparaison entre divers véhicules ou l'évaluation de l'efficacité de certaines modifications destinées à modifier les oscillations.

2- En laboratoire, sur table vibrante, divers sièges ont été essayés en vue de leur adaptation sur des véhicules donnés (Chargeuse et tracteur agricole)

(1) Date à laquelle le Service Militaire a interrompu les recherches en cours.

Leur courbe de réponse peut ainsi être déterminée, ce qui, connaissant les oscillations des véhicules fournit d'utiles renseignements d'une part, pour la conception de dispositifs de protection et d'autre part, pour l'étude physiologiques des conséquences de l'exposition aux vibrations.

On peut estimer qu'actuellement les sièges constitués de systèmes à ressorts et amortisseurs passifs, s'ils protègent l'Homme des chocs ou des hautes fréquences dues au moteur, lui communiquent des déplacements et des accélérations d'amplitude excessive.

Les déplacements relatifs entre les masses du corps humain sont un critère de la sévérité des oscillations. Mais si les déplacements thoraco-abdominaux sont bien connus, on manquait de données concernant les mouvements du thorax par rapport au rachis et les mouvements de la tête.

Des mesures d'accéléérations et des enregistrements photographiques ont donné, pour des vibrations verticales, une évaluation numérique de l'amplitude des déplacements du thorax devant le rachis, lui même relativement rigide. En ce qui concerne la tête on observe entre 4 et 6 Hz, suivant l'amplitude de l'excitation, qu'elle est animée d'un mouvement de rotation autour de la colonne vertébrale cervicale. Tout se passe comme si, pour ces fréquences, les muscles de la nuque ne compensaient plus de façon continue les tensions qui leurs sont imposées par la tête. L'électromyographie des muscles de la nuque a révélé que, lorsqu'on augmente la fréquence, à l'activité tonique de repos se substitue, à partir de fréquences variant entre 2 et 4 Hz suivant l'amplitude de l'excitation, une activité intermittente qui pouvait provenir d'un défaut de régulation centrale ou d'un phénomène réflexe du type myotatique.

3 - Le travail réalisé depuis deux ans a constitué la matière d'une Thèse de Docteur-Ingénieur dont la soutenance a été reportée, pour des raisons de service militaire, au mois de Mars 1966.

MODELES ET TECHNIQUES pour l'ETUDE des VIBRATIONS
ALEATOIRES SUBIES PAR L'HOMME -

par A. BERTHOZ (Laboratoire de Physiologie
du Travail du C.N.R.S.) -

Nous avons cherché à vérifier sur des modèles la généralité des résultats obtenus précédemment sur des engins de chantier et concernant la transmission à l'homme des vibrations de basse fréquence.

Puis, en prenant comme exemple des véhicules lourds à pneumatiques (chargeuse-pelleteuse, tracteur lourd, tracteur agricole) et à chenille (Bulldozer), nous avons tenté de préciser une méthode pour mesurer et représenter les processus vibratoires réels. Cette étude bio-mécanique est un préalable indispensable à l'élaboration de critères de tolérance.

Etude Théorique:-

1°.- Les modèles de masses suspendues montrent que le mouvement de la plupart des véhicules à pneumatiques, se décompose en un galop et un pseudo-rebondissement qui se combinent de façon complexe mais prévisible. La connaissance du rayon de giration de chaque véhicule faciliterait la prévision de ses modes d'oscillations.

2°.- Le calcul de la réponse d'une masse suspendue à une excitation aléatoire (ce qui rend compte d'un grand nombre de cas), permet de prévoir, par analogie, la réponse d'un véhicule donné à l'excitation par le sol. Cette réponse se fera à des fréquences déterminées, quel que soit le sol. Seule l'amplitude des oscillations reste un paramètre essentiellement variable. On nomme ce type de réponse: processus aléatoire à bandes étroites. Ceci reste valable sous certaines réserves lorsqu'on superpose plusieurs masses suspendues ou lorsque le système est non-linéaire. Il est très difficile de modifier les fréquences d'oscillations des véhicules une fois qu'ils sont réalisés.

Détermination expérimentale des réponses.-

Nous avons mesuré les composantes de l'accélération dans les trois directions de l'espace en divers points du poste de conduite et du corps du conducteur, suivant la technique proposée par Wisner.

Les réponses ont été analysées grâce à des "coupes" des processus vibratoires enregistrées sur le terrain:

1°.- Les variations de l'amplitude de l'accélération en fonction du temps permettent une analyse sommaire mais rapide.

2°.- Des analyses de fréquence donnent la répartition de l'énergie vibratoire dans différentes bandes de fréquence. Elles montrent, conformément à la théorie et aux mesures faites précédemment; que les spectres des oscillations sont composés, dans les basses fréquences (1 à 6Hz) de une ou deux pointes. Celles-ci correspondent au galop et au pseudo-rebondissement. La position relative de ces deux pointes donne des renseignements sur la portée des modifications que l'on peut apporter à la stabilité dynamique des véhicules. La pureté des fréquences d'oscillations exige une précision en fréquence de quelques dixièmes de Hertz? Ceci prouve que l'on ne peut pas utiliser pour l'analyse des vibrations mécaniques les méthodes de l'analyse des bruits pour lesquels des analyseurs à bandes d'octave suffisent.

Les analyses de fréquences confirment l'extrême amplification introduite entre le plancher du véhicule et les masses du corps humain.

3°.- L'analyse de fréquence ne peut pas donner en même temps une bonne description des variations d'amplitude. On a cherché jusqu'ici à exprimer les seuils de tolérance aux vibrations en seuils absolus ou en valeurs moyennes. Il semble préférable d'exprimer ces seuils en termes probabilistes, plus proches de la réalité aléatoire des variations d'amplitude.

Pour ceci on doit réaliser une analyse statistique des distributions de probabilité des amplitudes et exprimer les résultats en valeurs quadratiques moyennes avec des pourcentages de dépassement. Nous proposons de faire cette analyse sur les amplitudes de crête du signal filtré aux différentes pointes du spectre et non pas seulement sur le signal global comme on le fait traditionnellement. On montre que les résultats peuvent se porter sur des graphiques où les distributions des amplitudes sont représentées très simplement par des droites ce qui permet des évaluations rapides et des essais comparatifs.

On dispose ainsi de modèles et de techniques qui devraient permettre de connaître les vibrations qui sont effectivement transmises à l'homme. Les mêmes méthodes donnent ensuite un moyen pour juger de l'efficacité des dispositifs de protection.

RESUME -

Sur l'exemple de la conduite des engins de chantier, on étudie théoriquement et expérimentalement les propriétés des structures vibrantes. Les modèles prévoient que les oscillations des véhicules sont la combinaison complexe de mouvements simples et que la réponse des systèmes suspendus (véhicule - siège - homme) à une excitation aléatoire se fait à des fréquences déterminées. L'analyse de fréquence et l'analyse statistique des amplitudes confirment les prévisions des modèles et fournissent les moyens de décrire les processus vibratoires subis par l'homme.

SUMMARY -

Based on the example of field vehicles the properties of vibrating structures are studied theoretically and experimentally. The vehicle oscillations result from a complex combination of simple movements.

The response of suspended systems to a random excitation occurs at definite frequencies. Spectral analysis and statistical analysis of amplitudes confirm what was predicted by the models and provide means to describe the vibration processes undergone by man.

Par A. BERTHOZ

(Laboratoire de Physiologie du Travail du C.N.R.S.)

On connaît les inconvénients des critères objectifs concernant la tolérance humaine aux vibrations (Wisner et Coll 1965) et même les plus récents (Coermann 1966) sont loin de donner pleinement satisfaction.

L'établissement des critères physiologiques valables suppose que l'on connaisse au préalable les mouvements des différentes parties du corps; or l'homme est un système biomécanique complexe. Il se comporte comme un système de masses suspendues non linéaire dont les caractéristiques varient suivant la posture adoptée et le travail à réaliser. Bien que certaines résonances des masses corporelles se situent dans une même bande de fréquence (2-7 Hz) (Dieckmann, 1957 - Coermann, 1963, - Wisner, 1965 - Dupuis et Christ, 1966), chacune de ces résonances se produit à une fréquence déterminée et surtout met en jeu des mécanismes particuliers. Les mesures que nous avons faites en utilisant la technique d'accélérométrie décrite par Wisner montre que chez un homme assis soumis à des vibrations verticales sinusoïdales, la partie supérieure du rachis est animée de mouvements verticaux peu différents du bassin du sujet, même lorsque le thorax entre en résonance (4-5 Hz). Le thorax semble osciller devant le rachis. Ceci n'exclue par les mouvements de flexion du rachis mis en évidence par Krause et par Dupuis et Christ.

La tête est animée entre 4 et 7 Hz d'un mouvement de rotation dans le plan sagittal. La fréquence qui correspond au maximum d'amplitude de ce mouvement varie en fonction de l'amplitude de l'excitation.

On observe donc, même lorsque l'excitation est verticale, l'apparition de composantes horizontales; c'est pourquoi nous pensons qu'il est utile de mesurer systématiquement ces composantes. En particulier nous proposons comme indice de la rotation de la tête le module du rapport entre les composantes horizontale et verticale de l'accélération maximale du sommet du crâne.

On peut utiliser ces résultats dans la pratique ergonomique. Lorsqu'on cherche à atténuer les vibrations, même sans pouvoir fixer de limites précises aux niveaux admissibles, la recherche des courbes de réponse des sièges sur table vibrante animée d'oscillations sinusoïdales est la méthode la plus sûre pour connaître les propriétés des sièges et les comparer avec les données propres au corps humain et aux véhicules. Elle nous a permis de montrer que les sièges actuels ne filtrent pas les vibrations au-dessus de 3 à 4 Hz; ceci tient à leur principe mécanique et varie peu malgré l'abondante diversité des réalisations technologiques.

Ceci a orienté des travaux vers la conception des sièges d'un type nouveau, la réalisation pratique de ces sièges comporte quelques difficultés et ne sera une réussite que si elle protège l'homme contre les niveaux vibratoires élevés que nous avons souvent mesuré horizontalement.

Les réglages introduits par les constructeurs sont souvent illusoire, en particulier le réglage en fonction du poids du conducteur.

Afin de permettre la comparaison des résultats de laboratoire et des mesures sur le terrain nous avons cherché quelle était, dans des situations de conduite normale, l'influence de la taille et du poids du conducteur sur les oscillations du système homme-siège. Les mesures accélérométriques faites sur onze sujets conduisant un tracteur agricole, montrent que les mouvements sont très semblables avec des sujets de corpulence très différente. Ceci confirme des mesures faites par Wisner sur table vibrante sinusoïdale et justifie que l'on étudie un modèle mécanique dynamiquement analogue au corps humain qui pourrait être utilisé dans des essais normatifs.

RESUME - Des mesures biomécaniques complémentaires ont été faites sur le système homme-siège. Même pour une excitation sinusoïdale purement verticale, des mouvements horizontaux apparaissent. La rotation de la tête est étudiée. La protection offerte par les sièges actuels est insuffisante mais des sièges nouveaux sont à l'étude et la faible influence de la corpulence des conducteurs sur les oscillations du système homme-siège, ~~permet~~ permet d'envisager pour les essais de sièges, la construction d'un modèle mécanique analogue à l'homme.

SUMMARY - Complementary biomechanical measures have been made on man-seat system. Even in the case of a entirely vertical sinusoidal excitation, horizontal components appear. The rotation of the head is studied.

Unsufficient protection is given by present seats are being studied and the small influence of the drivers corpulence on the oscillations of man-seat system makes it possible to undertake the making of a mechanical model analog to man; this for seat testing.

12

FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE PARIS

LE REFLEXE MYOTATIQUE ET SA REGULATION

2ème THESE pour l'obtention du Diplôme de Docteur-Ingénieur

soutenue par A. BERTHOZ

(Laboratoire de Physiologie du Travail du C.N.R.S. - Professeur J. SCHERRER)

Sujet proposé par Monsieur H. MONOD

JURY : Pr. R. SIESTRUNCK : Président

Pr. agr. H. MONOD

Pr. R. VICHNIEVSKY, Directeur de la Thèse principale

LE REFLEXE MYOTATIQUE ET SA REGULATION

Un organe effecteur comme le muscle peut être activé soit par stimulation directe, soit par l'intervention de la volonté, soit encore par un mécanisme réflexe. Ce dernier mécanisme suppose l'existence d'un " arc réflexe " qui comporte une voie sensible et une voie motrice, articulées dans un centre nerveux en une synapse, dans un grand nombre de cas. La voie sensible est excitée, au niveau de sa terminaison par l'intermédiaire d'un récepteur. La voie motrice détermine l'activation de l'organe périphérique ou effecteur.

Les réflexes ont un certain nombre de propriétés que nous n'étudierons pas ici. Notre attention se portera sur un réflexe musculaire dont le principe est très simple mais la régulation extrêmement complexe : le réflexe myotatique. On appelle réflexe myotatique (de *μυς*, muscle, et *τατος*, étiré), ou réflexe d'étirement, la contraction réflexe d'un muscle provoquée par son propre étirement.

A partir du moment où SHERRINGTON, au début de ce siècle, l'eût mis expérimentalement en évidence, les physiologistes ont cherché à comprendre l'organisation et les mécanismes du réflexe élémentaire, sa coordination avec d'autres réflexes et son contrôle par le système nerveux central. Le réflexe myotatique constitue un système de régulation que les ingénieurs ont essayé de comparer avec des servomécanismes.

En suivant approximativement l'ordre historique des investigations physiologiques, nous allons résumer succinctement ce que l'on sait du réflexe myotatique. Puis nous verrons l'intérêt et les limites du rapprochement que l'on peut faire entre ce phénomène biologique et la théorie des asservissements.

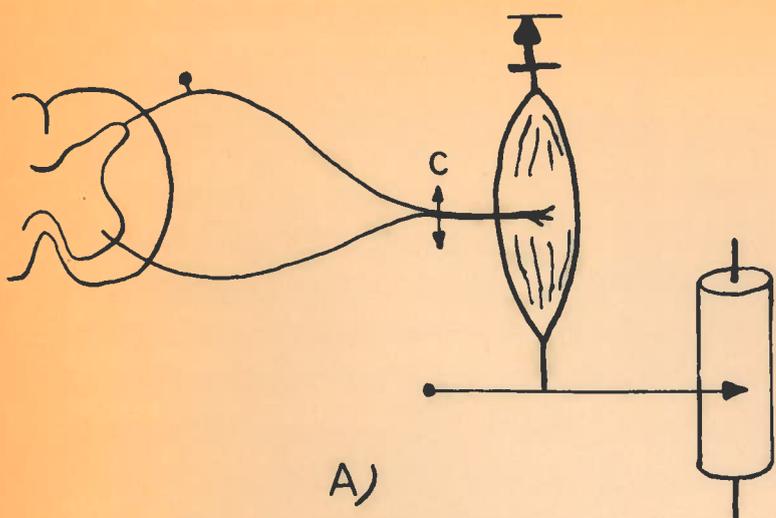
1 - MISE EN EVIDENCE EXPERIMENTALE

Le physiologiste SHERRINGTON a remarqué, au début de ce siècle, qu'un muscle d'animal ayant conservé son innervation, se contracte lorsqu'il est soumis à un étirement. LIDELL et SHERRINGTON, en 1924, ont mis en évidence la nature réflexe de ce phénomène sur un muscle de Chat. Ils ont mesuré la tension développée par le muscle (Fig. 1 A). Lorsque le muscle est étiré de 8 mm (Fig. 1 B) il développe rapidement une tension T (Fig. 1 C) qui se maintient tant que dure l'étirement. Si l'on coupe le nerf en C et que l'on étire ensuite le muscle, celui-ci développe une tension P inférieure à T. Si le nerf est coupé après étirement, la tension décroît brusquement au moment de la section et revient au niveau P qui correspond aux propriétés élastiques du muscle sans innervation. La différence entre les tensions M et P est donc due à la contraction réflexe du muscle.

La contraction réflexe ne se produit que lorsque l'étirement atteint une certaine valeur ou seuil. Lorsque cette condition est réalisée, le temps qui s'écoule entre l'étirement et la réponse est très faible ; la latence est donc courte. La tension développée croît rapidement en fonction de l'étirement, elle est maximale en même temps que lui et cesse avec lui. Le réflexe myotatique est très localisé, seul le muscle étiré ou un groupe restreint de muscles ayant la même fonction dans le mouvement de réaction (muscles synergistes) répond par une contraction.

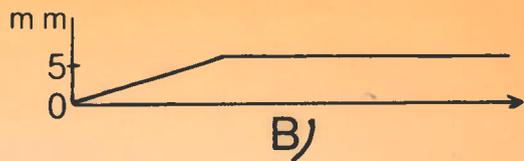
2 - L'ARC REFLEXE ELEMENTAIRE

Lorsqu'on examine un muscle on remarque de petits fuseaux longs de 1 à 2 mm, parallèles aux fibres musculaires. Il y a environ un fuseau pour 100 fibres. Ces fuseaux sont les récepteurs qui sont à l'origine du réflexe myotatique ; ce sont des capteurs de longueur et de tension montés en parallèle avec les fibres musculaires. L'examen au microscope révèle qu'ils sont composés de deux parties extrêmes ou zones polaires, dotées de propriétés contractiles, et d'une partie centrale, ou zone équatoriale

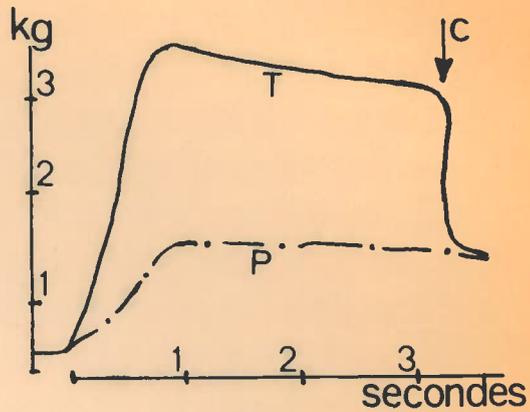


A)

fig.1



B)



C)

fig.2

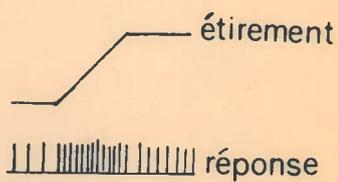
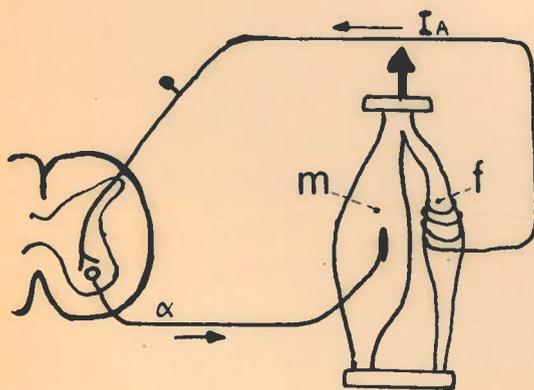
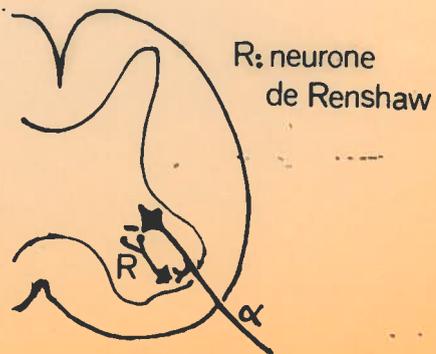


fig.3



contenant de nombreux moyaux. Sur la figure 2 et les suivantes, on a représenté un fuseau (f) en insistant sur le fait qu'il est monté en parallèle avec les fibres musculaires (m).

Des zones équatoriales des fuseaux portent des fibres nerveuses sensibles représentant environ 40 p.100 des fibres contenues dans le nerf reliant le muscle à la moelle épinière. Même lorsque le muscle est au repos on peut enregistrer dans ces fibres une activité électrique de base qui se présente sous la forme de potentiels d'action. L'étirement de la zone équatoriale du fuseau provoque cette décharge et c'est la fréquence des potentiels d'action qui varie lorsque le muscle change de longueur (Fig. 2). Cette fréquence est approximativement une fonction logarithmique de la tension exercée sur le muscle et une fonction linéaire de son allongement. Elle varie de 5 à 10 Hz pour le muscle au repos, à plusieurs centaines de Hz pour le muscle étiré.

Le message nerveux est ainsi codé par un système que des ingénieurs spécialistes de télémétrie nomment une " modulation de fréquence d'impulsion ". Le message aboutit à la moelle épinière dans laquelle il pénètre par la racine dorsale. LLOYD a montré en se servant de diverses techniques d'excitation et d'enregistrement des temps de réponse, que la connection centrale du réflexe myotatique est monosynaptique ; c'est-à-dire que les fibres sensibles sont reliées aux fibres motrices par une seule synapse. Ceci explique le temps de latence extrêmement court de ce réflexe.

Activées par les fibres sensibles, les fibres motrices, ou motoneurones α , sont à leur tour parcourues par des décharges de potentiels d'action dont la fréquence varie avec la force de contraction du muscle qu'elles innervent. Ainsi se trouve constitué l'arc réflexe.

3 - FONCTION DU REFLEXE ELEMENTAIRE - REPOSES TONIQUE ET PHASIQUE

Le réflexe myotatique tel qu'il vient d'être décrit se présente comme un régulateur de tension et de longueur du muscle. Il joue un rôle prépondérant dans la lutte nécessaire au maintien de la posture contre les forces de la pesanteur. Le réflexe myotatique intervient par exemple au niveau des muscles extenseurs des membres inférieurs chez l'Homme.

Mais on a remarqué très tôt que ce réflexe n'était pas distribué de façon homogène dans tous les muscles. SHERRINGTON avait déjà noté une différence entre les muscles " pâles " et les muscles " rouges ". Les premiers soumis à un étirement ont une réponse beaucoup plus rapide (phasique) et des fréquences d'influx sensitif beaucoup plus élevées que les seconds qui donnent des réponses plus lentes et soutenues (toniques) et des fréquences d'influx sensitif basses (7 à 20 hz).

Un étirement brusque du muscle se traduit par une volée d'impulsions qui arrivent toutes en même temps à la moelle à partir des différents fuseaux, on dit que les impulsions sont synchrones. Le récepteur est donc sensible à la variation de longueur au moins autant qu'à sa valeur absolue; ceci est d'ailleurs une propriété assez générale des récepteurs biologiques.

Lorsque l'étirement est maintenu l'activité électrique dans les fibres sensibles consiste en une décharge régulière d'impulsions asynchrones. Les motoneurones excités par ces impulsions répondent avec une fréquence de décharge relativement basse mais de façon asynchrone ; la tension n'est maintenue constante que par une sorte de sommation statistique. Dans le maintien de cette tension, il est vraisemblable qu'interviennent des fibres nerveuses particulières : les neurones de RENSCHAW, qui constituent une boucle de rétroaction du motoneurone α vers la synapse (Fig. 3); semblent aussi responsables de la " période silencieuse " c'est-à-dire la période d'inactivité complète des unités motrices d'un muscle lorsque l'étirement cesse. GRANIT et ECCLES ont d'ailleurs pu distinguer des moto-

neurones " α toniques " et " α phasiques " qui auraient des fonctions différentes.

Bien que nous en ayons beaucoup simplifié la description, c'est bien cette activité réflexe élémentaire, provoquée par un étirement qui constitue le mécanisme fondamental du tonus postural : si l'on sectionne la racine médullaire dorsale (sensible) correspondante au muscle, le tonus disparaît dans celui-ci. Il en va de même en cas de section de la racine médullaire ventrale (motrice) qui, elle aussi, interrompt l'arc réflexe.

4 - CONTROLE ET COORDINATION SEGMENTAIRE DU REFLEXE MYOTATIQUE

Le réflexe myotatique n'est pas le seul réflexe qui puisse survenir dans le muscle étiré, ou dans les muscles voisins innervés par un même segment de la moelle. La coordination entre les divers réflexes segmentaires, c'est-à-dire qui intéressent un même segment de la moelle, et le réflexe myotatique, est réalisée par des mécanismes d'inhibition dont nous allons maintenant donner un aperçu.

4-1 Réflexe myotatique inverse

Lorsque l'étirement d'un muscle dépasse un certain seuil, la contraction disparaît brusquement. C'est la réaction d'allongement décrite par SHERRINGTON. Elle traduit l'inhibition des motoneurones du muscle étiré et trouve son origine dans le muscle lui-même. Plusieurs observations montrent que parmi les fibres sensibles qui parviennent à la moelle on trouve des fibres issues des organes tendineux de GOLGI (Fig. 4 A). Il s'agit donc d'un réflexe distinct du réflexe myotatique. Les fibres sensibles correspondant à chacun de ces deux réflexes sont nommées I_A pour le réflexe myotatique et I_B pour le réflexe myotatique inverse.

Tout se passe donc comme si le réflexe myotatique était inhibé pour un certain étirement. On a pu voir dans ceci un mécanisme de sécurité destiné à protéger le muscle contre des risques de rupture. Mais MATTHEWS

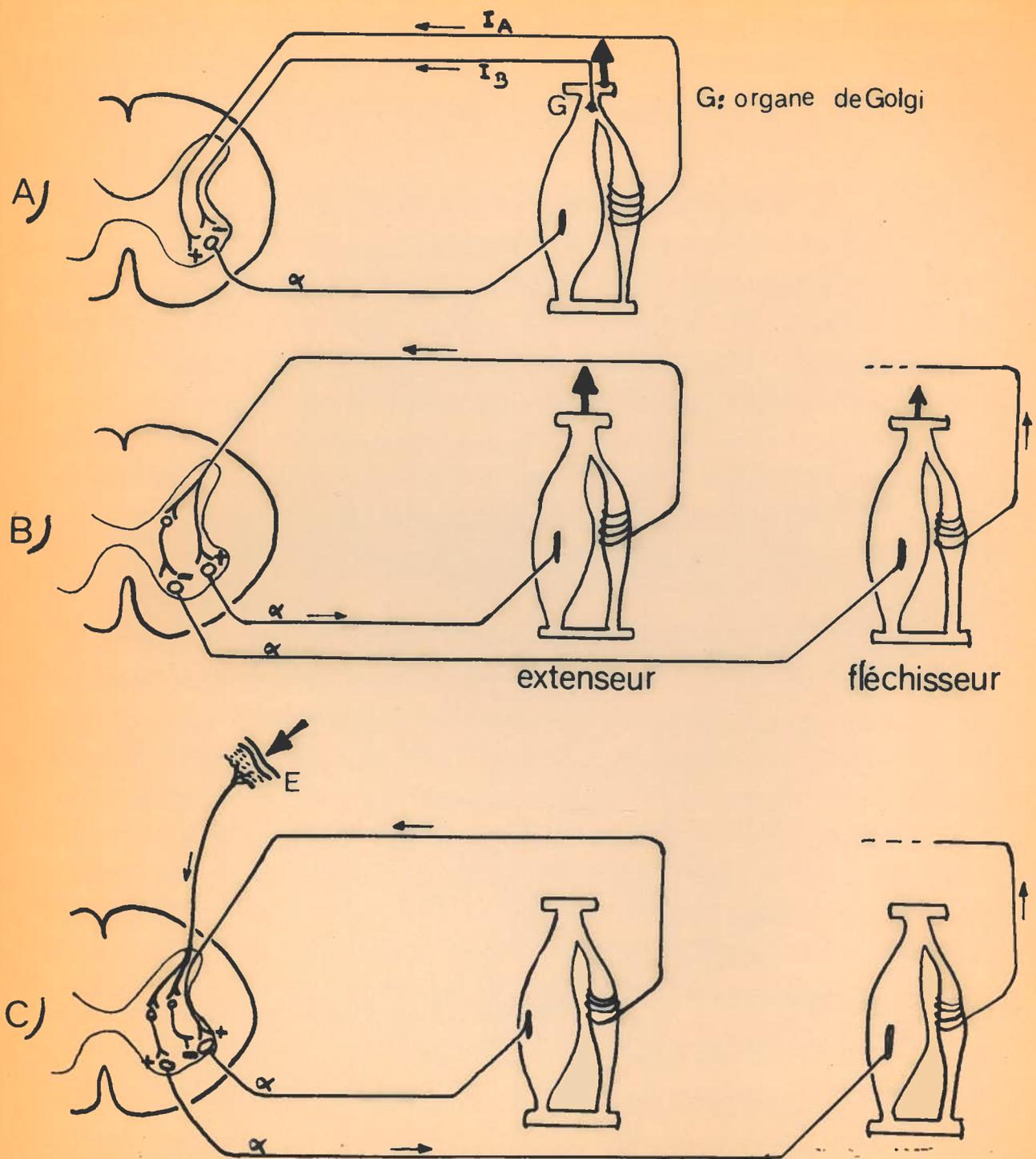


fig.4

s'appuyant sur le fait que les récepteurs de GOLGI sont activés pour des allongements parfois très faibles, n'exclut pas que le rôle du réflexe myotatique inverse soit plus complexe que celui de simple disjoncteur.

4-2 Innervation réciproque. Inhibition par l'antagoniste.

Lorsqu'un muscle extenseur est étiré il se contracte par le jeu du réflexe myotatique. Mais si l'on étire alors le muscle fléchisseur antagoniste la contraction cesse brusquement dans l'extenseur. Et réciproquement l'étirement de l'extenseur inhibe partiellement ou en totalité le réflexe myotatique du fléchisseur antagoniste (Fig. 4 B) . Il y a donc inhibition du réflexe myotatique par étirement du muscle antagoniste. Ceci relève du principe de l'innervation réciproque, condition sine qua non pour que la contraction réflexe puisse se produire et qu'elle ne soit pas bloquée par la contraction du muscle antagoniste.

4-3 Inhibition par les excitations cutanées.

Une excitation cutanée (Fig. 4 C) détermine l'inhibition du réflexe myotatique. La réponse à l'étirement d'un muscle extenseur est en effet inhibée lorsque les fibres sensibles d'un nerf cutané, situé du même côté de la moelle, sont excitées simultanément. Ceci se voit sur un muscle désinséré à l'une de ses extrémités. Il y a donc une connection directe entre les fibres cutanées et les motoneurones α . Il y a inhibition du réflexe myotatique de l'extenseur parce qu'une excitation de la peau entraîne une réaction de retrait qui implique la contraction du fléchisseur et par conséquent l'inhibition de l'extenseur antagoniste comme nous l'avons vu au paragraphe 4-2.

4-4 Régulation par les neurones de RENSCHAW.

Cette régulation sera citée pour mémoire - elle a été évoquée au paragraphe 3.

5. REGULATION CENTRALE DU REFLEXE MYOTATIQUE

5-1 Réseau d'inter-neurones.

La connection la plus simple entre les fibres nerveuses sensibles et motrices dans la moelle épinière ne comporte qu'une seule synapse. Un étirement du muscle provoque donc une décharge monosynaptique rapide ; cependant on enregistre également des décharges diffuses au niveau des nerfs moteurs du muscle étiré ou parfois même d'autres muscles. Ceci indique la possibilité de liaisons à plusieurs synapses (ou polysynaptique). On peut en effet identifier dans la moelle des fibres nerveuses, les inter-neurones qui relient les divers étages de la moelle et auxquels les fibres sensibles envoient des branches collatérales.. Le réseau d'inter-neurones médullaires participe par conséquent à la régulation du réflexe myotatique.

5-2 "Boucle gamma"

Le système nerveux central est donc informé de ce qui se passe au niveau du muscle. Les centres nerveux supérieurs (bulbe, cervelet, formation réticulée, thalamus, cortex cérébral ...) jouent dans la régulation du réflexe myotatique un rôle très important. Mais nous ne cherchons pas à décrire la façon complexe dont ces centres participent au maintien du tonus ou aux réactions d'équilibration. Nous nous contenterons de montrer comment la commande centrale peut agir sur le fonctionnement du réflexe myotatique.

Le système nerveux central agit sur les fibres motrices α dont il règle le niveau d'activité. Mais il peut agir aussi directement sur les fuseaux neuro-musculaires par l'intermédiaire de fibres motrices de petit diamètre qui représentent environ 30 p.100 du contingent des fibres motrices : les fibres " γ ". Elles vont innerver les zones polaires des fuseaux (Fig. 5) . HUNT et KUFFLER en excitant ces fibres γ n'ont obtenu aucune contraction du muscle mais une réponse sensitive. L'excitation des fibres γ déclenche en effet une contraction des zones polaires des fuseaux, la zone équatoriale est donc étirée comme si le muscle l'était lui-même. Ceci provoque une augmentation de la fréquence des influx dans les fibres sensibles

qui peut entraîner à son tour une activation des fibres motrices α .

La fonction de ce circuit comportant la " boucle gamma " est encore mal définie :

a) On s'accorde pour dire que l'activité des fibres γ permet d'éviter un raccourcissement du fuseau pendant la contraction du muscle. En effet, le fuseau délivre une fréquence d'influx proportionnelle à l'étirement de la zone équatoriale. Ainsi grâce aux fibres γ la contraction réflexe peut se produire et même pour un allongement très faible.

La boucle gamma joue donc un rôle d'amplificateur pour des valeurs faibles de l'allongement. Elle adapte la réponse du fuseau aux exigences de sa régulation.

b) On a voulu voir dans la "boucle gamma" une voie de commande qui permettrait au système nerveux central de régler à volonté la longueur du muscle. Il faut se garder de considérer ceci comme clairement établi.

En résumé, le réflexe myotatique est un réflexe proprioceptif, c'est-à-dire renseignant l'organisme sur son propre état, monosynaptique, dont le temps de réponse est très court mais qui se prolonge tant que dure l'excitation. Son point de départ est essentiellement musculaire et non cutané ou articulaire. Sa régulation est assurée par des influences inhibitrices ou facilitatrices de l'étage médullaire, liées ou non à l'activité des centres nerveux supérieurs, ^{et} qui s'exercent dans un sens ou dans l'autre, soit directement sur les motoneurones α , soit par l'intermédiaire de la " boucle gamma ".

6. ANALOGIES AVEC LES SERVO-MECANISMES

6-1 Généralités.

L'idée que le réflexe myotatique peut être analysé comme un système de régulation par la théorie des asservissements a été exposée par MERTON en 1951 et a été depuis reprise et discutée par différents auteurs. ADOLPH et VOSSIUS ont cherché à calculer des fonctions de transfert par des procédés

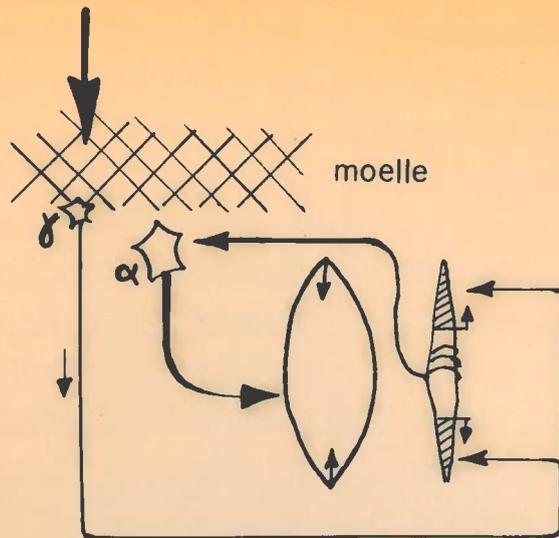


fig.5

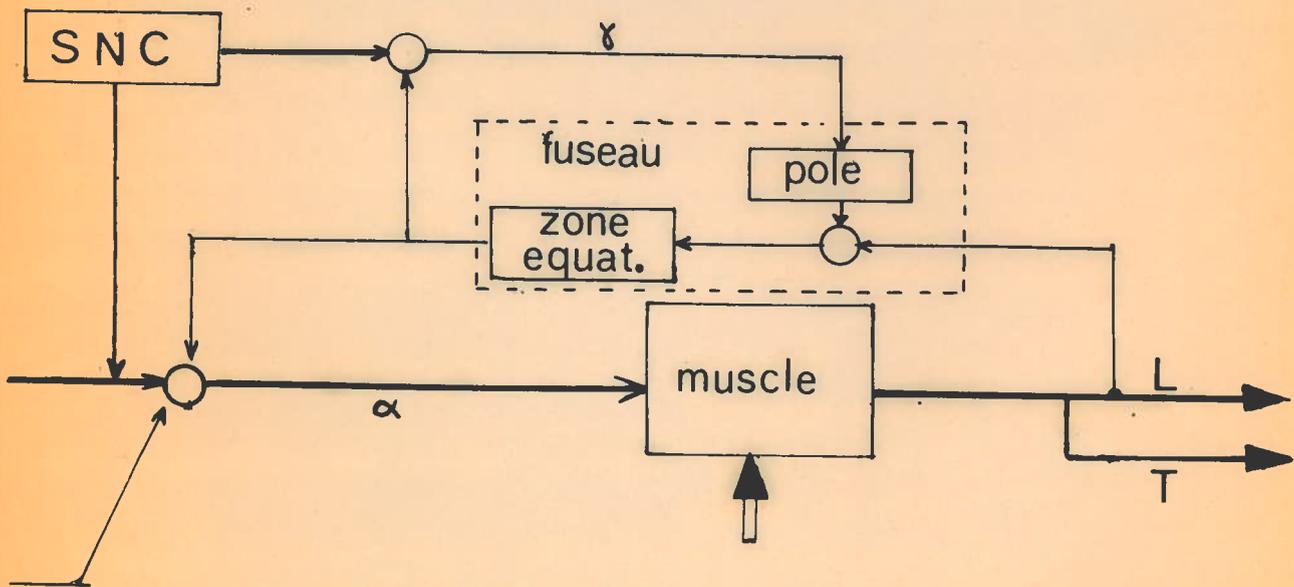


fig.6

mathématiques ; ils ont fait des hypothèses sur la stabilité de la régulation myotatique. PARTRIDGE et GLASER, GRANIT, HENRIKSEN et SUTTON, ont cherché à relier un certain nombre de caractères physiologiques du réflexe au fonctionnement des systèmes bouclés. HUFSCHMIDT et KLACZKO-RYNDZIUM ont proposé un modèle pour étudier le mécanisme de feedback du neurone de RENSHAW. Enfin, quelques auteurs ont vu dans les tremblements de certains malades le signe d'une oscillation accidentelle du servomécanisme musculaire :

"L'argument de base est l'analogie entre le réflexe et un mécanisme de contrôle automatique qui est activé par un signal d'erreur. Cette erreur se produit dans un cycle de contrôle à boucle fermée avec une amplification de puissance" (MATTHEWS) .

En effet, le réflexe myotatique , indépendant du cortex, est bien automatique et son amplification de puissance est formée par la contraction du muscle.

Le signal d'erreur est la différence entre les fréquences de décharge des fibres sensibles lorsque le muscle est au repos et lorsqu'il est allongé . La figure 6 schématise l'asservissement ainsi obtenu ; on doit distinguer toutefois le circuit de régulation élémentaire : muscle-fuseau-fibre sensible-motoneurone α -muscle qu'on appellerait "boucle fermée" dans le langage des asservissements, et la régulation effectuée par la voie gamma.

a) Le premier de ces circuits répond à un certain nombre de caractéristiques des systèmes asservis.

- le feedback est négatif, ce qui est une condition de stabilité du système

- un des grands inconvénients de tous les servomécanismes est qu'il faut un certain délai pour transmettre le signal par la boucle. Ceci conduit à des oscillations de très grande amplitude. Dans le réflexe myotatique cette difficulté a été résolue par le fait que les fibres sensibles sont à la fois sensibles à la valeur absolue de l'allongement et à la variation de l'allongement (vitesse) , ce qui permet une certaine anticipation de l'étirement et accroît l'efficacité de la boucle.

b) Le second, constituant la "boucle gamma", répond, lui aussi à une condition nécessaire au bon fonctionnement du servomécanisme. La boucle gamma se comporte en effet comme un amplificateur d'erreur. Certains auteurs lui accordent aussi un rôle dans l'anticipation des commandes en provenance du système nerveux central.

Mais la plupart des travaux n'ont, en réalité, pas dépassé le stade de l'analogie qualitative entre le réflexe et un système asservi (1). GRANIT a dit d'eux "qu'ils ne montraient guère que ce qui peut être compris intuitivement". Pourtant une équipe d'automaticiens, encouragés par une autre phrase de GRANIT dans la ~~même~~ publication : "Un jour la théorie des servomécanismes pourra peut être faire plus pour nous" a repris récemment le problème. A propos de leur travail, nous allons rappeler rapidement le principe de ce genre d'analogies.

2 Méthode d'étude des systèmes asservis

Le principe fondamental de l'étude des systèmes asservis est que l'on peut obtenir des renseignements sur un système lorsqu'on connaît, soit les équations différentielles qui relient les différents paramètres du système, soit sa fonction de transfert ou rapport entre le signal de sortie et le signal d'entrée.

Les équations différentielles sont en général inaccessibles mais la fonction du transfert peut se matérialiser par des courbes de transfert, ou courbes de réponse du système à une excitation connue. La méthode qui résulte de ceci consiste alors en une double suite d'opérations schématisées sur le diagramme ci-après.

(1) Dans un autre domaine que celui des asservissements, on a vu proposer un modèle issu de la théorie de l'information qui insisterait sur le caractère "dual" de la régulation neuro-musculaire, à savoir la dualité des fonctions sensitives et motrices. (GRONIEWSKI, H., in le Concept d'information dans la science contemporaine. Cahiers de Royaumont. Gauthier-Villars éd., Paris, 1 vol. p. 230).

fig. 8

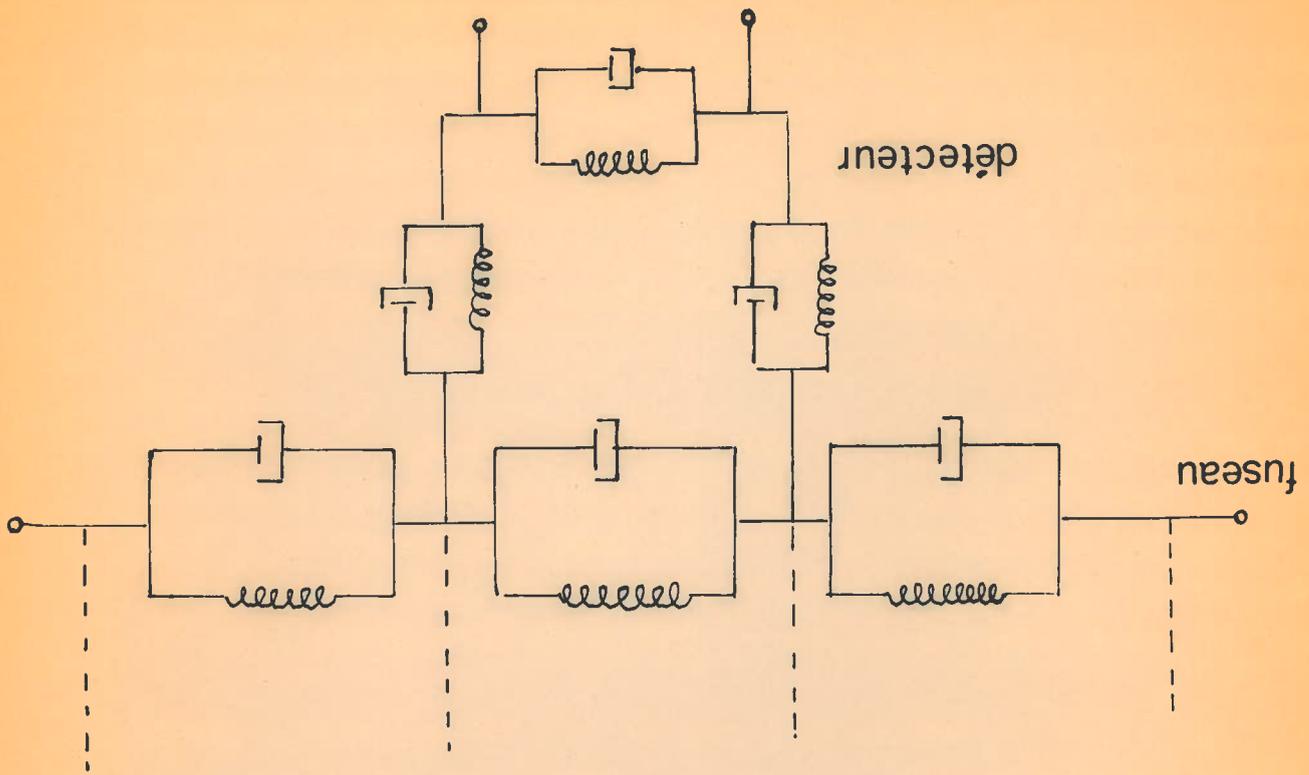
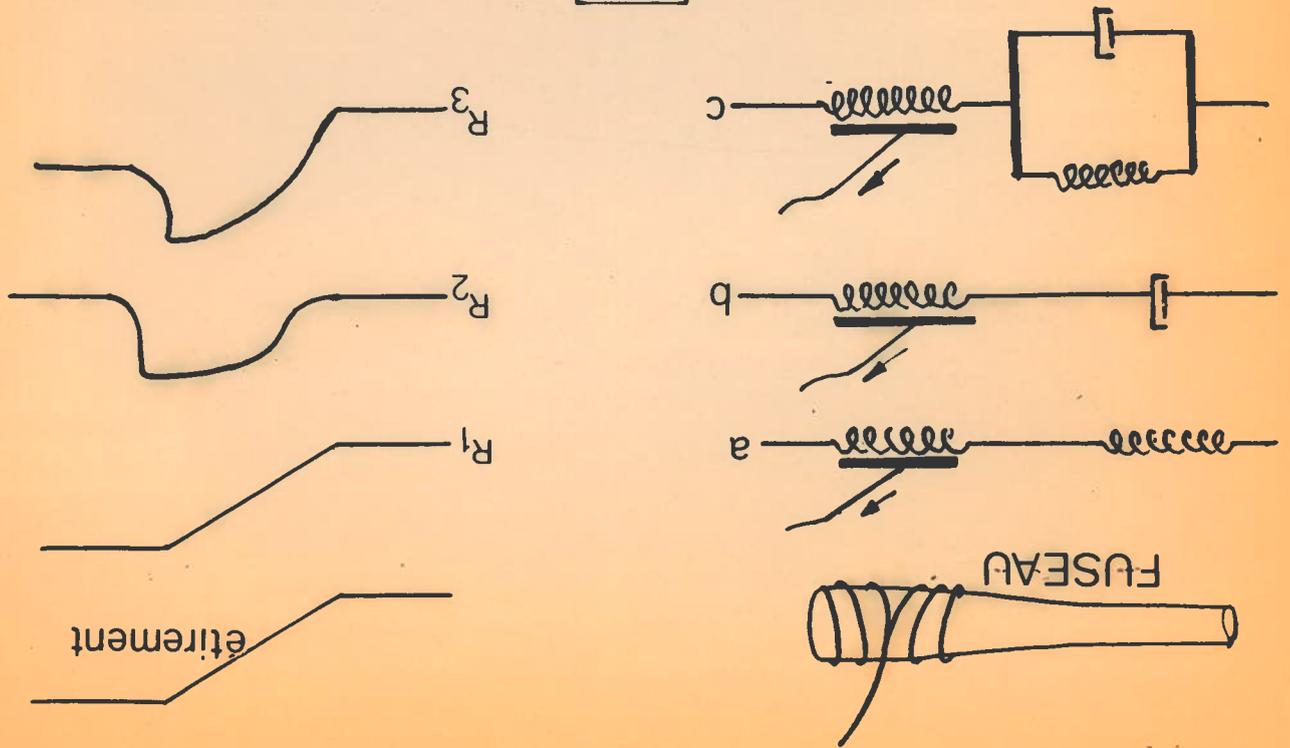
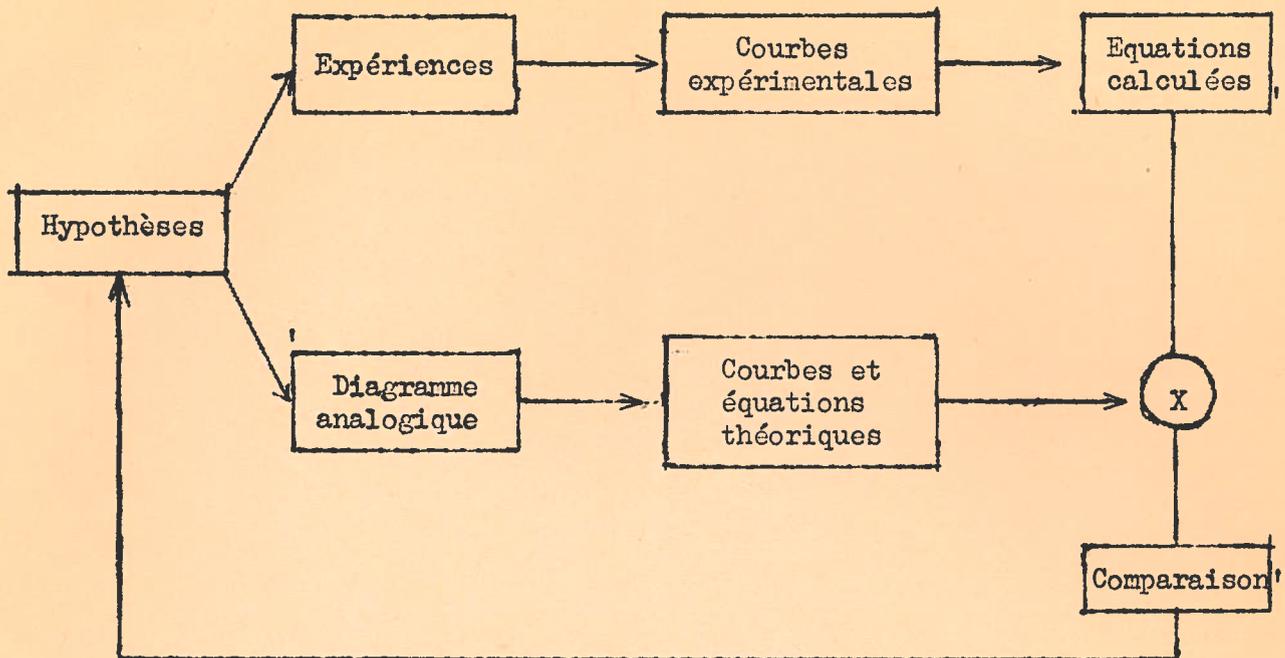


fig. 7





A partir des hypothèses faites sur le système grâce aux connaissances de toutes sortes que l'on possède on réalise :

a) D'une part, des expériences au cours desquelles on soumet le système à une excitation connue : impulsion unitaire, variation progressive (Fig. 1 B), excitation sinusoïdale. On enregistre la courbe de réponse (par exemple la courbe de la figure 1 O). A partir de ces courbes on construit sur calculatrice des équations qui représentent le comportement du système.

b) D'autre part, des diagrammes analogiques (comme ceux des figures 7 a b c, d'après MATTHEWS qui représentent des analogies partielles des propriétés mécaniques du fuseau, ou celui de la figure 8, d'après RICHALET et coll., qui représente un modèle plus complet). A partir de ces diagrammes on détermine sur calculatrice analogique, des équations et des courbes de réponse théoriques (fig. 7 : R_1, R_2, R_3) que l'on compare avec les équations obtenues expérimentalement.

Les différences permettent alors de corriger les hypothèses et de renouveler le cycle d'expériences.

6-) Exemples industriels de régulation par mesure d'erreur

On peut se demander si les ingénieurs ont été conduits à concevoir des systèmes électroniques ou électro-mécaniques de régulation proches du réflexe myotatique. En réalité, la plupart des systèmes industriels de régulation fonctionnent suivant un principe identique : la mesure d'un écart par un récepteur en parallèle sur le système régulé.

La régulation de la vitesse d'un moteur se fait grâce à un tachymètre monté en parallèle sur le moteur et qui, par le jeu d'une amplification appropriée compense les écarts de vitesse par rapport à une référence.

Dans le domaine électronique, une alimentation stabilisée fonctionne par prélèvement sur la tension de sortie, comparaison avec une tension de référence, et injection d'une variation de tension opposée à la perturbation.

Mais plus rares sont les systèmes qui utilisent des régulations du type de la boucle gamma. On peut citer, toutefois, l'exemple d'une régulation de température qui, lorsque après un écart important, la température se rapproche de la valeur de référence, fait intervenir un système d'amplification de puissance destiné à permettre une régulation très fine.

7. CONCLUSIONS

Les analogies ont un intérêt didactique, elles sont utiles pour l'organisation des connaissances et, à condition d'être faites en même temps que les expériences et celles-ci conçues en fonction de la fonction des recherches analoges . elles seront sans doute fécondes. Mais elles ont des exigences de simplicité qui ne sont pas toujours compatibles avec la réalité. Or, le réflexe myotatique est précisément beaucoup plus complexe que la description ci-dessus ne l'a montré.

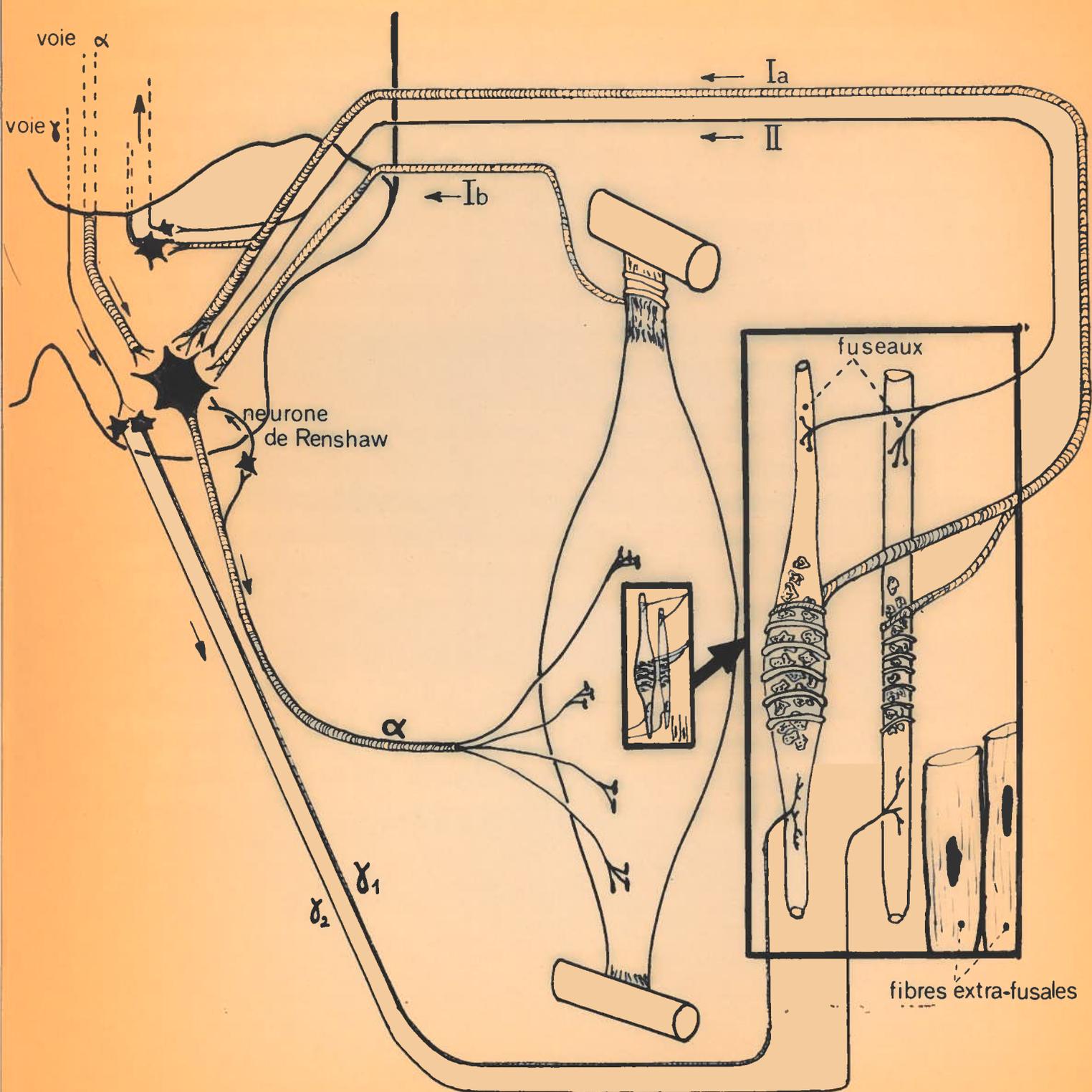


fig.9

Les travaux des anatomistes et des physiologistes (BARKER, BOYD, ECCLES, GRANIT, LAPORTE, PAILLARD, etc...) ont mis en évidence l'extrême variété de l'innervation des muscles et des fuseaux (Fig. 9). On a pu constater qu'il y a deux sortes de fuseaux (à sac nucléaire et à chaîne nucléaire), où naissent deux sortes de fibres (I_{Λ} et II) sensibles à des tensions différentes. De même il semble que les fibres γ se divisent en fibres γ_1 et γ_2 qui innervent chacune un type de fuseau. Les motoneurones α se divisent, comme nous l'avons vu en " α phasiques " et " α toniques ". De plus on a décrit des fibres motrices d'un diamètre plus faible que celui des fibres α (fibres β). Enfin, des collatérales des fibres α viennent innover les fuseaux neuro-musculaires.

Cette liste n'est pas exhaustive , mais elle suffit à faire comprendre la difficulté et les limites d'une simplification excessive du réflexe myotatique, d'autant plus que l'on connaît mal encore le rôle exact des fibres I_B issues des organe de GOLGI, et celui des neurones de RENSHAW. Enfin, on n'a qu'une idée très globale de la nature exacte et des fonctions des circuits du système nerveux central impliqués dans la régulation du tonus.

En conclusion, le réflexe myotatique apparaît donc comme un mécanisme remarquablement bien intégré à l'ensemble des fonctions du muscle auquel il est affecté. Mais si son principe est simple, la rançon de sa perfection est une complexité qui peut fournir encore matière à beaucoup de travaux.

B I B L I O G R A P H I E

Des bibliographies très complètes sur le réflex myotatique ont été publiées par les auteurs qui ont consacré à cette question un article de synthèse ou un chapitre de livre. Ils sont regroupés sous le titre "Ouvrages de synthèse".

On notera particulièrement le plus récent : celui de P.,D.C. MATTHEWS (1964).

I. OUVRAGES DE SYNTHESE

BARKER, D. (1962)

Symposium on muscle receptors.
Hong-Kong University Press, 1 vol., 292 p.

COULTER Jr. N.A. et UPDIKE, O.L. (1965)

Biomedical control developments.
Session XII Paper 2.
Joint automatic control Conference
Rensselaer Polytechnic Institute
Troy - New-York
Juin 22-23-24-25.

CREED, R.S., DENNY-BROWN, D., ECCLES, J.C., LIDDELL, E.G.T. et SHERRINGTON, C.S. (1932)

Reflex activity of the spinal cord.
Clarendon Press ed., Oxford.

GRANIT, R. (1962)

Receptors and sensory perception.
Yale Univ. Press, New-Haven, 369 p.

FULTON, J.F. (1955)

A textbook of physiology.
Saunders ed., Philadelphia, 90-140.

LAPORTE, Y. (1963)

Fonction de la moelle épinière.
In KAYSER, C. Physiologie, Tome II, p. 300-363, Flammarion éd., Paris.

MATTHEWS, P.D.C. (1964)

Muscle spindles and their motor control.
Physiological Reviews, 44, 219-288.

MORIN, G. (1962)

Physiologie du système nerveux central.
Masson et Cie. éd., Paris, 1 vol., 395 p.

PAILLARD, J. (1955)

Réflexes et régulations d'origine proprioceptives chez l'Homme.
Arnette éd., Paris, 1 vol. 275 p.

PAILLARD, J. (1963)

Tonus, posture et motricité téléocinétique.
in KAYSER C. Physiologie, Tome II, p. 403-509, Flammarion éd., Paris.

SHERRINGTON, C.S. (1906)

The integrative action of the nervous system.
Silliman Memorial Lectures - Yale Univ. Press ed., New-Haven
Constable. London, 1 vol. 412 p.

II. ETUDES DE MECANIQUE MUSCULAIRE ET ANALOGIES AVEC LES SERVOMECHANISMES

ADOLPH, A.R. (1959)

Feed-back in physiological systems : an application of feed-back analysis
and stochastic models to neurophysiology.
Bull. math. Biophys., 21 , 195-216.

ESCOBAR, (1963)

Feed-back systems controlling nervous activity.
Symposium of Neural-Biology. Mexico.

GILLE, J.C., DECAULNE, P., PELEGRIN, M. (1966)

Théorie et calcul des asservissements.
Dunod éd., Paris.

GRAY, J.A.B. (1959)

Mechanical into electrical energy in certain mechano-receptors.
Progr. Biophys., 2, 285-324.

HAMMOND, P.H. (1960)

An experimental study of servo-action in human muscular control.
Proc. 3rd Int. Conf. on Med. Electronics, London, 190-199.

HILL, A.V. (1949)

The abrupt transition from rest to activity in muscle.
Proc. Roy. Soc. B, 136, 220-228.
London,

HUBBARD, S.J. (1958)

A study of rapid mechanical events in a mechano receptor.
J. Physiol., 141 , 198-218.

- HUFSCHMIDT, H.S. et KLACZKO-RYNDZIUM, S. (1965)
Considérations théoriques sur le mécanisme de feed-back selon RENSHAW.
In 3ème Congrès International de Cybernétique. Namur.
- HUXLEY, H. (1957)
Muscle structure and theories of contraction.
Progress in Biophysics, 7, 255-318.
- JEWELL, B.R. et WILKIE, D.R. (1960)
The mechanical properties of relaxing muscle.
J. Physiol., London, 152, 30-47.
- JOHNSON, A.R. (1960)
The servo analysis of postural reflexes.
PHD Thesis, Elec. Eng. Dept., Massachusetts Institute of Technology. U.S.A.
- KOSTYUK, P.G. et TIMCHENKO, V.B. (1963)
Feed-back control of activity of spinal interneurons.
In Feed-back Systems Controlling nervous activity, Escobar ed., Mexico, p. 161.
- Mc. CULLOCH, W.S. (1958)
Stability of biological systems.
In Homeostatic Mechanisms. Brookhaven Symposia on Biology, 10, 207-215,
Upton ed., New-York.
- Mc. PHERSON, L. et WILKIE, D.R. (1954)
The duration of the active state in a muscle twitch.
J. Physiol., London, 124, 292-299.
- MERTON, P.A. (1953)
Speculation on the servo-control of movement.
The Spinal Cord ; Ciba Foundation Symposium, 247-260.
- NASLIN, P. (1958)
Technologie et calcul pratique des systèmes asservis,
Dunod éd., Paris, 1 vol., 442 p.
- PARTRIDGE, L.D. et GLASER, G.H. (1960)
Adaptation in regulation of movement and posture. A study of stretch responses
in spastic animals.
J. Neurophys., 23, 257-268.
- PRIGENT, P. (1965)
"Données sur le fonctionnement du système nerveux".
Rapport n° 84, DRME/DRS. Bionique, Avril 1965.
- PRINGLE, J.W.S. (1960)
Models of muscle:
In Models and analogues in biology ; Symposia of the Society for Experimental
Biology, 15, p. 41-68, Beament ed., New-York, Academic Press.
- RICHALET, J., ANGERS, D. et POULIQUEN, R. (1965)
Modèles de muscle et de fuseau neuro musculaire.
Centre d'Etude et de Recherche en Automatisme - Ecole Nat. Sup. Aéro. Paris.
Contrat DRME 381/64 - Rapport PB 4 - Lot n° 4.

- SWETT, J.E. (1963)
Control actions of muscular afferents.
In Feed-back systems controlling nervous activity. Escobar ed., Mexico,
p. 129-149.
- WALKER, S.M. (1951)
Tension and extensibility changes in muscle suddenly stretched, during the
twitch response.
Amer. J. Physiol., 164, 238-247.
- WELLS, J.B. (1965)
Comparison of mechanical properties between slow and mammalian muscles.
J. Physiol., London, 178, 252-269.
- WILKIE, D.R. (1956)
The mechanical properties of muscle.
British. Med. Bull., 12, 177-182.

III. ETUDES PHYSIOLOGIQUES

- ADAL, M.N. et BARKER, D. (1965)
Intra-muscular branching of fusimotor fibres.
J. Physiol., London, 177, 288-299.
- ANGEL, R.W., EPPLER, W. et LANNONE, A. (1965)
Silent period produced by unloading of muscle during voluntary contraction.
J. Physiol., London, 180, 864-870.
- APPELBERG, B., BESSOU, P. et LAPORTE, Y. (1965)
Effects of dynamic and static fusimotor γ fibres on the response of primary
and secondary endings belonging to the same spindle.
J. Physiol., London, 177, 29 P.
- BARKER, D. et IP, M.C. (1963)
The motor innervation of cat and rabbit muscle spindles.
J. Physiol., London, (in the press).
- BESSOU, P. et LAPORTE, Y. (1961)
Méthode d'observation simultanée des décharges afférentes provenant des ter-
minaisons primaire et secondaire d'un même fuseau neuro-musculaire, chez le chat.
J. Physiol., Paris, 53, 273-274.
- BIANCONI, R. et VAN DER MEULEN, J.P. (1963)
The response to vibrations of the end organs of mammalian muscle spindles.
J. Neuroph., 26, 177-190.
- BROWN, M.C., CROWE, A., MATTHEWS, P.B.C. (1965)
Observations on the fusimotor fibres of the tibialis posterior muscle of the cat.
J. Physiol., London, 177, 140-159.

- BROWN, M.C. et MATTHEWS, P.B.C. (1960)
The effect on a muscle twitch of the back response of its motor fibres.
J. Physiol., London, 150, 332-346.
- BULLER, A.J. et LEWIS, D.R. (1963)
The rate of rise of tension in isometric contractions of mammalian fast and slow muscles.
J. Physiol., London, 169, 29 P.
- CROWE, A. et MATTHEWS, P.B.C. (1963)
Further observations on static and dynamic fusimotor fibres.
J. Physiol., London, 168, 45-46 P.
- CROWE, A. et MATTHEWS, P.B.C. (1964 a)
The effects of stimulation of static and dynamic fusimotor fibres on the response to stretching of the primary endings of muscles spindles.
J. Physiol., London, 174, 109-131.
- CROWE, A. et MATTHEWS, P.B.C. (1964 b)
Further studies of static and dynamic fusimotor fibres.
J. Physiol., London, 174, 132-151.
- ECCLES, J.C. (1931)
Studies on the flexor reflex, III. The central effects produced by an antidromic volley.
Proc. Roy. Soc., London, B 107, 557-585.
- ECCLES, J.C. (1957)
Tonic and phasic moto-neurons and the gamma loop.
In Premier Congrès Int. des Sciences Neurologiques.
La Pathologie du Système Extra-pyramidal, p. 81-87.
- ECCLES, J.C. and SHERRINGTON, C.S. (1930)
Numbers and contraction values of individual motor units examined in some muscles of the limb.
Proc. Roy. Soc., London, B 106, 326-357.
- ELDRED, E., GRANIT, R. et MERTON, P.A. (1953)
Supraspinal control of the muscle spindles and its significance.
J. Physiol., London, 122, 498-523.
- GRANIT, R., HOLMGREN, S. et MERTON, P.A. (1955)
The two routes for excitation of muscle and their subservience to the cerebellum.
J. Physiol., London, 130, 213-224.
- GRANIT, R., HENATSCH, H. et STEG, G. (1956)
Tonic and phasic ventral horn cells differentiated by post tetanic potentiation in cat extensors.
Acta Physiol. Scandinav., 37, 114-126.
- GRANIT, R. et HENATSCH, H.D. (1956)
Gamma control of dynamic properties of muscle spindles.
J. Neurophysiol., 19, 356-366.

- HAGBARTH, K. (1952)
Excitatory and inhibitory skin areas for flexor and extensor moto-neurones.
Acta physiol. Scandinav., 26, suppl. 94, 1-58.
- HAMMOND, P.H., MERTON, P.A. et SUTTON, G.G. (1956)
Nervous gradation of muscular contraction.
Brit. med. Bull., 12, 214-218.
- HUNT, C.C. et KUFFLER, S.W. (1951 a)
Further study of efferent small-nerve fibres to mammalian muscle spindles.
Multiple spindle innervation and activity during contraction.
J. Physiol., London, 113, 283-297.
- HUNT, C.C. et KUFFLER, S.W. (1951 b)
Stretch receptor discharges during muscle contraction.
J. Physiol., London, 113, 298-315.
- HUNT, C.C. et PERL, E.R. (1960)
Spinal reflex mechanisms concerned with skeletal muscle.
Physiol. Rev., 40, 538-579.
- LIDDELL, E. et SHERRINGTON, C. S. (1925)
Reflexes in response to stretch (myotatic reflexes).
Proc. Roy. Soc., London, B 96, 212-242.
- LIPPOLD, O.C.J., NICHOLLS, J.G. et REDFEARN, J.W.T. (1960)
Electrical and mechanical factors in the adaptation of a mammalian muscle spindle.
J. Physiol., London, 153, 209-217.
- LLOYD, D.P.C. (1943 a)
Reflex action in relation to the pattern and peripheral source of afferent stimulation.
J. Neurophysiol., 6, 111-119.
- LLOYD, D.P.C. (1943 b)
Conduction and synaptic transmission of reflex response to stretch in spinal cats.
J. Neurophysiol., 6, 316-326.
- LLOYD, D.P.C. (1946)
Integrative pattern of excitation and inhibition in two-neuron reflex arc.
J. Neurophysiol., 9, 439-444.
- MAGOUN, H.W. (1944)
Bulbar inhibition and facilitation of motor activity.
Science, 100, 549-550.
- MASSION, J. (1961)
Contribution à l'étude de la régulation cérébelleuse du système extra-pyramidal.
Bruxelles - Arscia éd., 1 vol., 200 p.

MATTHEWS, P.B.C. (1931)

The response of a muscle spindle during active contraction of^a muscle.
J. Physiol., London, 72, 153-174.

MERTON, P.A. (1950)

Significance of the "silence period" of muscles.
Nature, 116, p. 733.

RITCHIE, J.M. et WILKIE, D.R. (1955)

The effect of previous stimulation on the active state of the muscle.
J. Physiol., London, 130, 488-496.

SHERRINGTON, C.S. (1894)

On the anatomical constitution of nerves of skeletal muscles ; with remarks
on recurrent fibres in the ventral special nerve-root.
J. Physiol., London, 17, 211-258.

ETUDE DES VIBRATIONS SUR DES ENGINES DE CHANTIER.

A. BERTHOZ et A. VISNER

Laboratoire de Physiologie du Travail
du Centre National de la Recherche Scientifique.

Depuis vingt ans de nombreux travaux de pathologie ont attiré l'attention sur les douleurs sacro-lombaires et les troubles digestifs chez les conducteurs de camions, de tracteurs et d'engins de chantier. Grâce à un ensemble d'études de laboratoire et d'observations sur le terrain, on a pu montrer que les vibrations sont à l'origine de ces troubles de pathologie professionnelle. Aussi voit-on de plus en plus les utilisateurs se préoccuper de protéger le conducteur en l'isolant par un siège convenable ou en munissant le véhicule d'une suspension suffisante pour atténuer les secousses.

Mais les conditions techniques d'emploi de ces véhicules, leur puissance de plus en plus grande, les vitesses importantes auxquelles ils se déplacent sur des terrains mouvementés rendent souvent cette protection illusoire. Et l'on observe parfois que les conducteurs, incapables de supporter longtemps les secousses auxquelles ils sont soumis, doivent limiter considérablement les performances de l'engin; ou, s'ils sont astreints à une performance donnée, s'épuisent rapidement.

Nous allons présenter successivement deux études concernant une chargeuse-pelleteuse à pneus et un bulldozer à chenilles. Les résultats concernant le bulldozer seront donnés avec moins de détail. Notre intention est surtout de les utiliser pour montrer comment la même méthode de mesure fait apparaître des catégories de problèmes différentes suivant le type d'engin étudié.

.....

I - ETUDE DE LA CHARGEUSE-PELLETEUSE.

Depuis quelques années est apparu un engin de chantier nouveau : la chargeuse-pelleteuse (fig.1) qui possède des caractéristiques techniques de grand intérêt mais fait subir des secousses très violentes au conducteur.

Des pneus basse pression permettent à la fois le déplacement sur route à grande vitesse (alors que les engins traditionnels, à chenilles, devraient être portés par des camions) et le travail de chantier avec une adhérence qui reste bonne sur des terrains variés, malgré la grande puissance de l'engin. Malheureusement les conducteurs qui ont fait deux ou trois heures de route éprouvent de grandes difficultés à effectuer ensuite un travail de terrassement. Les secousses semblent en grande partie responsables de leur fatigue.

Le problème était de connaître l'importance des vibrations subies, leur mécanisme de production et surtout de préconiser des solutions permettant un travail normal. Ce dernier a été défini de la façon suivante : 4 heures de conduite sur route à vitesse élevée (40 km/h, et peut-être un jour 60 km/h) puis 4 heures de travail sur chantier.

Pour étudier les vibrations sur cet engin nous ne disposions d'aucune indication sur son comportement dynamique (fréquence propre, nature, fréquences et durée des oscillations, etc...). Aussi avons-nous du faire en premier lieu un rapide examen de ses caractéristiques pour expliquer les grandes oscillations; puis une mesure des vibrations présentes à bord et à différents niveaux du poste de conduite.

A/ - Caractéristiques de l'engin.

Lors des premiers essais nous nous sommes trouvés en face d'un engin (fig. 1-2) qui, malgré ses quatorze tonnes, rebondit littéralement sur^{ses} pneus, dès qu'il passe sur un obstacle, même de faible importance. Par ailleurs il présente un mouvement caractéristique de "galop", c'est-à-dire un mouvement de rotation autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité et qui fait alternativement plonger et redresser l'avant et l'arrière. Aucune suspension entre les pneus et le bâti ne vient amortir ces mouvements. Un examen rapide nous permettra de compléter par quelques remarques la description du véhicule:

....

1°/ - Il faut observer la répartition inégale du poids (14 tonnes, plus 2 tonnes de charge) sur les essieux. On voit sur le tableau 1 que si l'engin est en charge l'essieu avant doit supporter 20 % de plus que l'essieu arriere et vice-versa si l'engin est à vide.

TABLEAU 1

Position du godet :	REPARTITION DE LA CHARGE PAR ESSIEU			
	A vide		En charge :	
	Arriere	Avant	Arriere	Avant
MASSE :	59,5 %	40,5 %	39 %	61 %
HORIZONTALE : ...	55,8 %	44,2 %	33 %	67 %
HAUTE :	66,2 %	37,8 %	43,8 %	56,2 %

Ceci a conduit les utilisateurs à employer un gonflage différent entre l'arriere et l'avant et différent aussi entre l'utilisation sur route et l'utilisation en situation de "travail".

2°/ - Il faut noter la position en porte à faux du godet et de ses supports. Etant donnée la vitesse de l'engin, cette disposition favorise l'apparition de mouvements importants et donc de grandes oscillations, d'autant plus que le centre de gravité est situé à peu près à égale distance des essieux.

3°/ - Le poste de conduite dont la position élevée assure une bonne visibilité mais est éloigné du centre de gravité ce qui favorise l'amplification des mouvements et expose le conducteur à subir de grandes oscillations surtout dans les mouvements de rotation.

.....

B/ - Evaluation de la nocivité par des critères subjectifs.

Une méthode classique pour déterminer le niveau des vibrations à bord d'un engin consiste à mesurer l'accélération verticale moyenne atteignant le conducteur en ne s'intéressant qu'aux basses fréquences (1 à 20 Hz) particulièrement nocives pour l'homme. Le tableau I donne les résultats obtenus sur la chargeuse. La fréquence des oscillations est toujours voisine de 2 Hz.

On peut alors comparer ces valeurs à des courbes dites de "tolérance" exprimant l'accélération verticale ou le déplacement en fonction de la fréquence. Ces courbes basées sur le principe même que les "sones" dans l'évaluation des bruits ont été établies sur table vibrante en laboratoire en soumettant des sujets à des vibrations sinusoïdales qu'ils avaient à juger "perceptibles", "tolérables", "intolérables".

La fig. 2 montre un graphique qui représente la synthèse de vingt ans d'études diverses et exprime les déplacements tolérables en fonction de la fréquence pour une exposition de quelques minutes à la vibration. On y a porté sous la forme d'un rectangle hachuré les résultats relatifs à la chargeuse (Bassin). On voit que le graphique ne va pas plus loin que 5 centimètres en déplacement et que les résultats obtenus sur chargeuse se situent pour la plus grande partie en dehors du graphique. (Tableau I)

Situations	Nids de poules	Terrain mou	Route
Variables mesurées			
Accélérations	0,25 à 1 g	0,1 à 0,25 g	0,25 à 0,4 g
Déplacements cm	1,2 à 3,4	0,4 à 1,2	1,2 à 2

TABLERAU I

Donc si l'on en croit ces courbes, l'ensemble formé par la chargeuse et le siège transmettent au conducteur des secousses que l'on peut qualifier d'intolérables. Les résultats relatifs au bulldozer, bien que l'analogie avec une vibration sinusoïdale soit plus contestable dans son cas, montrent qu'il se situe, lui aussi aux limites de tolérance.

Ces conclusions ne semblent guère satisfaisantes car les niveaux d'accélération atteints par la chargeuse-pelleteuse sont d'après ces courbes considérés comme intolérables pendant quelques minutes alors qu'en réalité l'ensemble des conducteurs les supporte pendant plusieurs heures de travail. Il est probable que ce désaccord est lié au fait que les tables vibrantes utilisées ne pouvaient pas fonctionner pour une fréquence 2 Hz à des amplitudes aussi importantes et que les courbes expérimentales ont été extrapolées vers les basses fréquences. Cela est sans doute dû au caractère intermittent des secousses subies par le conducteur en situation réelle. En ce sens la notion de valeur moyenne de l'accélération est, pour une longue durée d'exposition, un critère peu satisfaisant car elle ne distingue pas le cas où le conducteur a été exposé à une vibration d'amplitude faible mais constante, et le cas d'une amplitude forte mais intermittente.

Enfin de telles mesures ne donnent aucune indication sur le comportement biomécanique de l'homme assis dans un véhicule. Des travaux effectués en laboratoire sur table vibrante ont en effet montré que l'homme ne se comporte pas comme une masse unique. Les différents organes sont mis en mouvement à des fréquences déterminées, différentes pour chacun d'eux. Les études ont permis d'assuiler l'homme assis à un système comprenant trois masses (bassin, thorax, tête) reliées entre elles par des ressorts et des amortisseurs (colonne vertébrale, muscles paravertébraux et abdominaux) (fig.3).

Ainsi suivant les fréquences, l'homme se comportera comme un atténuateur et comme un amplificateur; atténuant les effets des vibrations sur certains organes, les amplifiant pour d'autres.

C'est pourquoi on a dû définir des critères simples pour caractériser les mouvements des masses corporelles susceptibles de donner des troubles graves.

.....

C/ - Etude biomécanique.

a) - Méthodes de mesures.

Les quatre critères utilisés dans nos recherches sont : l'accélération (variable de mesure), la fréquence de vibration, la transmissibilité ou rapport des amplitudes des mouvements et le déphasage ou décalage dans le temps entre les mouvements des différentes parties du corps humain.

Dans une première étude qui avait pour but la description des régimes d'oscillation à différents niveaux (plancher, bassin thorax, tête) et dans les trois directions de l'espace (verticale, antéro-postérieure, latérale). Nous avons utilisé des capteurs d'accélération (générateurs à cadres mobiles). Les déplacements du spot de ces oscillographes sont proportionnels aux accélérations reçues par les capteurs et sont enregistrés sur papier photographique.

La figure 4 montre la disposition des capteurs sur le conducteur.

b) - Résultats des mesures.

Nous présenterons ici surtout les mesures faites pour l'analyse du déplacement de l'engin et non pas de son travail de creusement, les valeurs sont données crêt à crêt.

(à accélérer)

1.- Plancher.

Dans la direction verticale on trouve grâce au capteur placé au plancher de la chargeuse un tracé sur lequel on peut distinguer deux sortes de vibrations (fig. 5) :

- d'une part on voit les vibrations du moteur, d'une fréquence d'environ 100 Hz;

- d'autre part des oscillations de fréquence 2 Hz, presque sinusoidales. Cette fréquence varie à peine de quelques dixièmes de Hz, lorsque l'on change les situations (terrain mou, terrain dur inégal (nids de poules), petite ou grande vitesse — . Ces oscillations à 2 Hz ont une amplitude qui varie de 0,1 g à 1,3 g crêt à crêt pour les situations étudiées dont certaines (nids de poules)

.....

(1) - Relié à des oscillographes

représentent des conditions très dures et d'autres (piste routière) des conditions très favorables.

Lorsque l'engin rencontre un léger obstacle sur son trajet ou lorsqu'il roule sur une partie de route perturbée il se comporte donc comme un oscillateur à bande étroite (2 Hz) dynamiquement instable. Il prélève l'énergie nécessaire à ses oscillations d'abord sur l'énergie qui lui donne l'obstacle puis sur son propre mouvement grâce au couplage d'une oscillation verticale (2 Hz) et d'une rotation dans le plan antéro-postérieur (1 Hz). Nous avons pu reconstituer en laboratoire le mouvement résultant et montrer qu'il lui correspond bien à la configuration de la figure 5 où l'on retrouve l'oscillation verticale à 2 Hz et l'oscillation A.P. à 1 Hz.

Pour les utilisateurs, nous pouvons donc faire quelques propositions d'après cette analyse du tracé obtenu au plancher :

- Suppression du régime oscillatoire instable,
- Amortissement des fortes oscillations,
- Atténuation du couplage vertical antéro-postérieur.

Ceci pouvant être réalisé par une meilleure répartition des masses et au besoin par l'introduction d'un amortissement dynamique.

2.- Bassin.

Les hautes fréquences sont fort bien atténuées par le siège qui est très souple. Dans la direction verticale l'oscillation du bassin est presque sinusoïdale, en phase avec le plancher et de fréquence 2 Hz. Parfois sa configuration n'est plus purement sinusoïdale mais elle reste une fonction très simple de sinusoïdes de fréquence 1 ou 2 Hz dont l'amplitude varie suivant les mouvements de l'engin. On peut noter que l'amplitude des tracés correspondant aux mouvements de bas en haut est différente de celle observée pour les mouvements de haut en bas.

Dans le sens antéro-postérieur le tracé à une forme variable. La fréquence dominante est de 1 Hz, surtout dans le cas du mouvement de galop que nous avons déjà trouvé au plancher.

Mais l'aspect le plus important qui se dégage des mesures est ici l'amplification de la vibration verticale entre le plancher et le bassin. La transmissibilité Bassin-Plancher varie en

.....

effet entre 1,3 à 2 (1). Les accélérations arrivant au bassin du conducteur sont de ce fait très importantes et ce sont précisément celles qui nous ont permis de dire, grâce aux courbes de tolérance, que la vibration subie par le conducteur était excessive. (Tableau II et figure 1)

L'analyse biomécanique montre que le siège joue un rôle d'amplificateur. Le siège actuel est donc trop souple. Mais il est indispensable de l'étudier en laboratoire sur table vibrante, ce qui est particulièrement justifié dans le cas actuel pour lequel le système homme-siège, d'un poids très faible par rapport à l'engin, est excité par celui-ci à une fréquence déterminée et d'une manière sinusoidale. On peut néanmoins déjà conseiller d'adopter sur cet engin un siège dont la transmissibilité avec un sujet humain soit aussi proche de 1 que possible pour la fréquence de 2 Hz. La fig. 5 montre que ceci pourrait être obtenu en choisissant un siège dont la fréquence de résonance soit suffisamment supérieure à la fréquence dominante de l'engin (2 Hz). La solution d'un siège de fréquence très basse présente de grandes difficultés technologiques surtout du fait de la fréquence de "galop" 1 Hz. Les hautes fréquences seraient alors aisément amorties par un coussin convenable.

Même dans le meilleur cas on obtient ^{ou} un siège de transmissibilité 1. L'ampleur des secousses reste considérable, et conduit à envisager l'étude d'un système dynamique d'atténuation placé entre plancher et siège. ^{doit}

3.- Thorax.

Sur le tracé obtenu avec le capteur vertical, on retrouve au thorax des oscillations en phase avec celles du bassin, mais avec de nouveau une amplification qui varie de 1,1 à 1,8. Ces faits correspondent bien aux résultats obtenus en laboratoire, donnant une variation de 1,3 à 2 de la transmissibilité, entre thorax et bassin à la fréquence de 2 Hz, quivant la posture du sujet et l'amplitude de la vibration.

L'analyse biomécanique montre des phénomènes qui risquent d'entraîner des troubles graves du fait des compressions et étirements brutaux que subissent les masses abdominales et la musculature.

(1) - La grande dispersion dans la transmissibilité provient sans doute des variations de l'amplitude de l'excitation comme nous l'avons décrit dans un travail antérieur.

4.- Tête.

Nos tracés indiquent les résultats suivants :

Verticalement nous obtenons des accélérations considérables d'une fréquence 2 Hz avec une amplitude variant de 0,3 g sur terrain mou à 4 g sur nids de poules à grande vitesse. Sur route, l'amplitude varie de 0,5 à 1,7 g.

Dans le sens antéro-postérieur on trouve des oscillations de formes très diverses. Tantôt elles évoquent l'amortissement d'un choc et sont très périodiques. Tantôt on obtient des oscillations à une fréquence de 1 Hz en "arches" correspondant au mouvement de "galop" déjà décrit. Enfin on trouve des variations très irrégulières. L'amplitude de ces vibrations varie de 0,2 g sur terrain mou à plus de 1,5 g pour les nids de poules à grande vitesse.

Latéralement on obtient des configurations variées. Parfois très périodiques et en "arches" de fréquence 1,1 Hz et d'amplitude 0,6 g. D'autres tracés donnent une configuration différente, tantôt périodique (de fréquence 2 Hz) et tantôt très irrégulière.

Les tracés simultanés thorax-tête établissent une légère atténuation de la vibration entre le thorax et la tête mais les très grandes valeurs de l'accélération obtenues dans certains cas appellent des expériences complémentaires en laboratoire. Il serait intéressant de décrire les mouvements de la tête à diverses amplitudes d'excitation et de vérifier s'il n'y a pas un seuil au-delà duquel l'amplitude est telle que les mouvements de la tête ne sont plus efficacement contrôlés par la musculature du cou.

5) Répartition des oscillations dans le temps. L'examen d'un grand fragment du tracé photographique montre la répartition des oscillations dans le temps. Sur la figure 12, représentant un trajet sur bonne route, on voit que l'engin oscille par bouffées de 4 à 6 secondes. Mais nous avons observé aussi des oscillations d'une très longue durée (20 à 30 sec) pour des amplitudes moindres.

.....

Dans certains cas la durée des oscillations est déterminée par la nature du terrain et le fonctionnement de l'engin, mais dans d'autres cas, il semble que ce soit le conducteur qui limite la durée de ces secousses pénibles en ralentissant le véhicule ou en faisant subir au godet des mouvements de faible amplitude. Il conviendrait de savoir si la durée des oscillations correspond naturellement au fonctionnement vibratoire de l'engin ou si elle représente, surtout aux fortes amplitudes, le temps maximum pendant lequel le conducteur a accepté de supporter un tel niveau de secousses.

En conclusion, certaines modifications techniques sont susceptibles d'apporter une certaine amélioration aux conditions de travail du conducteur de chargeuse-pelleteuse. Nous avons vu que la répartition des masses sur l'engin devait changer. Il est probable qu'une amélioration de l'amortissement puisse être attendue d'une étude des pneus. Nous avons vu que le siège actuel est trop souple et pas assez amorti. Un siège de type classique bien conçu peut apporter une certaine amélioration mais un pas décisif ne peut être franchi que par l'adjonction d'un système d'amortissement dynamique.

D'autre part, il est bien évident que la structure du poste de conduite doit obéir à certaines règles dimensionnelles pour réduire les effets des vibrations sur l'homme. Dans ce même volume, on trouvera une étude concernant cet aspect fondamental et relative à cet engin sous la signature de S. REBIFFE et C. TARRIERE.

On peut estimer que les niveaux et les formes d'accéléérations mesurés sur cet engin sont exceptionnellement élevés dans les trois dimensions de l'espace, mais sont de l'ordre de grandeur de ceux qu'un conducteur manoeuvrant sur un terrain dur et perturbé est susceptible de rencontrer et d'accepter pendant un certain temps si on lui donne l'ordre de le faire ou si on le motive en conséquence. Reste à montrer en laboratoire à quel prix.

.....

II/ - ETUDE DU BULLDOZER.

La même méthode appliquée au bulldozer permet de mettre en évidence des phénomènes d'amplification ou d'atténuation des vibrations aux différents niveaux mais elle fait apparaître un autre aspect : le déphasage entre les différentes parties du corps, important facteur de troubles.

a/ - Etude de la transmissibilité.

Plancher.

Si l'on considère le plancher du bulldozer (fig. 9) au niveau du poste de conduite on peut distinguer :

- d'une part des vibrations de fréquence élevée (40 à 100 Hz environ) dues au moteur, que l'on voit sur le tracé de l'engin arrêté. Leur amplitude sur le tracé de la figure 4 est de 0,8 g (crêt à crêt),

- d'autre part, des vibrations de fréquences plus basses. Leurs caractéristiques varient avec la vitesse de l'engin, la pente et la nature du terrain. Le niveau de l'accélération est en moyenne de 1 g. Parmi-celles-ci on note l'apparition de bouffées d'oscillations ayant une fréquence de 4 à 6 Hz et une amplitude plus grande (jusqu'à 2 g, crêt à crêt). Les bouffées, caractéristiques d'un phénomène de résonance, suggèrent l'existence d'une fréquence propre de l'engin dans cette bande de fréquence.

Bassin.

Au niveau immédiatement supérieur (bassin) nous constatons que les vibrations du moteur sont fortement amorties (0,08 g). Les basses fréquences sont également amorties. Leur niveau varie de 0,15 à 0,8 g, soit une atténuation d'un tiers par rapport au plancher. Le siège se comporte donc comme un atténuateur.

Thorax.

Si l'on examine les tracés concernant le thorax on observe que si les vibrations de hautes fréquences sont presque totalement disparues, les vibrations basses fréquences, et en particulier la fréquence 6 Hz, sont amplifiées entre le bassin et le thorax; leur niveau varie de 0,3 à 1,2 g, soit un tiers de plus qu'au bassin. Ceci correspond aux études faites sur table vibrante qui ont en effet montré que la fréquence de résonance du thorax par rapport au bassin se situe aux environs de 5 Hz. Malgré l'atténuation du siège les vibrations basses fréquences ne sont donc finalement pas atténuées lorsqu'elles arrivent au thorax. On peut voir dans ces mouvements relatifs importants entre bassin et thorax une cause de troubles physiologiques.

Au niveau de la tête, les vibrations basses fréquences sont les seules transmises, leur niveau est bien moins important qu'au thorax (0,2 à 0,6 g).

b/ - Etudes de déphasage.

L'examen des tracés nous indique un déphasage important entre le bassin et le thorax. Ces masses corporelles se meuvent presque en sens contraire, surtout à la fréquence de 6 Hz.

Comme l'engin doit au cours de son travail souvent varier sa vitesse, comme les chocs ne sont pas toujours de la même importance la fréquence varie un peu autour de 6 Hz. Dans ce cas le régime de déplacement relatif du thorax par rapport au bassin risque de passer de l'accord de phase à l'opposition de phase. On aura alors des étirements et des compressions subites et dangereux pour le conducteur. Ceci est confirmé par les études faites en laboratoire.

Malgré une conception technologique parfaitement différente et un régime vibratoire d'un autre type, des conclusions analogues peuvent être tirées de l'étude rapide du bulldozer.

La conception même de l'engin domine la question et il faut des études très approfondies pour obtenir une amélioration.

Le siège de type classique est ici efficace mais dans des limites qui ne permettent pas d'obtenir un confort acceptable. Un système d'amortissement dynamique doit être introduit.

La structure géométrique du poste de conduite doit être améliorée pour réduire les effets des vibrations sur l'homme.

Au cours de l'étude des vibrations subies par l'homme assis dans les véhicules est apparue la nécessité d'étudier les mouvements de la tête ~~visibles~~ dans la bande de fréquence 1 à 10 Hz. Dans cette bande de fréquence, le corps humain ne se comporte pas comme une masse unique; il se produit entre les différentes parties du corps des déplacements relatifs dus à des phénomènes d'amplification et de déphasage. Or si l'on a pu décrire ces mouvements pour les viscères thorace-abdominaux, malgré les intéressants travaux de DIECKMANN, GUIGNARD et IRVING et COERMANN on manque encore de certaines données concernant les mouvements de la tête.

Mais si la description de ces mouvements est indispensable, elle n'est pas suffisante car elle ne donne aucun renseignements sur les mécanismes physiologiques associés. En particulier on peut se demander dans quelle mesure et par quels mécanismes les groupes musculaires concernés par les mouvements interviennent dans les déplacements relatifs des segments.

C'est pourquoi, nous avons étudié simultanément les mouvements de la tête et l'activité électrique des muscles de la nuque. Ces muscles jouent en effet un rôle prépondérant dans le maintien de la tête pendant l'exposition aux vibrations.

1- TECHNIQUE.

Table vibrante: On a soumis les sujets à des vibrations sinusoïdales produites par une table vibrante - la fréquence pouvait varier de 1,5 à 20 Hz, l'amplitude de ± 1 mm à ± 10 mm.

Sujet - Le sujet est assis sur un siège moulé rigide qui transmet intégralement les vibrations de la table. Il tient les deux poignées d'un guidon et doit répondre à deux lumières s'allumant de façon aléatoire ~~et faible~~ ^{à l'aide, à l'extrémité d'un tube de} diamètre, en appuyant sur deux boutons fixés au guidon. Ce dispositif a pour but de déterminer à la fois la posture et le degré d'attention du sujet.

ETUDE BIOMECHANIQUE ET ELECTROMYOGRAPHIQUE DES
MOUVEMENTS DE LA TETE CHEZ L'HOMME SOUMIS A
DES VIBRATIONS DE BASSE FREQUENCE.

par

A. BERTHOZ, A. LAVILLE, et A. WISNER

(Laboratoire de Physiologie du Travail du CNRS,
Pr. J. SCHERRER, PARIS.)

La hauteur du siège est la même quelque soit le sujet, la position des reposes-pieds et du guidon est adaptée à chaque sujet grâce à des schémas dimensionnels, de façon à obtenir, autant que possible une répartition géométrique des grands segments du corps identique pour tous les sujets.

Les mesures ont porté sur 10 sujets. Pour chaque sujet on maintient les fréquences tous les $2/16$ de Hz jusqu'à la limite de tolérance.

L'étude du déplacement de la tête et du rachis est réalisée par l'enregistrement, sur un film photographique fixe, des mouvements d'ampoules électriques de faibles dimensions. On a ainsi disposé des ampoules dans le dos du sujet en trois points de la tête.

On a complété cette description par l'étude accélérométrique du mouvement. Pour cela on utilise comme capteurs de vibration des accéléromètres à mutuelle inductance qui ont l'avantage d'être indépendants de toute référence et facilement étalonnables.

Ils sont fixés d'une part sur un support métallique dans le dos et sur le thorax du sujet, et d'autre part sur un casque en alliage léger sur la tête. Le poids de l'ensemble n'est pas susceptible de modifier de façon importante le comportement dynamique de la tête.

L'activité électrique des muscles de la nuque a été recueillie à l'aide de deux électrodes de surfaces fixées sur la peau par du collodion. Ces électrodes situées du côté gauche ou droit ont été placées l'une au dessus de l'autre à 3 cm de l'apophyse épineuse, de la troisième vertèbre cervicale.

L'activité électrique ainsi dérivée était amplifiée et enregistrée simultanément avec les oscillations de la table sur un appareil électromagnétique à plume.

RESULTATS.

On peut voir sur la figure deux photographies obtenues pour une amplitude de vibration de ± 3 mm et pour respectivement 2 Hz et 4 Hz. Sur chaque photo on voit les trajets de 4 ampoules, une pour le dos et trois pour la tête. Comme nous avons été contraints d'incliner l'appareil photographique, c'est le sujet qui, sur ces photos, à l'air d'être incliné. La référence est le mouvement du dos qui est vertical et qui est sensiblement le même que celui de la table. Vers 2 Hz les différentes parties de la tête suivent les mouvements du dos. A partir de 4 Hz, il se produit une modification des trajets des ampoules de la tête alors que celui de l'ampoule du dos reste sensiblement le même qu'à 2 Hz.

Comment interpréter ces résultats?

On peut interpréter ces résultats si l'on admet que à partir de 3 - 4 Hz la tête n'est plus solidaire du mouvement de son support. Il se produit à partir de ces fréquences un mouvement de rotation de la tête sur la colonne cervicale qui se superpose au mouvement vertical imposé par la table.

Le schéma de la figure représente la tête en équilibre instable sur son support, soutenue de chaque côté par les muscles du cou, représentés ici de façon très grossière par des ressorts et des amortisseurs.

La superposition du mouvement vertical (vecteur V) et d'un mouvement de rotation (vecteur R) donne comme mouvement résultant, en première approximation, le vecteur S la répartition des vecteurs S aux différents points de la tête correspond exactement aux trajets des ampoules sur les photographies.

Nous avons cherché à mesurer comment variait cette rotation de la tête en fonction de la fréquence. Pour cela on peut considérer le rapport entre la composante horizontale et la composante verticale du mouvement du sommet de la tête. Ce rapport est un indice de mouvement de rotation de la tête.

On porte ce rapport en ordonné et la fréquence en abscisse. On a ici une courbe moyenne et les courbes enveloppées pour 5 sujets. On voit que jusqu'à 2-3 Hz, la rotation est faible. La tête se déplace comme le dos. Entre 3 et 4 Hz, suivant l'amplitude de la vibration se produit un mouvement de rotation très ample qui atteint un maximum vers 5-6 Hz, ce qui correspond à un déplacement relatif important entre la tête et le dos. Au delà de ces fréquences, l'amplitude du mouvement diminue et il apparaît des déphasages qui rendent le mouvement complexe.

Il apparaît donc qu'au delà d'une certaine fréquence variable avec l'amplitude des vibrations la tête n'oscille plus comme le rachis et subit un mouvement de rotation dans le plan antero-postérieur. Les tracés électromyographiques de la nuque font également apparaître dans cette zone de fréquence des modifications des contractions musculaires.

Sur la figure on voit l'activité électrique de ces muscles enregistrée simultanément avec la fréquence d'oscillation de la table pour deux amplitudes (± 1 cm à gauche, ± 3 cm à droite), et pour différentes fréquences.

Pour une amplitude donnée (± 1 cm par exemple) à partir d'une certaine fréquence (3 - 4 Hz) l'apparition d'une activité constituée de bouffées de potentiels rythmées à la fréquence d'oscillations de la table; les groupements de potentiels deviennent de plus en plus brefs, leur amplitude s'accroît, montrant leur plus grande synchronisation. on constate

Parallèlement on constate dans les intervalles, une diminution de l'activité continue de fond.

Si on compare deux amplitudes différentes (± 1 cm et ± 3 cm par) on note que l'apparition de cette activité rythmique est d'autant plus précoce dans l'échelle des fréquences que l'amplitude s'accroît.

Bien qu'il existe des différences interindividuelles dans l'ensemble des résultats, on remarque cependant une certaine coïncidence entre les variations du mouvement de la tête par rapport au rachis et les tracés électromyographiques obtenus. Tout se passe comme si entre 4 et 6 Hz les muscles de la nuque ne pouvaient plus assurer de façon continue le maintien de la tête; on peut penser alors qu'il se produit pour ces fréquences critiques une modification du système de régulation centrale, le fait que la fréquence à laquelle apparaît cette activité rythmique dépende de l'amplitude des vibrations n'exclut pas l'hypothèse d'un rôle des propriétés biomécanique des muscles et on peut penser également à l'intervention de phénomènes réflexes très brefs de type myotatique, en effet

cependant la fréquence à laquelle apparaît cette activité rythmique dépend de l'amplitude des vibrations.

On peut penser également à l'intervention de phénomènes réflexes très brefs de type myostatique: en effet dans cette zone l'étirement des muscles à chaque oscillation est notable, de l'ordre de 2 cm et aux fréquences plus élevées l'accélération mise en jeu augmente provoquant vraisemblablement des tensions élevées et brutales au niveau des muscles.

④ Au cours de l'étude des vibrations subies par l'homme assis dans les véhicules est apparue la nécessité d'étudier les mouvements de la tête dans la bande de fréquence de 1 à 10 Hz.

④ Pour obtenir des renseignements sur les mécanismes physiologiques, on a étudié simultanément les mouvements de la tête et l'activité électrique des muscles de la nuque.

TECHNIQUE: On a soumis 10 sujets assis sur des sièges rigides à des vibrations sinusoïdales verticales produites par une table vibrante (fréquence de 1 à 10 Hz, amplitude ± 1 mm à ± 10 mm)

Les mouvements d'une ampoule électrique de faibles dimensions fixée au niveau de D4 et de trois autres fixées sur la tête en position occipitale sommitale et frontale et frontale sont enregistrés sur film photographique fixe.

L'accélération de la composante verticale des mouvements du dos et celles des composantes verticales et horizontales des mouvements de la tête sont enregistrés grâce à des accéléromètres à mutuelle inductance. L'activité électromyographique des muscles de la nuque a été recueillie à l'aide de deux électrodes de surface situées l'une au dessus de l'autre à trois centimètre de l'apophyse épineuse de C3.

RESULTATS Au dessous de 2 Hz les différentes parties de la tête suivent les mouvements du dos. A partir de 4 Hz il se produit une rotation de la tête sur la colonne cervicale qui se superpose au mouvement vertical imposé par la table.

On peut prendre comme indice de variation de la rotation le rapport entre la composante horizontale et la composante verticale du mouvement du sommet de la tête. Le mouvement de rotation apparaît nettement entre 3 et 4 Hz ^{et} atteint un maximum entre 5 et 6 Hz. Au delà de ces fréquences son amplitude diminue et des déphasages rendent le mouvement complexe.

L'électromyographie des muscles de la nuque, recueillie simultanément donne pour les basses fréquences une activité continue analogue à celle du repos. Au delà de 3 à 4 Hz, il apparaît une activité constituée de bouffées de potentiels rythmés par la fréquence des oscillations de la table. Quand la fréquence s'accroît ces groupements

de potentiels deviennent brefs, leur amplitude augmente, indice d'une plus grande synchronisation. Parallèlement, on constate dans les intervalles une diminution de l'activité continue de fond. L'apparition de cette activité rythmique est d'autant plus précoce dans l'échelle des fréquences que l'amplitude s'accroît.

On peut penser, pour relier ces deux catégories de résultats, à une limitation des possibilités du système de régulation centrale, ou bien à une réponse réflexe courte du type myotatique correspondant à des phénomènes mécaniques se produisant dans le muscle.

Au cours de l'étude des vibrations subies par l'homme assis dans des véhicules est apparue la nécessité d'étudier les mouvements de la tête dans la bande de fréquence 1 à 10 Hz. Dans cette bande de fréquence, le corps humain ne se comporte pas comme une masse unique ; il se produit entre les différents organes, des déplacements relatifs dus à des phénomènes d'amplification et de déphasage. Or si l'on a pu décrire ces mouvements pour les viscères thoraco-abdominaux, malgré les intéressants travaux de DIECKMANN, GUIGNARD, IRVING et COERMANN on manque encore de certaines données concernant les mouvements de la tête.

Mais si la description de ces mouvements est indispensable, elle n'est pas suffisante car elle ne donne aucun renseignement sur les mécanismes physiologiques associés. En particulier on peut se demander dans quelle mesure et par quels mécanismes les groupes musculaires concernés par les mouvements compensent les déplacements relatifs des segments.

C'est pourquoi on a étudié simultanément les mouvements de la tête et l'activité électrique des muscles de la nuque. Ces muscles jouent en effet un rôle prépondérant dans le maintien de la tête pendant l'exposition aux vibrations.

1 TECHNIQUE

2 - 1 Dispositif expérimental

Table vibrante. On a soumis les sujets à des vibrations sinusoïdales verticales produites par une table vibrante - la fréquence pouvait varier de 1,5 à 20 Hz, l'amplitude de ± 1 mm à ± 10 mm.

Sujet - Le sujet est assis sur un siège rigide qui transmet intégralement les vibrations de la table. Il tient les deux poignées d'un guidon et doit répondre à deux lumières situées au fond d'un tube de 80 cm de long et de faible diamètre, en appuyant sur deux boutons fixés au guidon. Ce dispositif a pour but de fixer à la fois la posture et l'attention du sujet.

La hauteur du siège est la même quelque soit le sujet, la position des reposes pieds et du guidon est adaptée à chaque sujet, grâce à des schémas dimensionnels, de façon à obtenir, autant que possible, une répartition géométrique des grands segments du corps identique pour tous les sujets.

1 - 2 Etude des mouvements

Accélérométrie Pour décrire les mouvements des différentes masses constituant le système tête-thorax - rachis - thorax - siège on utilise des capteurs de vibration. On a utilisé des accéléromètres à mutuelle inductance, qui ont l'avantage d'être indépendants de toute référence, facilement étalonnables, et de mesurer un paramètre lié directement à la force qui s'exerce sur la partie du corps sur laquelle est disposé le capteur - leur poids est de 75 grammes environ. Les variations de tensions fournies par chaque capteur sont enregistrées sur un papier photographique sur lequel on fait directement les mesures d'amplitude et de déphasage.

Fixation des capteurs

On utilise simultanément

- Un capteur dorsal situé sur un support métallique dans le dos du sujet - Ce support est fortement fixé au thorax par des sangles semi-élastiques

- Deux capteurs situés au sommet de la tête sur un casque en alliage léger - l'un des capteurs est horizontal, l'autre est vertical. Le poids de l'ensemble du casque avec les capteurs n'est pas susceptible de modifier de façon importante le comportement dynamique de la tête.

Etude photographique

On dispose dans le dos et sur la tête du sujet des ampoules de très faible diamètre modifiées de façon à obtenir une source de lumière punctiforme

On dispose ainsi quatre ampoules :

Une ampoule dorsale fixée sur l'accéléromètre dorsal

Une ampoule occipitale fixée sur l'arrière du casque

Une ampoule sommitale fixée sur l'un des capteurs de la tête

Une ampoule frontale fixée sur un bonnet de toile porté sous le casque.

Pour chaque fréquence on prend une photographie de durée variable qui permet d'obtenir une représentation du mouvement réel.

1 - 3 Electrocytographie

L'activité électrique des muscles de la nuque est recueillie à l'aide de deux électrodes de surface fixées sur la peau par du collodion. Ces électrodes situées du côté gauche ou droit sont placées l'une au dessus de l'autre au niveau de la troisième vertèbre cervicale.

L'activité électrique ainsi dérivée est amplifiée et enregistrée simultanément avec les oscillations de la table sur un appareil électromagnétique à plume.

1 - 4 Protocole expérimental

Les mesures ont porté sur 10 sujets. Pour chacun d'entre eux on parcourt la bande de fréquence depuis 1 Hz jusqu'à ce qu'il signale que la vibration devenait difficilement supportable. Certaines mesures ont été faites en montant et en descendant les fréquences.

2. RESULTATS

2 - 1 Etude du mouvement

Les photographies des ampoules montrent que vers 2 Hz les différents points de la tête suivent le mouvement du dos ; à partir de 3-4 Hz il se produit une modification des trajets des ampoules de la tête, alors que le mouvement du dos reste sensiblement le même qu'à 2 Hz. Les ampoules de la tête ont un déplacement maximum vers 5 Hz, puis leur mouvement s'atténue pour des fréquences plus grandes. L'inclinaison des trajets par rapport à la verticale varie suivant la fréquence et l'ampoule considérée.

On peut interpréter ces résultats en décomposant le mouvement de la tête en deux mouvements simples : d'une part, un mouvement vertical provenant de la vibration de la table et d'autre part, un mouvement de rotation autour du pivot formée par la colonne cervicale (fig.)

L'étude accélérométrique permet d'étudier le rapport R entre la composante horizontale et la composante verticale du mouvement du sommet de

la tête. Ce rapport, faible pour les basses fréquences, augmente pour atteindre un maximum vers 5-6 Herz⁺, puis diminue ensuite, alors que le déphasage entre les deux composantes augmente.

On peut résumer les observations faites en disant que jusqu'à 2-3 Herz⁺ la tête se déplace comme le dos. Puis entre 3-4 Herz⁺ suivant l'amplitude de la vibration se produit un mouvement de rotation de la tête sur son support. Ce mouvement atteint un maximum vers 6 Hz, provoquant un important déplacement relatif entre la tête et le dos. Au delà de ces fréquences les déphasages entre les composantes du mouvement augmente, et lorsque l'ampleur du mouvement de rotations diminue, ces déphasages laissent subsister d'importants déplacements relatifs. De plus pour ces fréquences, l'accélération, et donc la force mise en jeu, augmente très vite.

2 - 2

Les tracés obtenus montrent que l'activité électrique des muscles de la nuque varie en fonction de la fréquence et de l'amplitude de vibrations. Pour une amplitude donnée, au delà d'une certaine fréquence sur un fond d'activité continue se superpose une activité rythmique constituée par des bouffées de potentiels d'action; à mesure que la fréquence des vibrations s'accroît, on constate une augmentation d'amplitude de ces potentiels et une tendance à leur groupement, tandis que l'activité continue de fond diminue.

Par ailleurs l'apparition de cette activité rythmique est d'autant plus précoce l'échelle des fréquences que l'amplitude est grande. Ainsi sur un sujet cette apparition se produit à une fréquence de 4 à 5 Hz environ pour une amplitude de + 1 mm, de 3 Hz pour des amplitudes de + 4 à 6 mm, et de 2 à 2,5 Hz pour une amplitude de + 8 mm. Ces différents niveaux dans la fréquence d'apparition en fonction de l'amplitude varient d'un sujet à l'autre.

Note sur les essais de la table vibrante

Les essais du 30 Juillet auront essentiellement pour but de vérifier que la table fonctionne , à savoir :

- 1° - alimentation en triphasé par le polyphaseur (faire noter les valeurs de la tension à la phase fictive)
- 2° - Rotation de la génératrice - fonctionnement des commandes de l'armoire.
- 3° - rotation des deux moteurs (les faire désaccoupler) et de l'interrupteur d'accouplement.
- 4° - Transmission à la table du mouvement.

Recommandations :

La table n'est pas fixée au socle de béton (la fourniture nécessaire sera livrée en Septembre).

Il manque deux boulons (pas de vis sortis) et un boulon est mal serré à cause du pas de vis.

Les alignements ne sont peut être pas parfaits

Aussi il convient :

- 1° - de faire tourner la table à basse fréquence et faible amplitude (à mon avis ne pas dépasser 5 mm à 5-10 hz)
- 2° - de reserrer les boulons après quelques tours de moteur.
- 3° - de ne pas prolonger les essais

Les points particuliers à conseiller sont :

- la courroie de transmission entre les deux moteurs
- le tachymètre
- les différentes parties boulonnées
- l'oscillation éventuelle du bloc de béton.

8 JUIN 1964.

COMPTE-RENDU D'ESSAIS FAITS à ANGERS au ~~SNEMAG~~
sur la CHARGEUSE MICHIGAN

I - PROGRAMME THEORIQUE DES ESSAIS -

Deux journées étaient prévues :

1ère journée : (matinée : préparation des expériences
(
après-midi : Expériences Thorax-Tête et film.

2ème journée : Enregistrement sur route longue durée.

Le but de l'expérience sur le thorax et la tête était de préciser les mécanismes de transmission de la vibration entre le thorax et la tête pour des amplitudes croissantes de l'oscillation.

Nous avons fait l'hypothèse qu'il y aurait un seuil au-delà duquel les mouvements de la tête n'étaient plus efficacement contrôlés par la musculature du cou.

Le but du film était de réaliser de gros plans du mouvement du conducteur dans la cabine à grande vitesse et de mettre en évidence certains mouvements particuliers.

Le but des expériences de longue durée était de chercher à voir si le conducteur ne réglait pas le niveau de vibration qu'il acceptait de subir en variant la vitesse de l'engin. Pour cela on avait l'intention de mesurer la vibration verticale au bassin en même temps que les mouvements du pied sur l'accélérateur.

L'idée de départ était de prendre un seul conducteur en lui faisant parcourir un trajet en "Y" formé de trois tronçons de, successivement, très bonne, moyenne, mauvaise route qu'on lui ferait parcourir dans des ordres divers de manière à constituer un trajet de 2 heures. Trois expériences étaient prévues :

.....

- la première (2 à 3 h.) avec consigne de conduite "normale",
- la deuxième (1 à 1 h 30) avec consigne de conduite "tranquille",
- la troisième (1 à 1 h 30) avec consigne de conduite "à fond".

II - MATERIEL UTILISE.

Pour le film des caméra 16 mm avec des films Kodak Panratomic X. Pour l'enregistrement des vibrations, la chaîne A.C.B. avec un dispositif de contacts monté au laboratoire.

III - DEROULEMENT DES EXPERIENCES.

1) - Film. - Nous avons eu des difficultés pour le marquage du sujet dont une partie du corps était dissimulée par le siège.

Nous n'avons par ailleurs pas pu nous mettre à l'horizontale de la cabine. Nous avons filmé le conducteur au passage d'un madrier.

2) - Enregistrement thorax-tête. - Seules les directions antéro-postérieure et verticale ont été explorées. (Sauf un enregistrement de contrôle au thorax dans les trois directions). Le conducteur, très habitué à l'engin, a déclaré avoir une stratégie musculaire : il se raidissait en serrant le volant pour éviter d'être secoué. Aussi nous avons fait une première série de mesures à trois vitesses pour avoir des amplitudes constantes, puis une deuxième série de mesures en demandant au conducteur d'adopter une attitude relâchée puis une attitude raidie à l'excès.

Lors d'un trajet sur une piste de béton nous avons pu constater que lorsque l'engin avait quatre roues motrices (2 ponts) il secouait plus que lorsqu'il n'avait que deux roues motrices. Ce qui prouve que dans la genèse des grandes secousses à bord des engins intervient non seulement la répartition statique des masses et des parties élastiques (couplage....) mais aussi les effets dynamiques car lorsque l'engin commençait à osciller les roues décollaient légèrement et lorsque l'engin retombait les roues étant motrices le feu saient rebondir en transformant leur énergie de rotation en énergie d'oscillation.

3) - Enregistrement de longue durée.

1°) - Paramètres de mesure.

Les mouvements de l'accélérateur ont été repérés par deux contacteurs disposés sur la tige de connexion entre l'accélérateur et le moteur. Le premier contacteur indiquait le début de la course de l'accélérateur et le second la fin de cette course (accélérateur "à fond").

.....

Il a été impossible de trouver des routes de mauvaise qualité suffisamment longues et adaptées au gabarit de l'engin.

2°) - Protocole.

L'expérience du matin a été faite avec un conducteur très expérimenté (Le même que pour l'expérience Thorax-Tête) à qui nous avons donné pour consigne d'aller tranquillement comme s'il avait à conduire 10 heures. Il nous a expliqué que le meilleur moyen d'éviter de se fatiguer sur cet engin était encore d'y rester le moins possible donc d'aller le plus vite possible. Et de fait il a fait le circuit à une vitesse que nous ne pouvions espérer dépasser l'après-midi.

Aussi nous avons choisi de prendre un autre conducteur avec la même consigne pour les deux heures de trajet de l'après-midi.

3°) - Observations sur l'expérience.

Les vibrations ont été mesurées au Bassin (vertical et antéro-postérieur) et au Thorax (vertical).

On a procédé à un repérage des conditions du trajet avec la poignée de commande.

Ont été repérés :

- le croisement de véhicules,
- les descentes importantes,
- les arrêts,
- les traversées de village,
- les virages importants.

On a aussi divisé le trajet en sections qui ont été marquées de 1 à 8 avec la poignée.

Deuxième trajet. On a choisi pour parcours un ensemble de trois routes. La Nationale 162 au départ du SNEMAG - 1 kilomètre après le carrefour de Montreuil-Bellay, en s'éloignant d'Angers, jusqu'au Lion d'Angers - la route du Lion d'Angers à Vern - la départementale de Vern à la Membrolle;

Le circuit La Membrolle - Lion - Vern - Membrolle a été décrit deux fois le matin et deux fois l'après-midi ce qui fait deux heures d'enregistrement le matin et deux heures l'après-midi (Total km).

.....

Les conducteurs ont conduit l'engin à fond. En fait nous avons eu l'impression que le conducteur limitait la performance de l'engin non pas lorsque les secousses intervenaient seules (sauf quelques exceptions qu'on retrouvera sur les tracés, en particulier à l'entrée de BRAIN) ou lorsque la route était étroite, ou lorsque des véhicules le croisait, mais lorsque se rencontrait la coïncidence entre :

- des secousses importantes

et une route étroite

et des véhicules venant en sens inverse ou doublant.

En somme nous avons eu l'impression d'avoir montré le contraire de ce nous voulions montrer, c'est-à-dire qu'au fond le conducteur ne limite pas la vitesse de l'engin à ~~cause~~ des secousses seules ^{mais} accepte de supporter pendant un temps très long des ^{secousses} ~~événements~~ de très forte importance. Reste à montrer en laboratoire à quel prix.

Analyse de fréquence Tolana complémentaire sur Chargeur MICHIGAN

Niveaux de mesure:

Plancher (sous le siège)	vertical	2,5 g
Bassin	vertical	2,5 g
Thorax	vertical	2,5 g
Tête	vertical	2,5 g

Demander à ^Mr. LEROY ou à Mr HECQUET confirmation pour la sensibilité des capteurs d'après des niveaux déjà obtenus sur la mesure précédente

Serie de mesures/:

Une mesure sur route moyenne durée 7 à 8 mn.
Une mesure sur terrain mou id.

Traduction de la discussion de l'article de LITTA-MODIGNANI, BLIVAISS, MAGID et ^PRIEDE, sur
 " LES EFFETS DES VIBRATIONS DE TOUT LE CORPS (1-20 Hz) SUR LE NIVEAU DES
CORTICOSTÉROÏDES DU PLASMA ET DE L'URINE". (Chez l'homme) (1)

Le rôle des hormones stéroïdes produites par le cortex surrénal en défense contre les agents des stress a été mise en évidence par beaucoup de chercheurs (GEMZELL, 1963 ; SAYERS, G. et SAYERS , 1948 ; SELYE, 1946 ; UOTILA et PEKKARINEN, 1951) .

La diminution des 17-OH-CS du plasma enregistrée après la vibration fut plutôt surprenante . La vibration donna un inconfort général assez dramatique associé fréquemment avec la dyspnée , des douleurs au thorax et à l'abdomen, et dans certains cas l'expérience dut être interrompue pour ces raisons . Une telle combinaison de symptômes est caractéristique d'une réponse de stress qui est en général associée avec une augmentation de l' 17-OH-CS du plasma .

La diminution des valeurs de l'17-OH-CS du plasma bien que non toujours significative ne peut pas être négligée . Une explication partielle du manque de " signification " statistique pourrait être la durée relativement faible des périodes d'exposition aux vibrations (neuf minutes plus deux ; et des intervalles de repos de trois minutes) . Cette diminution de 17-OH-CS du plasma peut être le résultat d'une utilisation accentuée ou d'une diminution de la sécrétion ou une combinaison des deux facteurs .

L'absence d'augmentation de 17-OH-CS dans le plasma concorde avec les échantillons d'urine qui n'indiquent pas non plus d'augmentation de 17-OH-CS mais plutôt une légère diminution .

Nous avons aussi observé une diminution significative du BTS de l'urine à 1, 2, 3 Hz et du 17-KGS total de l'urine à 18, 19, 20 Hz. ~~dans notre première~~ Aucune valeur statistiquement significative de fut trouvée à 5,6,7 Hz dans notre première expérience quand l'urine fut recueillie en deux fractions de 12 heures après vibration .

(1) 1, 2, 3 Hz , puis 5, 6, 7 Hz , puis 18, 19, 20 Hz .

Pourtant dans la seconde expérience des diminutions significatives furent observées pour 17-OH-CS BTS, 17 KGS (5,6,7hz) dans l'échantillon des quatre premières heures après vibration comparées aux valeurs de contrôle . Ceci confirme les observations de WINTER (1963) que après ^{la} vibration de singes , (à une pente de 2 G), 5, 40 hz, il se produit une baisse de 30 - 80 % dans le 17-Létogénique stéroïde . Le fractionnement des échantillons d'urine pour des périodes plus courtes (deux périodes de quatre heures) après la vibration accentua les différences d'excrétion d'urine . L'accord dans les altérations de la sécrétion des stéroïdes urinaires suivant la vibration dans les deux expériences aide à confirmer la validité des résultats antérieurs . Dans la condition de vibration de l'ensemble du corps qui sont considérées ici, il peut y avoir plusieurs facteurs neurogéniques concernés dans l'altération de l'axe hypophyso-surrénal . Pendant les périodes de vibration, il y a une augmentation massive des stimulations des afférences au système nerveux périphérique, à la colonne vertébrale , aux ^{centres} centres supérieurs . Il y a aussi un effet direct de la stimulation mécanique sur les portions diverses du système nerveux central . En secouant des macaques anesthésiés au pento-barbital à 2 g, 5-40 hz , les rythmes du cerveau furent entraînés à la fréquence de vibration dans la formation réticulaire moyenne , nucleus centrum medianum, cortex visuel, et région de l'hippocampe . Les réponses psychiques des personnalités diverses des sujets aux périodes de test inconfortables et souvent douloureuses sont aussi significatives . Alors que nous pourrions supposer les réponses psychiques de nos sujets d'une intensité normale puisqu'ils étaient entraînés à ce genre d'exposition , la stimulation psychique et/ou mécanique peut exciter les centres inhibiteurs pour la sécrétion d'ACTH . (ENDROZI et al , 1959 ; MASON, 1958 , MASON, 1962, PORTER, 1954 , SLUSHER et HYDE, 1961) .

Il est possible que les vibrations utilisées dans nos expériences stimulèrent le sensorium de manière à causer :

- 1) excitation des centres inhibiteurs ,
- 2) dépression des centres de stimulation de la sécrétion de l'ACTH ,
- 3) Réduction dans la sécrétion des substances humorales qui pourrait stimuler une sécrétion d'ACTH. Une ^{du} réaction de sécrétion conduirait à une réduction de la sécrétion de l'hormone du cortex surrénal . La relation d'une telle réaction avec la vibration doit être ~~étudiée~~ étudiée

dans des espèces animales plus nombreuses et dans une large bande de fréquence et d'amplitude .

Puisque les sujets se plaignirent de dyspnée et de douleurs thoraco-abdominales pendant la vibration , l'on ne peut négliger la possibilité d'hypoxie et ses effets dépressifs sur la synthèse des hormones corticales . A la fois MAGID et al. 1960 , et MANDEL et LOWRY, 1962 ont fait part de dyspnée inspiratoire et d'aérophagie comme des facteurs importants de limitation de la tolérance aux vibrations de 5 à 10 Hz , pourtant jusqu'ici il n'ya pas d'évidence franche d'hypoxie des sujets avec programmes d'exposition aux vibrations .

Pendant la vibration, le sujet essaye de se protéger en positionnant son corps et par une activité musculaire volontaire et involontaire pour amortir la vibration et réduire la transmission de la force aux zones vulnérables du corps. De ces effets résultent des changements métaboliques qui sont reflétés de manière étonnante par un accroissement de la consommation d'oxygène (DIXON et al. 1960 ; DUFFNER et al., 1962) ; ERNSTING, 1961 ; HORNICK et al., 1961).

Pour des fréquences de 6 à 25 Hz , près des résonances primaires et secondaires du corps, les ^{valeurs de} ~~grandeurs~~ de l'augmentation de la charge métabolique résultant de cet effet ne sont pas extrêmement grande mais sont pourtant significatives (GAEUMAN, 1962) .

Les altérations ci-dessus des échanges respiratoires et de la demande en oxygène par le travail musculaire peut se traduire par une insuffisance relative d'oxygène qui peut se refléter en partie dans une diminution de la synthèse d'hormones corticales .

Ceci peut contribuer à la fatigue de sujets exposés aux vibrations et peut être un problème pour réaliser des environnements clos avec des réserves limitées d'oxygène .

Alors qu'on a pu montrer avec le stress du type froid , chaud , exercice, injection de formaldéhyde etc... une modification des fonctions thyroïdiennes et du PBI du sérum, l'absence d'un changement significatif du PBI du sérum après la vibration était en agrément avec les observations dans une variété de situations expérimentales différentes , HEPZEL et al. (1952) ont trouvé de larges fluctuations chez des individus exposés à des situations de stress et pas chez d'autres . " Uncomplicated surgical stress even of considerable magnitude, was not associated with any unusual fluctuations in serum PBI " .

De même , VOLPE et al. 1960 , BROOKS et al. 1953 ont trouvé qu'en dépit du stress et de la participation dans une compétition athlétique ou dans un examen le PBI reste à peu près constant ou produit des fluctuations qui sont dans les limites du normal . Des expositions plus prolongées aux vibrations auraient peut être pu produire dans nos expériences des changements statistiquement significatifs .

Résumé de la visite au Stand SCHENCK

Hamovre - Septembre 1964

Le VIBROVID II , nouvel appareil succédant au Vibroid III semble répondre à nos besoins .

Il peut analyser toute vibration à condition qu'elle soit périodique ou "quasi stationnaire" .

Il peut distinguer deux ou plusieurs fréquences dans une même vibration et en donner l'amplitude, la fréquence et le déphasage avec un pouvoir sélectif très grand .

Il peut comparer plusieurs vibrations entre elles de préférence en passant par l'intermédiaire d'une vibration de référence .

Ses performances sont assurées de 3 à 1000 Hz . Les essais complémentaires demanderont un délai d'un mois et demi environ . On pourra sans doute obtenir un appareil dont les caractéristiques seront bonnes pour des fréquences plus basses (1 à 2 Hz) à condition d'accepter de réduire la bande de hautes fréquences utilisables (par exemple en abandonnant la bande 300 à 1000 Hz).

Une exécution spéciale sera donc ~~nécessaire~~ nécessaire d'autant plus que nous demanderons sans doute la réintégration dans l'appareil de diverses facilités (Intégration etc...) abandonnées dans ce modèle et présentées dans le modèle précédent.

Cette exécution spéciale porterait à MARS-AVRIL 1965 le délai de livraison .

Les délais de livraison et le peu de certitude des performances justifient que nous gardions un oeil sur le marché au cas où apparaîtrait un appareil du même genre .

La nécessité d'analyser successivement les vibrations qui se rapportent à une vibration stable de référence, justifierait l'emploi d'un magnétophone pour enregistrer simultanément les paramètres étudiés qu'on pourrait alors analyser au Vibroid successivement.

HUMAN BODY AS A SYSTEM OF SUSPENDED MASSES

(Use and limits of a model)

The study of vibration effects on the human body was undertaken 25 years ago. Biomechanical models of the human body have since been suggested by several experimental results. These models, as any analog system does, allow interacting complex phenomena to be represented more exactly, on the one hand. On the other, they are liable to lead to valuable ergonomic results enabling in particular a dynamic evaluation of seats during steady state vibrations and shocks.

If repetitive experiments on a same subject in the same conditions allows to go as far as obtaining numerical evaluation of the model parameters, yet important differences are found between the subjects and for a same subject according to his posture.

As a rule, the dynamic properties of pelvis-table link can be obtained with a satisfactory degree of precision, but for the thorax-pelvis link the dispersion of the experimental results are too important.

Finally it is noted that the human body mechanical properties cannot be considered as varying linearly with the intensity of excitation. This makes more complex the ways of reacting to random stimulations usual in working situations.

HUMAN BODY AS A SYSTEM OF SUSPENDED MASSES

(Use and limits of a model)

The study of vibration effects on the human body was undertaken 25 years ago. Biomechanical models of the human body have since been suggested by several experimental results. These models, as any analog system does, allow interacting complex phenomena to be represented more exactly, on the one hand. On the other, they are liable to lead to valuable ergonomic results enabling in particular a dynamic evaluation of seats during steady state vibrations and shocks.

If repetitive experiments on a same subject in the same conditions allows to go as far as obtaining numerical evaluation of the model parameters, yet important differences are found between the subjects and for a same subject according to his posture.

As a rule, the dynamic properties of pelvis-table link can be obtained with a satisfactory degree of precision, but for the thorax-pelvis link the dispersion of the experimental results are too important.

Finally it is noted that the human body mechanical properties cannot be considered as varying linearly with the intensity of excitation. This makes more complex the ways of reacting to random stimulations usual in working situations.

HUMAN BODY AS A SYSTEM OF SUSPENDED MASSES

(Use and limits of a model)

The study of vibration effects on the human body was undertaken 25 years ago. Biomechanical models of the human body have since been suggested by several experimental results. These models, as any analog system does, allow interacting complex phenomena to be represented more exactly, on the one hand. On the other, they are liable to lead to valuable ergonomic results enabling in particular a dynamic evaluation of seats during steady state vibrations and shocks.

If repetitive experiments on a same subject in the same conditions allows to go as far as obtaining numerical evaluation of the model parameters, yet important differences are found between the subjects and for a same subject according to his posture.

As a rule, the dynamic properties of pelvis-table link can be obtained with a satisfactory degree of precision, but for the thorax-pelvis link the dispersion of the experimental results are too important.

Finally it is noted that the human body mechanical properties cannot be considered as varying linearly with the intensity of excitation. This makes more complex the ways of reacting to random stimulations usual in working situations.

2

Les fréquences de résonance du corps
humain considéré comme un système de masses suspendues
(vibrations verticales)

Traduction tirée de " Human performance under Vibrational Stress " par COERMANN - MAGID - LANGE - 63 - Tb. 264

Les propriétés dynamiques du corps humain furent analysée par diverses approches.

L'impédance mécanique fut mesurée dans les deux positions " assis " et " debout " (COERMANN, 1962). ~~Le corps répond comme une masse pure, i.e...~~

Jusqu'à 2 hz :

Le corps répond comme une masse pure, i.e. Toutes les parties du corps se déplacent ensemble et pratiquement sans déplacement relatif.

Entre 4 et 6 hz environ

Il se produit une résonance avec augmentation de l'impédance d'environ 1,85 fois l'impédance de la masse pure. Cette résonance domine jusqu'à environ 9 hz.

Jusqu'à 9 hz :

le corps se comporte comme un système masse-ressort plus un amortisseur de coefficient d'amortissement $\zeta = 0,34 = \frac{c}{c_c}$

Au dessus de 10 hz

on peut détecter deux résonances à 11 hz et 15 hz qui se superposent au système ci-dessus

Pour les fréquences plus hautes :

la valeur de l'impédance du corps humain se rapproche de celle d'un amortisseur pur avec le facteur d'amortissement de la première résonance.

Les changements de posture de la position " assis-raidi " à " assis-relâché " provoquent une légère diminution de la valeur des maxima d'impédance révélant un facteur d'amortissement plus élevé, et une légère baisse des fréquences de résonance indiquant une diminution d'élasticité (moindre effet " ressort ").

La résonance principale entre 4 et 6 hz qui se situe dans le tronc pour le sujet " assis " fut confirmée par d'autres méthodes d'investigation : les mesures de la déformation du corps. (CLARK; LANGE et COERMANN 1962), ~~et les mesures de la transmission des vibrations à la~~ les mesures de la pression dans le colon (WHITE, LANGE et COERMANN 1962) et les mesures de la transmission des vibrations à la tête du sujet. Les trois résonances trouvées par la méthode de l'impédance furent clairement indiquée par la courbe de transmissibilité (COERMANN 1962, fig 14). De plus on remarquait une légère " bosse " à 3 hz.

La fréquence propre fondamentale du système thoraco-abdominal se situe à 3 hz et fut déterminée en mesurant simultanément les oscillations de la paroi abdominale, les expansions du thorax, et la vitesse de l'air entrant et sortant de la bouche d'un sujet vibré dans le sens longitudinal (COERMANN, ZIEGENRUCKER, WITTWER et VAN GIERKE 1960). Chacune de ces trois méthodes montrèrent un maximum aigu vers 3 hz, indiquant qu'à cette fréquence, dans cette position et avec des secousses longitudinales, les ~~vitesse~~- viscères se déplacent de concert avec le diaphragme, une partie des poumons et probablement le coeur. A cause de leur grande mobilité, ces organes se déplacent fortement si le corps est excité longitudinalement à 3 hz.

L'inertie de cette masse produit une légère augmentation des mouvements de la tête, d'où un maximum aigu à 3 hz.

Un maximum correspondant est à peine visible sur la courbe de contrainte (" strain ") pour le sujet " assis-raidi " (CLARK et coll. 1962) mais très prononcé pour certains sujets (CLARK 1962).

(~~CLARK et coll. 1962~~).

Une autre résonance interne fut détectée par la méthode symptomatologique avec des sujets assis subissant des vibrations verticales importantes (MAGID et COERMANN 1960). La plupart des sujets se plaignaient de douleurs importantes dans le thorax à des fréquences aux environs de 7 à 8 hz. Comme la fréquence propre du coeur dans la direction longitudinale est environ 4 à 5 hz, il était peu probable que cette douleur venait d'un déplacement excessif du coeur.

Cette fréquence de 7 hz est mise en évidence dans les études des contraintes (Circumferential Strain) mais actuellement on peut seulement faire l'hypothèse que le mécanisme opère dans un plan horizontal et n'est pas sujet à la détection par des paramètres verticaux.

Pourtant cette douleur du thorax est le symptôme le plus important pour des vibrations longitudinales de tout le corps et est déterminant pour la limite de tolérance à 7 hz.

Baisse de l'Acuité Visuelle
due aux vibrations
par Karl O. LANGE et RR. COERMANN
1963.

L'acuité visuelle peut être perturbée

- par une diminution du pouvoir séparateur
- par un trouble du système nerveux central devenu incapable d'analyser les informations qu'il reçoit
- par une résonance ou un mouvement excessif des globes oculaires
- par la distraction que provoquent les gênes et douleurs ressenties pendant l'exposition aux vibrations.

Le matériel de laboratoire employé pour mesurer l'acuité visuelle est considérable (tests de SUELLEN, BARTHEY 58) et on connaît l'influence de plusieurs facteurs, illumination, temps d'exposition(cf Bibliographie N° 247 à 250)

COERMANN avait étudié la détérioration d'A.V. entre 20 et 140 hz et avait trouvé deux baisses importantes d'A.V., entre 25 et 40 hz et entre 60 et 90 hz.

La recherche porte ici sur la bande de 1 à 20 hz. La vibration est sinusoïdale et verticale, le sujet assis dans la situation d'un pilote d'avion - les mesures sont faites avec un appareil original (COERMANN et coll.). Durée moyenne de l'épreuve = 2 à 3 min.

Mesures Les mesures sont faites avant, pendant et après exposition aux vibrations.

Avant Les mesures d'A. V. servent de base au calcul de la détérioration.

Pendant (1 min. environ)

1° - 0 à 2 hz les yeux se déplacent avec le corps qui se comporte comme une masse - (Cf les mesures de l'impédance).

Forte détérioration à 1hz

2° - 2 à 12 hz les détériorations maxi correspondent aux résonnances (Surtout ; 3 hz : thoraco abdom, 5hz : globale, 7 hz : thorax, 10 : inexplicé)

3° - 12 à 20 hz les vibrations sont moins transmises à la tête (sauf chez certains sujets), mais l'oeil peut de moins en moins suivre le mouvement - (zone critique de tremblement pour l'oeil : 8 à 16 hz)

4° - Au dessus de 20 hz l'image se déplace sur la rétine car les yeux ne peuvent suivre le mouvement, cela expliquerait pourquoi au dessus d'une certaine fréquence, la détérioration est proportionnelle au déplacement des globes oculaires, c'est à dire au déplacement de la tête.

Après : (1 min. environ)

1/ après exposition à 1 hz grand résidu de détérioration

après à 5 hz il y a un résidu si la vibration a duré au moins quelques minutes

après à 7 hz le plus grand effet résiduel

après à 12 hz et au dessus la vision est pratiquement normale 1 minute après la vibration .



Le 18 JUILLET 1964.

Note de frais de A. BERTHOZ

Essais d'ANGERS, les 6 et 7 JUILLET 1964.-

Pansion : deux jours et trois nuits..... 67 F.

Voyage en voiture :
600 km à 15 centimes le km..... 90 F.

TOTAL : 157 F.

Mme BERTHOZ Michelle

4 rue Victor Cousin

PARIS V

c c p n° 360589 paris.

Doit Laboratoire de Physiologie du Travail du C.N.R.S

41 rue Gay-Lussac

Paris V

Pour traductions; détail :

80 pages à 250 mots par page ,au tarif de 4, 50 f les 100 mots

soit 11,25 f la page ;

soit au total.....L.....900 f

dactylographie 30 f

TOTAL 930 f

La présente facture de NEUF CENT TRENTE Francs faite à Paris le 3 juillet 1964, certifiée conforme et véritable .En votre aimable règlement.

M. BERTHOZ

M. Berthoz

Mme BERTHOZ Michelle
rue Victor Cousin
PARIS V
n° 360589 paris.

Doit Laboratoire de Physiologie du Travail du C.N.R.S
41 rue Gay-Lussac
Paris v

Pour traductions; détail :

80 pages à 250 mots par page ,au tarif de 4, 50 f les 100 mots

soit 11,25 f la page ;

soit au total.....L.....900 f

dactylographie 30 f

TOTAL 930 f

La présente facture de NEUF CENT TRENTÉ Francs faite à Paris
le 3 juillet 1964, certifiée conforme et véritable .En votre aimable
règlement.

M. BERTHOZ

M. Berthoz

RAPPORT D'ACTIVITE

A. BERTHOZ : Attaché de recherche au Laboratoire de Physiologie du C.N.R.S.

I. SUJET ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE EN COURS

Le sujet de la recherche: "Etude biomécanique et physiologique des vibrations appliquées à l'Homme considéré comme un système de masses suspendues " est le même que celui qui fit l'objet du précédent rapport .

L'objectif principal de l'année écoulée fut d'accroître les connaissances des niveaux de vibrations réellement imposées à l'Homme sur le terrain , et des transformations , amplifications et filtrages de la vibration par le corps humain. La recherche de critères physiologiques pour déterminer des niveaux tolérables est en effet soumise à une connaissance préalable des caractéristiques biomécaniques des différentes parties du corps humain .

Ce travail , dirigé par le Professeur SCHERRER et le Docteur WISNER fait l'objet d'une Thèse de Docteur-Ingénieur (Directeur de Thèse : Pr. VICHNIENSKY) dont la soutenance est envisagée pour le dernier trimestre 1965 .

II. ORGANISATION DE LA RECHERCHE

Le tableau ci-dessous indique l'organisation générale de notre recherche

	<u>Recherche</u>	<u>Moyens</u>	<u>But</u>
Premier Se- mestre 1964	Etude des vibrations à bord d'engins divers	Chaire A.C.B. Analyse Tolana Cinéma Photo	- Elaboration d'une méthode d'étude des vibrations à bord des véhicules - Vérification sur le terrain de travaux de laboratoire
Deuxième Se- mestre 1964	Complément à l'étude des véhicules sur le terrain Mise en place et contrôle du dispositif expérimental de laboratoire (table vibrante) Essais de sièges en labo- ratoire	Chaire A.C.B. (adaptée) Table vibrante Divers appareils de contrôle Sonagraphe Electrographe	- Connaissances fondamentales sur les caractéristiques biomécaniques du corps humain. - Vérification de 6 valeurs d'une méthode d'étude des sièges .
Premier tri- mestre 1965	Etudes de laboratoire Etudes théoriques		- Fin du programme d'essai de sièges - Etude théorique de la distribution des amplitudes sur les véhicules - Etude des mouvements de la tête - Début d'études physiologiques lo- cales.

2-Deuxième Semestre 1964

Etudes sur le terrain : Les mesures sur véhicule ont été poursuivies ; en particulier pour une étude de la dispersion due à la variations de poids et de taille des sujets . On a fait des mesures sur tracteur dans une situation très reproductible (Chemin de roulement) .

Une étude complète a été faite d'un autre engin lourd (Bulldozer à pneus C.R.8) .

Ces études ont, parmi d'autres résultats , confirmé d'une part la validité de la méthode sur le terrain , et d'autre part la nécessité d'études fondamentales en laboratoire .

Etudes en laboratoire : On a prolongé l'étude des engins par des ^{expériences} ~~essais~~ sur ~~la~~ table vibrante , ~~du système Homme - Siège~~ . L'élaboration et la mise au point de l'ensemble expérimental a demandé un travail important .

Concernant le système Homme siège -
Outre des essais de siège et des vérifications de résultats antérieurs fondamentaux, on a fait avec la table vibrante une étude préliminaire de l'influence des vibrations sur la vitesse d'évacuation de l'eau dans l'estomac . Les conditions de vibration choisies ^(pour cette dernière étude) étaient voisines de celles que l'on rencontre sur les tracteurs .

Etudes diverses : On a utilisé les bandes magnétiques obtenues sur les engins pour vérifier l'intérêt de diverses techniques de description des vibrations (filtrage , analyse par sonagramme) .

3- Premier trimestre 1965

Outre la continuation des essais de sièges et le dépouillement des expériences du premier trimestre , il a été engagé un programme d'étude des mouvements de la tête . Il a déjà été mis en évidence sur un sujet , par l'emploi de plusieurs techniques , que pour une vibration verticale dans une certaine bande de fréquence (2 à 5 hz), il se produit une transformation du mouvement de la tête . On peut décomposer ce mouvement en deux mouvements simples . Ceci rend compte en particulier de divergences entre les résultats des mesures sur le terrain et ceux obtenus par des travaux antérieurs .

TRAVAUX EN COURS

Technique : On procède à la mise au point d'un dispositif qui permettra de doubler les amplitudes de secousses disponibles sur la table vibrante . On procède par ailleurs à une étude sur les méthodes de dépouillement par calculatrice (Analyse de FOURIER en particulier) et à l'amélioration des techniques de mesure (Analyseurs vectoriels , enregistrement magnétique)

Expériences prévues ou en cours : Un ~~programme~~ d'étude de l'électromyographie des muscles de la nuque est en cours , ainsi que diverses expériences destinées à éclairer quelques uns des nombreux points encore obscurs dans le comportement biomécanique de l'Homme soumis aux vibrations .

la qualité. Ces paramètres mesurés au banc d'essai (à réaliser) tiendraient évidemment compte de la destination de l'outil (c'est-à-dire du matériau à travailler), de son poids, de sa force de pénétration, etc., etc....

En effet une augmentation de la pénétration se traduit souvent par une augmentation du poids de l'engin (brise-béton de 35 kg) or le poids est jusqu'alors considéré comme nuisible (déplacement du marteau pénible). Cependant en ce qui concerne la transmission des vibrations la masse favoriserait leur amortissement. En outre, à une augmentation de poids importante correspond une diminution de la cadence de frappe (marteau de 36 kg, 1.100 coups/minute); (marteau de 6 kg, 3.000 coups/minute). Or l'augmentation de la cadence semble être considérée comme souhaitable (Cahier n° 4, 1964 - OPPBTP).

Les outils les plus nocifs semblent être les outils ébarbeurs et burineurs (2.000 à 3.000 coups/minute) pourtant d'un poids léger (2 à 5 kg) comparés aux marteaux piqueurs. On pourrait donc penser que la nocivité est liée à la réaction du matériau travaillé (métal sur métal dans le cas de l'ébarbage).

Tous ces aspects semblent bien contradictoires.

La solution réside peut être dans l'analyse des différentes fréquences de la source des vibrations. En effet, plusieurs fréquences sont à envisager :

- a/ - une fréquence basse liée à la fréquence de frappe directement issue de la réaction du piston chassé par l'air comprimé (20 à 60 Hz), fréquence qui peut être considérée comme sinusoïdale
- b/ - des fréquences plus élevées consécutives à la percussion du piston sur le trépan
- c/ - des fréquences de réaction du trépan sur le matériau à travailler.

....

Les paramètres de mesure pourraient être les suivants :

- 1°/ - Force d'application à la poignée,
- 2°/ - Préhension de la poignée,
- 3°/ - Etude de l'électromyographie des muscles du bras et de l'avant-bras en fonction des paramètres ci-dessus,
- 4°/ - Force de percussion,
- 5°/ - Accélération sur le corps du marteau, à la poignée, au poignet et au coude de l'ouvrier,
- 6°/ - Analyse des différentes fréquences de vibration,
- 7°/ - Renouveler 4° et 5°, en fonction du poids de l'outil, de la cadence de frappe, du matériau à travailler, de la pression exercée sur l'outil, de la morphologie de l'ouvrier, de sa position de travail,
- 8°/ - Définir (si possible) une position rationnelle de travail compatible avec la SECURITE,
- 9°/ - Formation élémentaire des utilisateurs.

Le système amortisseur préalablement étudié par le Centre de Physiologie du Travail ne serait cité que comme exemple, non pas de réalisation qui doit être faite par des spécialistes, mais de principe.

III - TRAVAIL REALISE.

I/ - Dernier trimestre 1963.

Bibliographie. Il a été constitué un fichier bibliographique d'environ trois cent titres, qui représentent une grande partie des ouvrages publiés entre 1939 et 1963 dans le domaine des vibrations entretenues. Une centaine de travaux ont été analysés et nous disposons en laboratoire d'une cinquantaine de documents complets, choisis parmi les plus intéressants. Cette bibliographie est complétée régulièrement par des travaux récents/

Chaine A.C.B. On a mis au point la Chaine d'enregistrement photographique A.C.B. Cette chaine permet l'enregistrement sur papier de variables diverses, déplacement, vitesse, accélérations, angles, pressions, etc..... Nous l'utilisons avec des capteurs d'accélération à mutuelle inductance. Nous avons apporté à cette chaine quelques améliorations pour permettre son utilisation rapide.

2/ - Janvier - Février 1964.

Mécanique des vibrations. La théorie physique des mouvements vibratoires a été étudiée par lecture et comparaison de traités sur la mécanique des vibrations et par confrontation avec les recherches expérimentales antérieures.

Cette étude cherche à définir des critères pour caractériser les vibrations des engins et à juger l'intérêt de modèles biomécaniques du corps humain.

Etudes d'engins. Nous avons mesuré les accélérations subies par les passagers et le conducteur d'un char VTT transport de troupe.

Nous avons fait l'étude complète d'une chargeuse-pelleuse de Génie. Comme moyens nous avons utilisé à l'enregistrement photographique, le film cinématographique ultrarapide, l'analyse de fréquence Tolana.

Enregistrement magnétique des vibrations. Nous avons cherché la possibilité d'enregistrer les vibrations avec un magnétophone commercial pour obtenir rapidement une analyse de fréquence.

ETUDES EN COURS : Une étude des tracteurs agricoles est en cours. Nous pensons adjoindre aux variables physiques des variables physiologiques (fréquence cardiaque, études dimensionnelles).

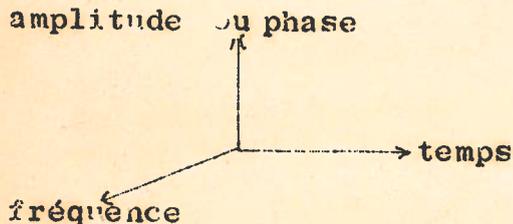
ETUDE PHYSIQUE D'UNE SOURCE DE VIBRATION

Ce qui suit rappelle les concepts essentiels pour l'analyse de la plupart des vibrations. Ces concepts et les méthodes de mesure indiquées servent dans l'analyse d'un très grand nombre de fonctions oscillantes (Vibrations stationnaires ou transitoires, chocs, bruits, électroencéphalographie, électromyographie...).

Les quatre paramètres les plus importants pour caractériser une vibration sont :

- le temps t (en secondes par exemple)
- la fréquence f (en cycles par secondes), ou son équivalent la pulsation $\omega = 2\pi f$ en radians par seconde
- la phase en degrés ou en grades
- l'amplitude (en unités de longueurs, de vitesse, d'accélération, etc...).

Analyser une vibration revient à étudier les variations de ces différents paramètres les uns par rapport aux autres. Le trièdre ci-dessous schématise les combinaisons possibles.



On obtiendra successivement :

- dans le plan amplitude-temps : l'"histoire" de la vibration (x en fonction de t) qui donne lieu à l'analyse de l'amplitude.
- dans le plan amplitude-fréquence : l'analyse de fréquence (ou analyse spectrale)
- dans le plan fréquence-temps : l'analyse sonagramme.

Nous dirons quelques mots de l'analyse par corrélation

I/ - ANALYSE DE FREQUENCE, ANALYSE DE L'AMPLITUDE.

1) - Vibrations sinusoidales

Une vibration sinusoidale se caractérise par le fait que le mouvement se produit à une fréquence f donnée, avec une amplitude maxi x_m constante et une amplitude instantanée $x(t)$ de la forme :

$$x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi) \quad \varphi \text{ constant}$$

Analyse de fréquence. Il n'y en a pas à faire, il suffit d'obtenir sur un papier le tracé du mouvement pour calculer ω et f .

Analyse de l'amplitude. On peut mesurer directement sur le tracé l'amplitude maxi $x_m(t)$. Mais on sait faire une description plus complète de l'amplitude : on peut calculer sa valeur moyenne \bar{x} , sa valeur quadratique moyenne $\sqrt{\bar{x}^2(t)}$ ou plutôt la racine carrée de $\bar{x}^2(t)$ que l'on note σ

Rappelons que pour une fonction $x(t)$ quelconque :

La valeur moyenne est $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$

La valeur quadratique moyenne est $\bar{x}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$ avec

$$\sigma = \sqrt{\bar{x}^2}$$

Autres descriptions

Il est commode de considéré un mouvement sinusoïdal comme la projection sur l'axe ox du mouvement d'un vecteur d'amplitude x_0 tournant autour de o avec la vitesse angulaire ω . Une telle représentation permet d'assimiler la vibration à une grandeur dite "complexe" exprimée par un "nombre complexe". Ce qui, a son tour, permet de simplifier les calculs concernant ce type de vibrations.

On dit que l'amplitude instantanée $x(t)$ est la partie réelle de la vibration complexe $X(t)$

$$X(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)$$

j = symbole des "imaginaires"

on démontre que $\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi) = e^{j(\omega t + \varphi)}$
et on exprime la vibration complexe sous la forme: $X(t) = x_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$

2) - Vibrations périodiques.

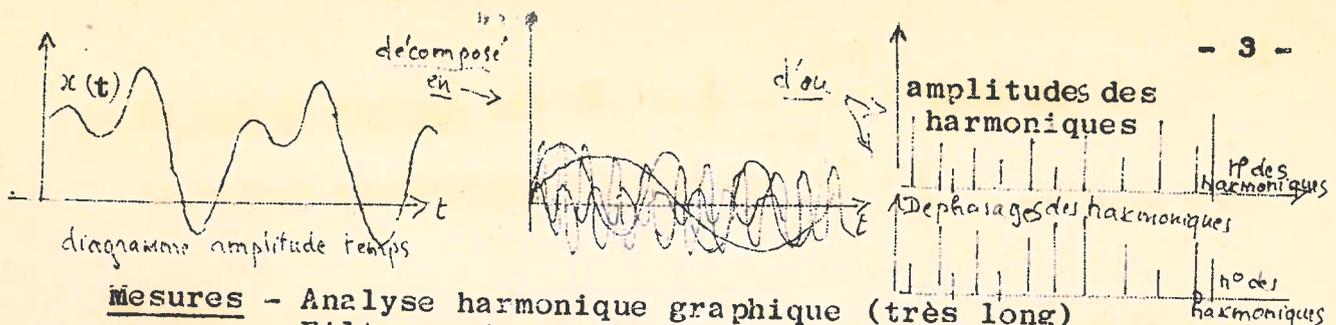
L'amplitude instantanée d'une fonction périodique est du type $x(t) = x(t + nT)$ ce qui veut dire qu'elle reprend la même valeur au bout d'un temps T . Pour étudier une telle vibration on démontre qu'on peut la décomposer en une somme de sinusoïdes appellées harmoniques. On dit qu'on décompose la vibration en série de Fourier.

L'amplitude instantanée est alors de la forme $x(t) = x(t + nT)$
$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

- ou ω est la pulsation dite fondamentale
- C_n est l'amplitude de l'harmonique n
- $n\omega$ est la pulsation de l'harmonique n
- φ_n est la phase de l'harmonique n

Le vecteur représentant la vibration sera donc la somme des vecteurs représentant les différentes harmoniques.

Pratiquement on aura décrit la vibration lorsqu'on disposera (1) du diagramme $x(t)$ en fonction de t ; (2) des amplitudes et des déphasages des divers harmoniques. La figure 1 récapitule les différentes étapes d'une telle étude.



- Mesures** - Analyse harmonique graphique (très long)
 - Filtrage des différentes fréquences par des filtres électriques (précis)
 - Analyse vectorielle wattmétrique
 (ne donne pas les déphasage entre les diverses harmoniques).
 - Analyse par calculatrice : on prend une période de la vibration, on la découpe en un certain nombre d'éléments (20, 50; 100) et on tabule les différentes valeurs de l'amplitude ainsi obtenue. On introduit ces valeurs dans une calculatrice programmée pour faire l'analyse de Fourier. La machine donne directement les amplitudes des différentes harmoniques et de leurs déphasages. Un programme de synthèse permet de reconstituer la courbe initiale. Cette méthode est très précise.

En somme il faut retenir que pour analyser une vibration périodique on peut la décomposer en une série discontinue de sinusoides et la représenter par un tableau de valeurs numériques (amplitudes et phases des harmoniques et de la fondamentale.)

3) Vibrations aléatoires
 a - Analyse spectrale

... une série discontinue de sinusoides. On cherche leur dérivée en un point de la courbe...

Ces vibrations contiennent théoriquement toutes les fréquences et de façon imprévisible, on ne peut donc pas les décomposer en fraction de la fréquence. Pour cela on garde le principe de la décomposition de Fourier. On démontre que la série de Fourier doit être remplacée par sa limite si la fréquence de la fondamentale tend vers zéro: L'intégrale de Fourier

Si $x(t)$ est la vibration aléatoire $x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$
 avec $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$

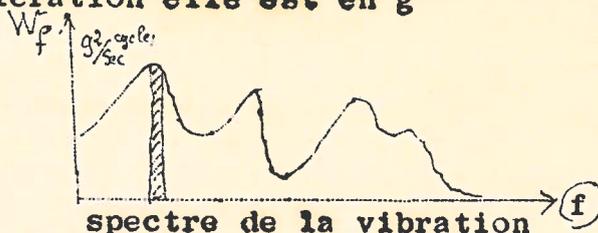
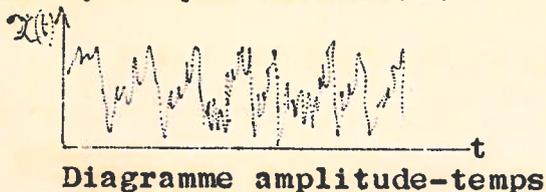
ce qui définit la densité spectrale $S(\omega)$ qui est une mesure de l'"intensité" ou de la "densité" des pulsations (ou des fréquences f) présentes dans la vibration.

On démontre que $\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt$
 $T = \text{periode} = \frac{1}{f}$

$S(\omega)$ est donc une moyenne quadratique par unité de fréquence. Elle s'exprime en valeurs quadratiques moyennes par radian par seconde. On obtient donc une courbe continue ou spectre de la vibration aléatoire. La surface entre la courbe et l'axe des fréquences représente la moyenne quadratique totale de $x(t)$

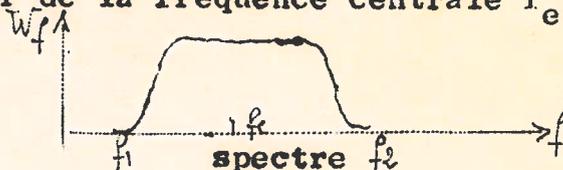
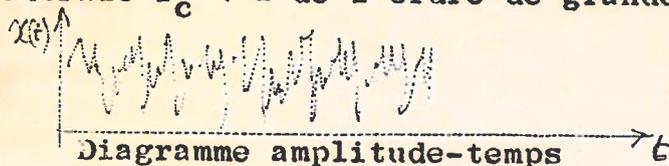
On utilise pratiquement le symbole $W_f = 4\pi S(\omega)$ -
 W_f est la densité spectrale mesurée; elle s'exprime en valeurs moyennes quadratiques par cycles par secondes

. Dans le cas des mesures d'accélération elle est en g^2 par cycle par seconde. (I).



CAS PARTICULIERS.

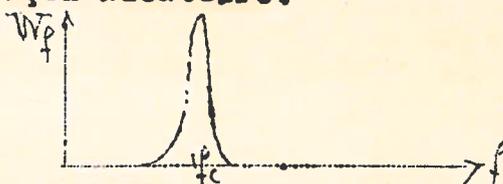
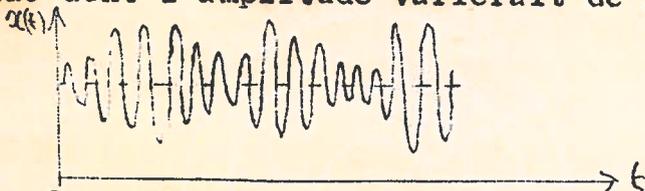
Spectre à bande large. C'est le spectre d'une vibration aléatoire qui ne contient qu'un nombre limité de fréquences (Alors qu'une véritable vibration aléatoire contient toutes les fréquences) La largeur de la bande est grande par rapport à la fréquence centrale f_c (ou de l'ordre de grandeur de la fréquence centrale f_c).



Dans ce cas l'intégrale de Fourier est prise de ω_1 , à ω_2 au lieu de $-\infty + \infty$. La plupart des spectres aléatoires rencontrés dans la réalité sont de ce type (par exemple le "bruit blanc" d'un générateur qui fonctionne entre deux fréquences).

Spectre à bande étroite. C'est le spectre d'une vibration aléatoire qui n'a de valeurs significatives que dans une bande de fréquence étroite par rapport à la grandeur de la fréquence centrale.

La vibration correspondante a les caractéristiques d'une sinusoïde dont l'amplitude varierait de façon aléatoire.

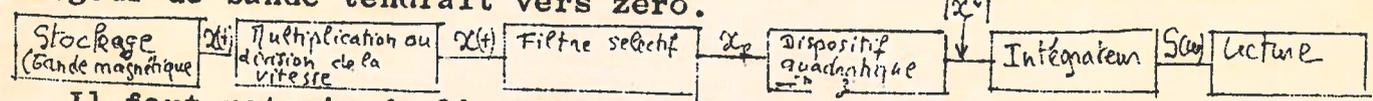


On rencontre ce type de vibration dans la réponse d'un système de masses suspendues excité par une vibration aléatoire. Ceci permet la prévision de l'ampleur des mouvements d'un tel système avant sa réalisation ou pour le modifier une fois réalisé (ex. : véhicule sur un terrain).

(I) - Une autre définition de la densité spectrale est la suivante : c'est la valeur limite de la réponse quadratique moyenne $\overline{x^2}$ d'un filtre sélectif parfait (gain zéro en dehors de la bande passante, gain 1 dans la bande de passante) qui a une courbe caractéristique rectangulaire) divisée par la largeur de la bande passante du filtre lorsque cette largeur tend vers zéro. C'est d'ailleurs ainsi qu'on mesure pratiquement la densité spectrale. (Seulement la largeur de bande des filtres n'est pas vraiment nulle).

MESURES -

Le schéma ci-dessous indique les principales étapes de l'analyse spectrale. Nous avons indiqué un dispositif multiplicateur de vitesse qui est particulièrement intéressant pour l'étude des basses fréquences. Le schéma propose l'utilisation d'un seul filtre en changeant la vitesse de la bande magnétique. On peut aussi utiliser une vitesse unique et une batterie de filtres. La mesure réalisée est toujours une approximation puisque pour satisfaire à la théorie il faudrait disposer d'un filtre parfait dont la largeur de bande tendrait vers zéro.



Il faut retenir de l'analyse spectrale qu'on décrit la vibration par une fonction continue de la fréquence. Contrairement aux vibrations périodiques pour lesquelles on connaît exactement la valeur numérique des différents harmoniques on ne dispose que d'une courbe représentant les valeurs les plus probables de l'intensité (moyenne quadratique) des différentes fréquences.

b - Analyse de l'amplitude d'une vibration aléatoire.

La connaissance que l'on a de la valeur instantanée d'une vibration aléatoire $x(t)$ à un instant donné ne fournit aucune information sur la valeur qu'elle prendra à un instant ultérieur. On sait seulement qu'il y a une certaine probabilité pour que sa valeur soit située à l'intérieur d'un certain domaine de valeur. C'est-à-dire qu'on ne peut le décrire qu'en termes statistiques.

On connaît l'emploi ^{en} statistique classique des notions de :
 - Densité de probabilité - La densité de probabilité p_x mesure la probabilité pour que la fonction $x(t)$ soit comprise entre x_1 et $x_1 + dx_1$.

- La probabilité cumulative - La probabilité cumulative $P(x \gg)$ est la probabilité pour que $x(t)$ dépasse une certaine valeur. On normalise les courbes en considérant le rapport $\frac{x}{\sigma}$. La probabilité cumulative est alors $P(\frac{x}{\sigma} \gg)$

Ceci posé on peut s'intéresser à deux sortes de valeurs de l'amplitude d'une vibration aléatoire :

- ses valeurs instantanées x_1
- ses valeurs maximales x_m



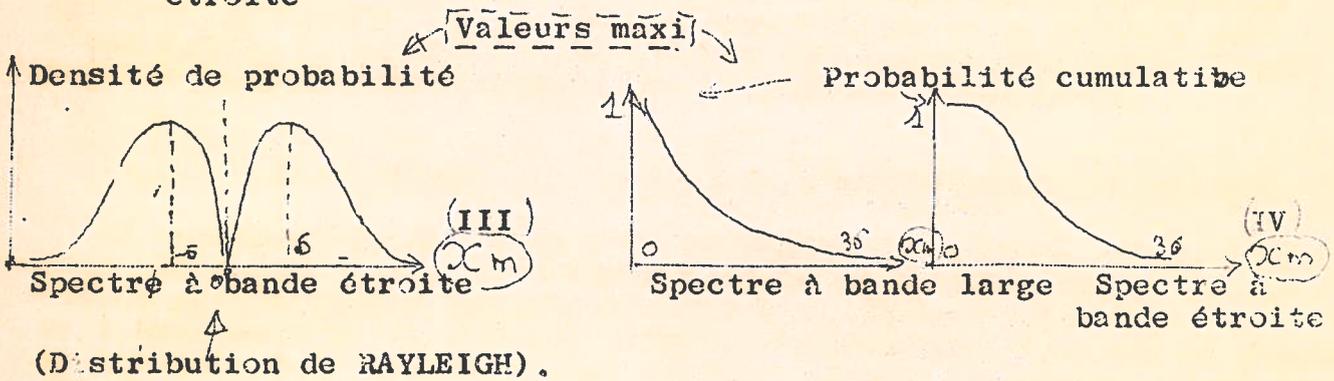
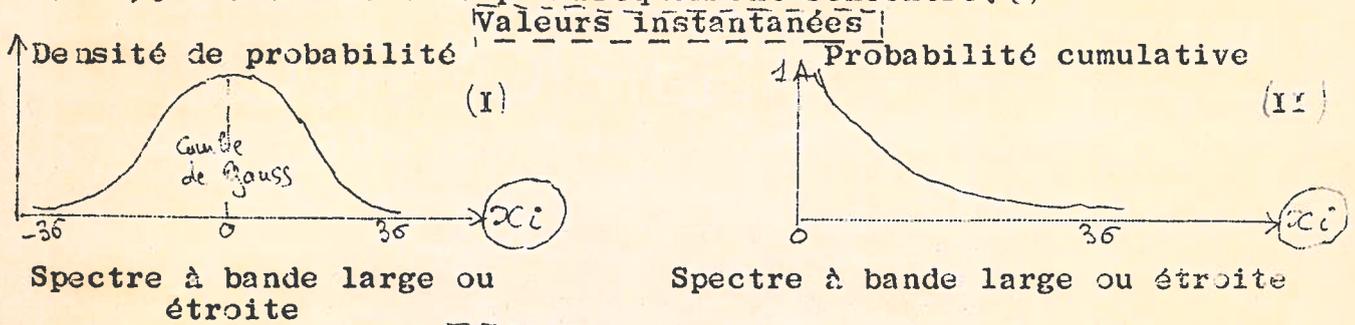
Le tableau ci-dessous indique les différentes analyses possibles et donc les différentes courbes que l'on peut obtenir.

	Densité de probabilité	Probabilité cumulative
(cc) Valeurs instantanées....	I	II
(cc) Valeurs maxi.....	III	IV

.....

Exemple :

Les courbes ci-dessous donnent quelques exemples de courbes dans le cas d'une vibration gaussienne à bande large ou étroite. Une vibration gaussienne est une vibration pour laquelle la distribution des amplitudes instantanées est une loi normale (ou de Gauss). C'est le cas le plus fréquemment rencontré. (1)



MESURES. L'ensemble des résultats obtenus ci-dessus montre que l'analyse de l'amplitude d'une vibration aléatoire ne tient pas compte de la fréquence. On peut bien sûr appliquer les différents concepts à l'analyse de la vibration globale. On utilisera pour cela des compteurs statistiques de niveaux ou de la tabulation manuelle.

Si on veut utiliser la théorie correctement on doit filtrer la vibration et les fonctions de probabilité doivent être les signaux de sortie $x'(t)$ d'un filtre sélectif appliqué à la vibration aléatoire $x(t)$.

On peut alors utiliser diverses techniques et en particulier des papiers de probabilité. Ces techniques permettent de caractériser l'amplitude de la vibration par des paramètres simples dont on pourra facilement étudier la variation.

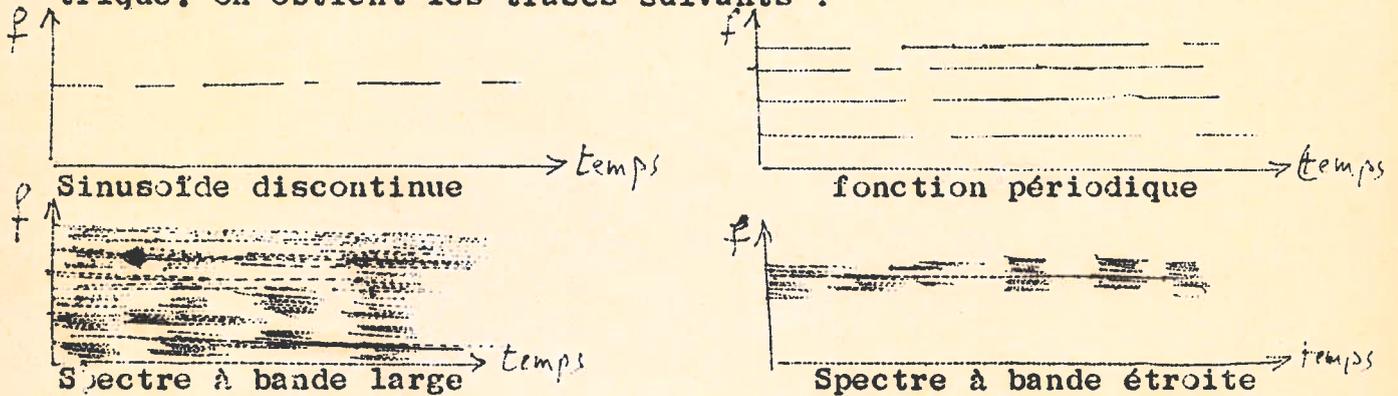
(1) les courbes de probabilités cumulatives sont dessinées seulement pour des valeurs positives de x (de 0 à 3σ) d'une osine de Gauss classique.

La courbe I est dans la moitié d'une osine de Gauss classique.

La courbe II est dans la moitié d'une osine de Gauss classique.

II/ - ANALYSE FREQUENCE - TEMPS

Quelle que soit la nature de la vibration on peut obtenir la variation de la fréquence en fonction du temps. Cette méthode permet de faire en même temps une analyse de fréquence et l'étude de la répartition temporelle des différentes fréquences. La technique utilisée consiste à envoyer le signal analysé dans une batterie de filtres. Suivant l'intensité du courant sortant du filtre un papier spécial sera plus ou moins brûlé par un petit arc électrique. On obtient les tracés suivants :



Ceci est intéressant pour voir si les phénomènes vibratoires sont continus, intermittents et pour chiffrer exactement leur répartition temporelle. On l'obtient avec un appareil nommé sonographe d'où le tracé de sonagramme.

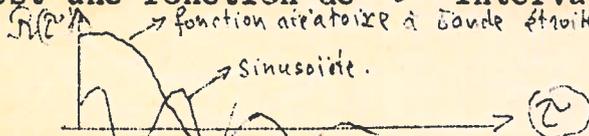
III/ - ANALYSE PAR CORRELATION.

Autocorrélation. On fait l'étude de la vibration en effectuant la moyenne temporelle du produit des valeurs instantanées d'une fonction x(t) à deux instants t et t + τ

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot x(t + \tau) dt$$

R(τ) est la fonction d'autocorrélation.

R_x(τ) est une fonction de τ intervalle entre les 2 mesures.



Corrélation croisée même chose entre deux fonctions x₁(t) x₂(t)

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x_1(t) \cdot x_2(t + \tau) dt$$

R(τ) est la fonction de corrélation croisée

On démontre que la connaissance de R(τ) entraîne la connaissance de S(ω) et réciproquement. L'étude de R(τ) peut être intéressante lorsqu'il y a un bruit de fond important.

A/ - DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR L'ETUDE DES VIBRATIONS SINUSOIDALES.

1/ - Rappel théorique.

Un solide soumis à des vibrations sinusoidales subit une accélération γ que l'on peut calculer en partant de la fréquence f et de l'amplitude a supposées connues.

La relation liant γ , a , et f est :

$$\gamma_{\max} = 4\pi^2 a f^2$$

(γ est l'accélération en mm/sec²
(a est l'amplitude en mm
(f la fréquence en cycles/sec ou hertz

On exprime souvent l'accélération en multiples de g (g est l'accélération de la pesanteur) $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$. Les accélérations rencontrées verticalement sur les véhicules de tourisme sont de l'ordre de 0,1 à 0,5 g crêt à crêt.

2/ - Table vibrante (figure 1 en annexe).

La table vibrante fonctionne sur le principe du système bielle-manivelle qui transforme un mouvement de rotation en un mouvement de translation.

La table vibrante est entraînée par un moteur à courant continu (M) dont la vitesse de rotation impose la fréquence de la vibration. Cette fréquence est donc réglable de façon continue (0 à 20 Hz). Sur l'arbre du moteur est disposé un excentrique (E) réglable manuellement à l'arrêt. Cet excentrique permet le réglage de l'amplitude entre 0 et + 10 mm.

Une bielle (B) attelée à cet excentrique transforme le mouvement de rotation du moteur en mouvement oscillatoire, approximativement sinusoidal, du plateau de montage. Ce dernier est élastiquement monté sur le bâti au moyen de ressorts à lame (R), ce qui assure un guidage exempt de jeu. Les vibrations sont normalement dirigées horizontalement. On les convertit en vibrations verticales en utilisant des ressorts montés en parallélogramme et en empêchant les mouvements horizontaux de la table.

L'ensemble est fixé sur un socle en béton de 4,5 tonnes

.....

posé sur des blocs de caoutchouc. Le système ainsi réalisé a une fréquence propre très basse ce qui assure une bonne isolation entre la table et le bâtiment.

Cette machine permet d'essayer un objet de 200 kg avec une accélération maximale de 2 g.

3/ - Mesure des vibrations.

Capteurs.

Pour décrire les mouvements des différentes masses constituant le système homme-siège on utilise des capteurs de vibrations.

Ceux-ci peuvent être :

- des capteurs de déplacement
- des capteurs de vitesse
- des capteurs d'accélération.

Les capteurs de déplacement et de vitesse ont l'inconvénient de nécessiter une référence.

Les capteurs d'accélération ont l'avantage d'être indépendants de toute référence, facilement étalonnables, et de donner la mesure d'une variable particulièrement importante pour l'homme dans la bande de fréquences que nous étudions (0 - 20 Hz).

Les capteurs utilisés sont à mutuelle inductance (I). Ils sont constitués d'une petite masse qui est fixée élastiquement dans un coffret et qui se déplace entre le primaire et le secondaire d'un bobinage. Si on alimente le primaire avec une tension alternative (porteuse) 220 V. 1.000 Hz, lorsque la masse se déplace il y a création d'un courant dans le secondaire. Ce courant peut alors être mesuré comme toute grandeur électrique.

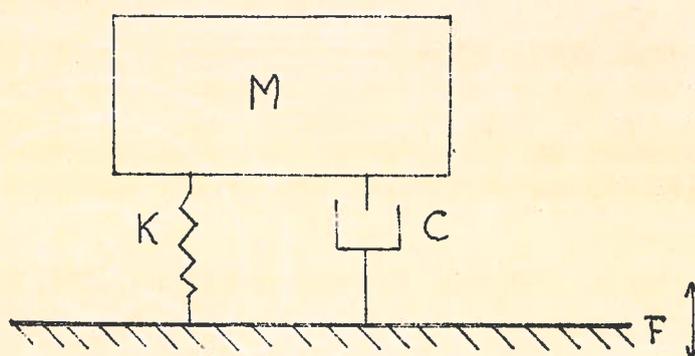
Les capteurs ainsi réalisés ont un poids de 75 grammes, un encombrement de 23 X 35 mm environ. Leur étendue de mesure de ± 1 g, $\pm 2,5$ g, ± 6 g ou ± 15 g.

(I) - On ne peut pas utiliser ici des capteurs piézoélectriques dont la limite inférieure de fréquence utile est rarement inférieure à 5 Hz.

.....

B/ - RAPPEL DE PHYSIQUE DES VIBRATIONS.

Lorsqu'on fait des mesures de vibration on cherche à trouver des analogies entre le système essayé et un système physique. En particulier on utilise l'analogie entre l'homme et un système de masses suspendues. On rappellera ici quelques définitions sur les vibrations des systèmes de masses suspendues. On ne considérera que le cas le plus simple : une masse (M) reliée par un ressort (K) et un amortisseur (C) à une fondation (F) animée d'un mouvement sinusoïdal



Vibration libre. C'est la vibration qui apparaît lorsqu'on ébranle le système en l'absence de vibration forcée.

Amortissement. C'est la dissipation d'énergie avec le temps ou la distance.

Fréquence propre. C'est la fréquence de la vibration libre d'un système non amorti. On connaît aussi la fréquence propre amortie.

Vibration forcée. La vibration d'un système est forcée si la réponse : est imposée par l'excitation.

Résonance. Un système est dit en résonance lorsque, tout changement aussi petit soit-il, dans l'excitation d'un système soumis à des vibrations forcées entraîne une diminution de la réponse du système.

Fréquence de résonance. C'est la fréquence de la vibration forcée pour laquelle le système entre en résonance.

.....

Fixation des capteurs.

On fixe les capteurs, suivant l'étude envisagée, sur la table vibrante, sous le bassin du sujet, au thorax, à la tête, aux épaules, sur les pieds, etc... La fixation est réalisée par des bandes d'élasticité limitée qui permettent de légers déplacements tout en conférant à l'attache une fréquence propre très basse.

Enregistrement des vibrations (figure 2 en annexe)

L'impulsion électrique obtenue à la sortie du capteur est enregistrée dans un système démodulateur, puis aux bornes d'un petit galvanomètre à cadre mobile et à miroir disposé dans un enregistreur photographique.

Lors de son mouvement le miroir réfléchit la lumière d'une lampe à filament vers une fente derrière laquelle passe un papier photographique. On peut ainsi recueillir sur papier photographique les variations de courant du capteur; et donc obtenir ainsi une inscription graphique de la vibration.

Cet ensemble est lui-même insensible aux chocs et aux secousses.

Contrôle des vibrations sur oscillographe.

On peut obtenir sur l'écran d'un oscillographe le tracé des vibrations. On prélève pour cela le courant aux bornes du galvanomètre à cadre. Il reste toutefois un résidu de porteuse car les galvanomètres font un filtrage mécanique de cette porteuse. Aussi doit on disposer avant l'oscillographe, d'un filtre passe-bas pour éliminer ce 1.000 Hz résiduel.

.....

Phase, déphasage. Pour une grandeur périodique, c'est la fraction de période dont une variable indépendante a avancé par rapport à une référence. C'est donc une avance ou un retard qui peut s'exprimer par un angle de vecteurs.

Opposition de phase. On dit qu'il y a opposition de phase entre le système et la fondation lorsque les mouvements se font en sens contraire. Cela correspond à un déphasage de 180° .

Quadrature. On dit que le système et la fondation sont en quadrature lorsqu'ils sont déphasés de 90° . On démontre que le passage à la résonance correspond à la quadrature.

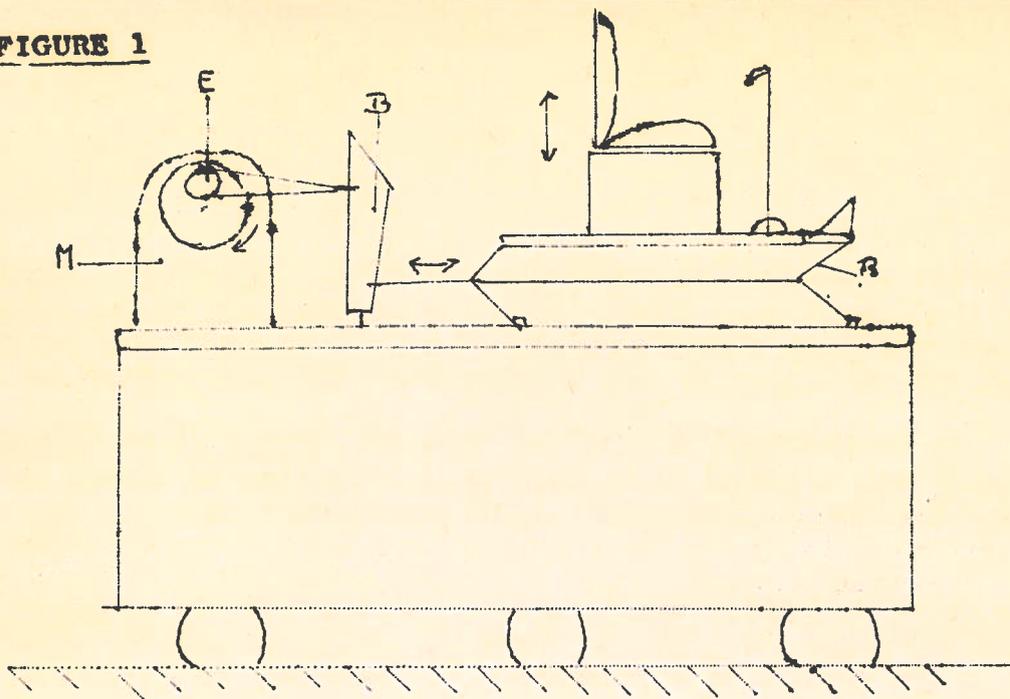
Ces quelques définitions permettent de comprendre aisément les différents éléments de la courbe de réponse du système considéré. La figure 3 en annexe montre la réponse en amplitude du mouvement de la masse en fonction de la fréquence de la fondation. On a porté en abscisse le rapport de la fréquence d'excitation à la fréquence propre du système. La courbe est tracée pour plusieurs degrés d'amortissement.

Entre les points A et R la masse est en phase avec la fondation. Le point R correspond à la résonance du système. Entre ~~entre~~ ~~entre~~ B (B est à l'infini) la masse est en opposition de phase par rapport à la fondation. Le diagramme de déphasage joint reprend ces divers points.

Le dispositif expérimental composé par la table vibrante et la chaîne de mesure accélérométrique, permet d'étudier les mouvements relatifs des différentes masses du système homme-siège et de chercher des analogies avec le fonctionnement de systèmes mécaniques plus ou moins complexes.

Elle permet aussi toutes les études physiologiques ou psychologiques qui nécessitent l'excitation d'un homme par des vibrations sinusoïdales.

FIGURE 1



Opération	Schéma	forme du signal
Alimentation	22 v 1000 Hz	
Capteur		
Démodulation		
Réglage du zéro		
Enregistrement	<p>lampe</p> <p>papier</p>	

FIGURE 2

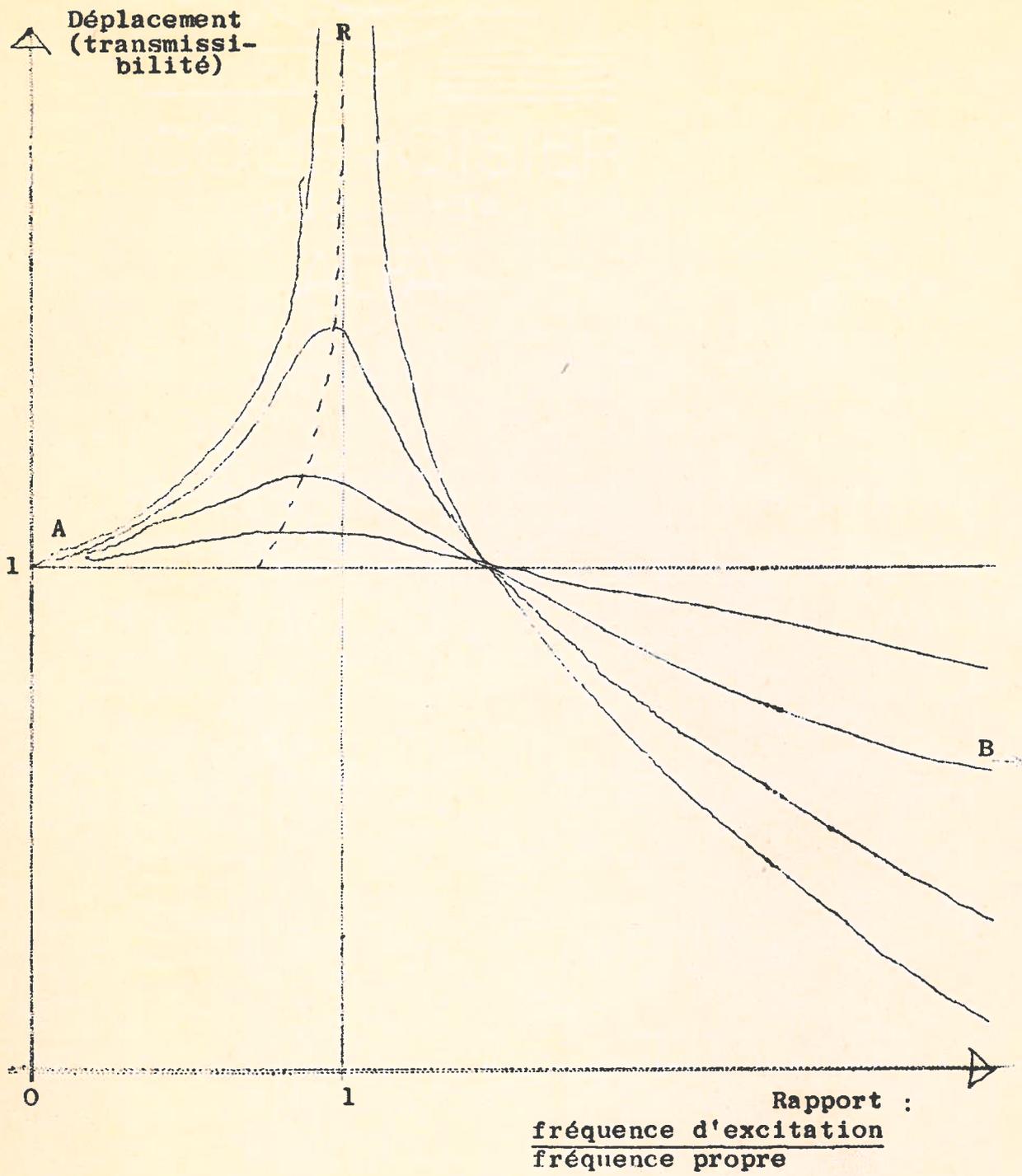


FIGURE 3

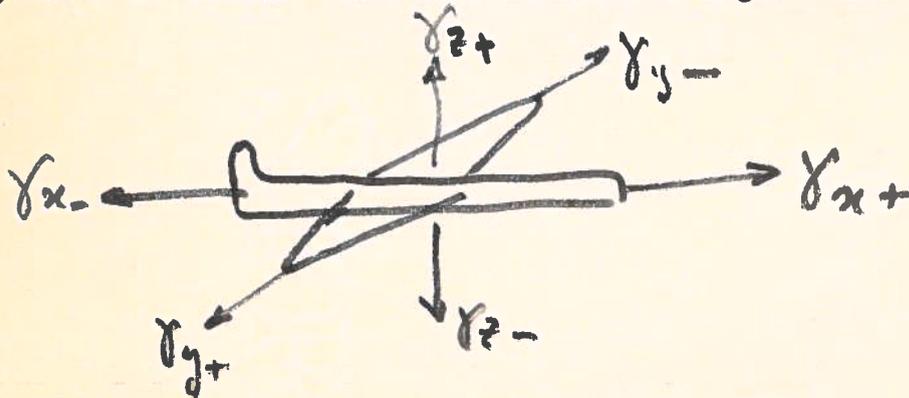
EFFETS DES ACCELERATIONS

- 1°- Longue durée (> 2 secondes)
- 2°- acceleration et décélération de courte durée (impacts)

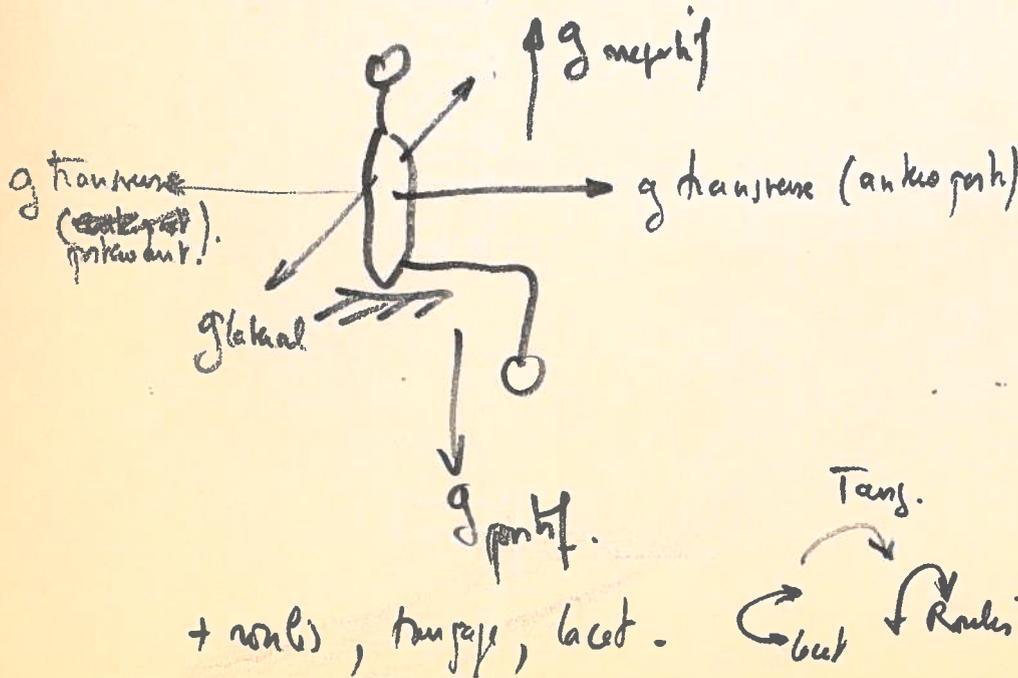
Dans la vie courante peu d'occasion de ressentir ces effets. L'aviation a posé ce problème de façon très vive. Dès le début de l'aviation on a ressenti les effets. Si $V \uparrow$, il se développe une force d'inertie qui peut avoir un effet mécanique direct ou indirect qui déplace les liquides de l'organisme.

CONFUSION DE LANGAGE

Il faut savoir si on prend le vecteur d'accélération rapporté au système de triaxe dont se servent les ingénieurs de l'aéronautique.



Les physiologistes emploient un autre système qui tient compte des forces d'inertie.



Les premières études ont été faites avec:

- le siège tournant
- les centrifugeuses.

Ce sont les psychiatres qui ont eu les premiers l'idée de soumettre leurs malades (à Berlin au 18ème siècle en espérant que cela les guérirait)

- vers 1918 ? et ? - on utilise une essoreuse de poudrerie et le manège de St.CYR

- à TORONTO FRANCK (?) utilise la première centrifugeuse spécifique

- Actuellement une centrifugeuse à BRETIGNY

Pour les accélérations transverses on utilise des chariots qui sont actuellement propulsés par fusées. Actuellement le nouveau chariot du Colonel STARK ou du Commandant TAYLOR qui lui a succédé Rail de 1 Km de long. Pour obtenir des déccélérations brutales on a installé à partir du 500 ème mètre des réservoirs d'eau cloisonnés et le chariot a un soc d'accès qui vient percer ces bacs freinant brutalement le chariot.

On peut aussi utiliser des chariots verticaux ou rampes à éjection (10zaine de mètres de haut). une à BRETIGNY.

Autres moyens. l'avion.

RECHERCHES BIOLOGIQUE

1°- Perspective de l'Ingénieur: Recherche des limites de tolérance

avec l'EEG ou la fréquence cardiaque.
ne va pas très loin.

2°- Perspective de l'étude physiologique des effets des forces d'inertie sur l'organisme.

- Effets des bruits
- Effets hémodynamiques qui dépendent de la direction, de la durée, de la vitesse d'établissement ou de cessation de l'accélération ou de la déccélération.

Suivant les cas l'un ou l'autre paramètre est important.

On distingue:

- Les accélérations le long des grands axes du corps.

LONGUE DUREE > 2 sec LONGITUDINALES

Les forces d'inertie exercées de la tête au siège ^{entraînent} des centrifugations des liquides organiques vers les pieds et vice versa.

<u>EFFETS</u>	{	g + sang-----> Tête
		g - sang -----> Pieds

1- Tête-----> pieds g -

Le phénomène fondamental a retenir est que cette centrifugation entraîne une gêne de la circulation - de retour - Mais il y a des mécanismes compensateurs et les effets des forces d'inertie peuvent être vite dépassés. La faillite de l'adaptation entraîne une anémie de p. ex. la partie supérieure du corps etc..

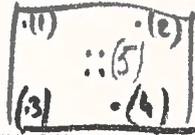
-----> voile gris, puis noir, puis perte de conscience.

Ceci a été mis en évidence par les injections de singe avec du thérotraste(?), une radiophotographie montre que le sang s'accumule vers les secteurs inférieurs de l'organisme

-----> voile noir vers 4 à 5 g.
-----> la perte de connaissance vers 7 g.

L'oeil est le plus sensible à ces phénomènes. On utilise cette perte de la vision périphérique comme limite à ne pas dépasser pendant les expériences.

On fixe un tableau de 4 points:



(1) (2) (3) (4) " disparaissent" les premiers puis (5) et la perte de connaissance suit très vite.

2- Pieds -----> Tête. phénomène de voile rouge, congestion du cerveau, troubles divers ...

MOYENS DE PROTECTION

1°- Enfermer le sujet dans un scaphandre rempli d'eau, c'est encore le meilleur moyen de protéger l'organisme contre les accélérations. Mais il n'a jamais été possible de s'adresser à l'eau dans la pratique.

2°- On utilise l'air - ce sont les combinaisons anti g. qui sont des coussins d'air qui exercent des pressions.

Actuellement deux tentatives nouvelles sans succès.

Donc si on prend des accélérations longitudinales on a des moyens de protection limités.

Dès 1945 les allemands ont pensé à utiliser le pilotage dans la forme classique en position classique mais à mettre le pilote couché.

Actuellement le grand frein au développement de l'aéronautique est l'accélération initiale. Avec les propergols solides il faut des accélérations jusqu'à 20 g. Les propergols ont permis de donner une poussée plus progressive.

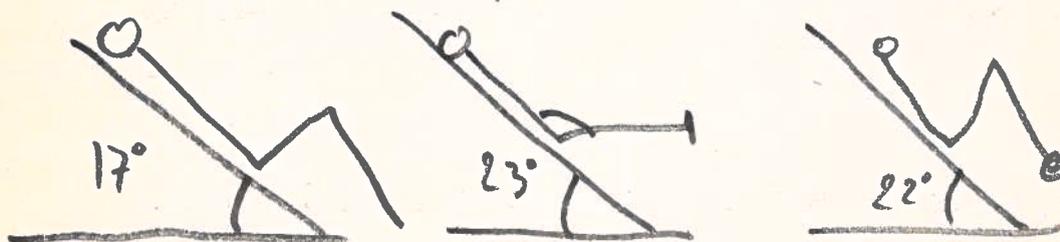
En fait on a du limiter les accélérations en fonction de l'homme.

B- LONGUE DURÉE - TRANSVERSES

Les effets sont dans ce cas essentiellement mécaniques. Il y a surtout une gêne respiratoire. On a cherché à savoir quelles étaient les accélérations les mieux supportées. La position la meilleure est le sujet couché ^{sur} le dos à condition de protéger les parties molles sur des filets ou dans des sièges moulés.

En fait on est obligé de l'incliner légèrement en position semi-couché. Entre alors en jeu une composante longitudinale.

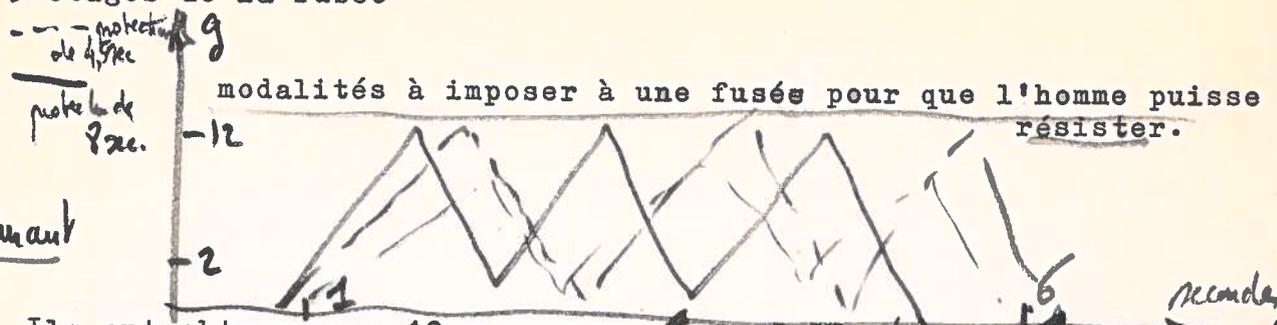
On a cherché à déterminer l'inclinaison du dossier du siège la plus favorable.



protection de 5 sec
pour 12g -
(la + favorable)

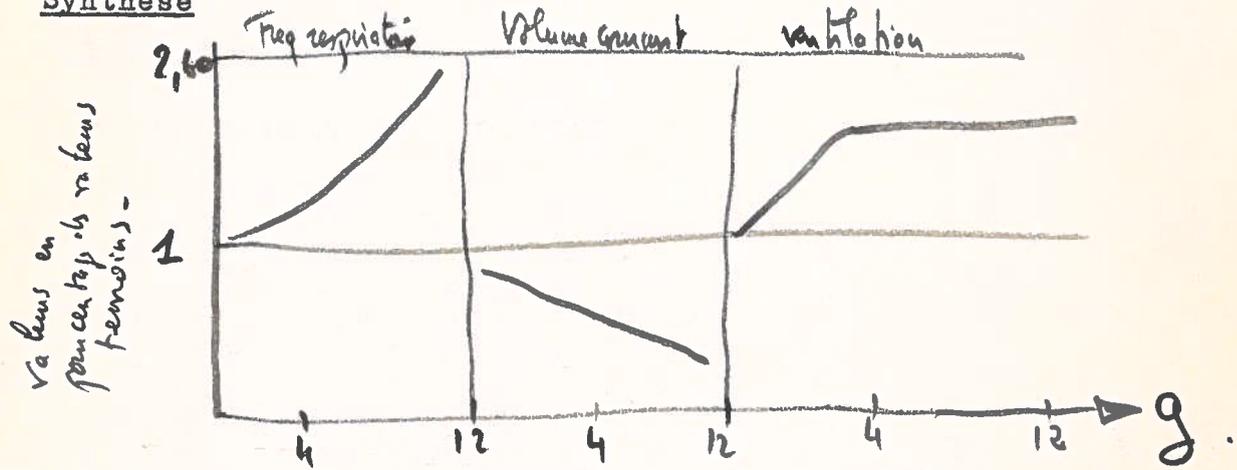
On a cherché a savoir ce qui se passait en combinant les trois allumages de 3 étages de la fusée

Clark et Bondurant



Ils ont obtenu pour 12 g avec une \uparrow de 0,23 g/sec une \uparrow de 0,23 g/sec une protection de 5 secondes. Ils notent surtout la gêne respiratoire.

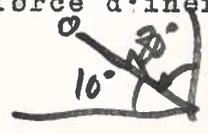
Synthèse



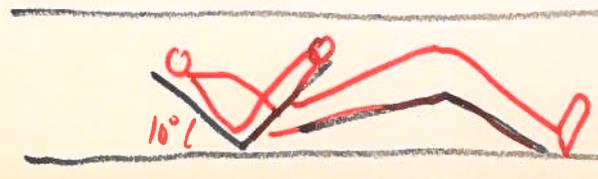
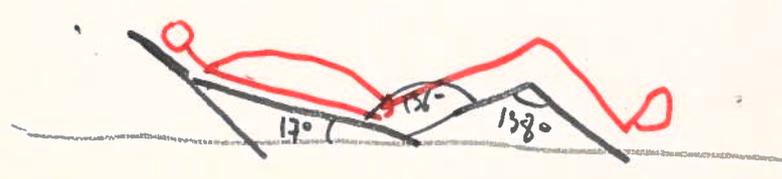
On a observé un déplacement de la masse du cœur
une modification de la dynamique cardiaque

Pour le projet Gemini on en est arrivé à une inclinaison encore plus faible 10°. Les U.S.A. comme les Russes arrivent aux mêmes conclusions.

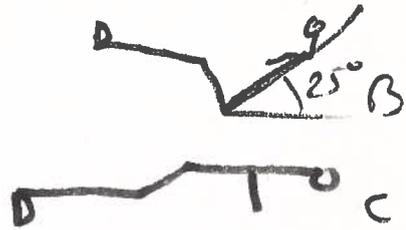
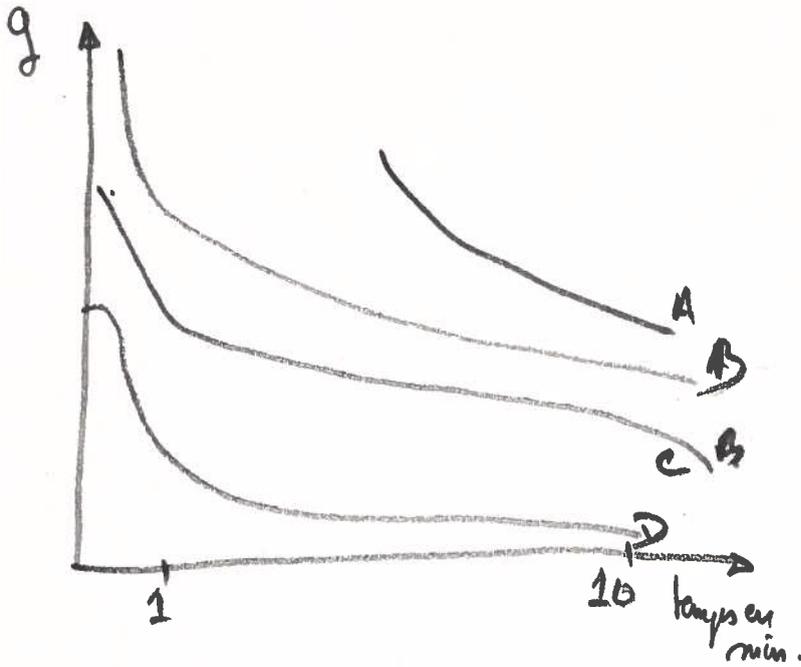
Ils préconisent 80° entre la force d'inertie et l'axe du corps.



CLARK GRAY aux USA ---> projet Mercury



?
Il ne faut pas laisser les bras dans l'air du corps



Autres effets

Liquides des canaux semi-circulaires. Particulièrement sollicités par des excitations angulaires. Ces excitations entraînent le nystagmus avec mausée ou vomissement. Si le sujet reste les yeux ouverts on obtient le mal de mer qui est un ~~effet~~ conflit entre les sensations visuelles et les sensations labyrinthiques.

Particulièrement important dans le cas de vol sans visibilité: les sensations labyrinthiques sont fausses car elles résultent des forces d'inertie.

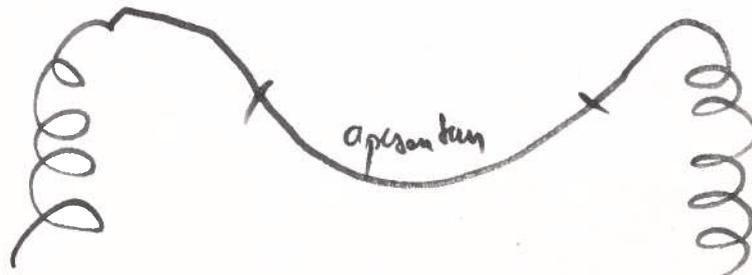
Il y a un cas particulier qui est celui où l'avion effectue un virage ou si le pilote se penche pour voir un instrument il y a accélérations de Coriolis le pilote a l'impression d'être engagé dans un autre mouvement tournant, à l'équerre du mouvement vrai.

Les valeurs que nous avons vues sont des valeurs moyennes, mais un grand nombre de fractures viennent diminuer les tolérances.

L'organisme répond de façon spécifique mais aussi non spécifique. En physiologie des agressions on sait que plusieurs agressions ensemble donnent des effets synergiques dont l'effet total est ~~plus~~ la somme des effets.

Autre facteur: les hypotendus supportent moins bien les accélérations que les normaux ou hypertendus.

ABSENCE DE PENSANTEUR - Von BECK fait effectuer en avion des vrilles serrées, puis des ressources, ~~puis des vrilles~~



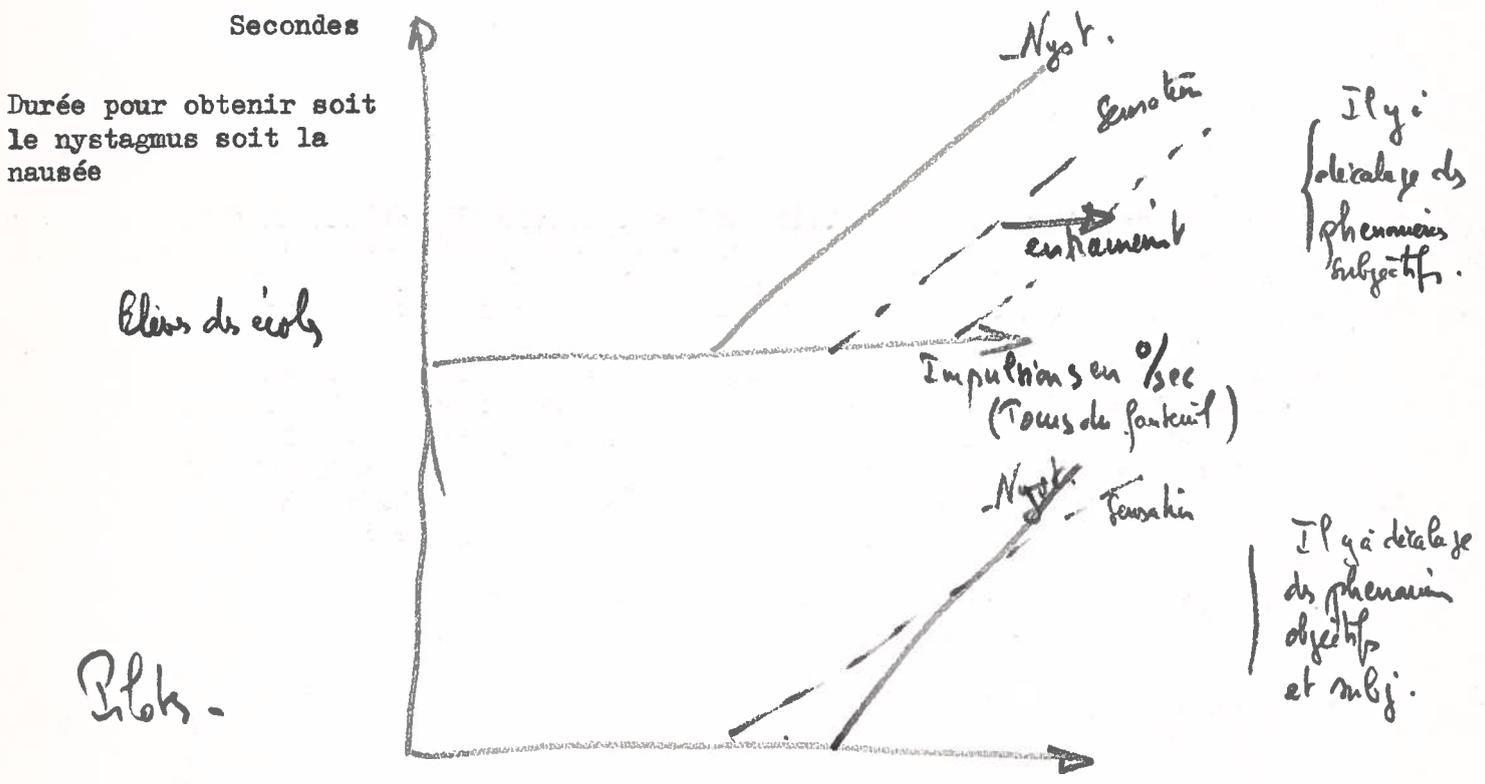
Pendant les vrilles ^{après vibration} la tolérance est moindre que pendant les vrilles ^{avant vibration} avant ^{vibration} ~~vibration~~ ^{apres vibration} ~~vibration~~ ^{vibration}

1/ ENTRAINEMENT

On peut élever la tolérance aux vibrations par l'entraînement (contraction abdominale) cris etc..

Pour les accélérations angulaires, il existe une adaptation possible. On a montré à l'aide de la nystagmographie et oculométrie

Si on soumet sur un fauteuil tournant nystagmus (objectif) nausée (objectif)



2/ Inhalation d'O2

Ce procédé permet d'élever la tolérance en corrigeant les troubles ventilatoires

3/ Drogues

URSS oui (adrénaline) mais à condition d'adapter les injections à la typologie nerveuse du sujet.

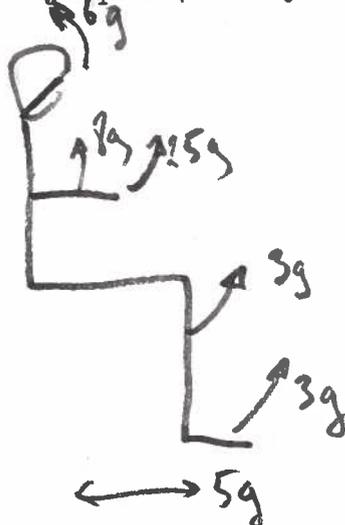
en France centrophenoxine? Malheureusement pas bien contrôlé encore chez l'animal on pratique l'hypophysectomie

Stimulation du système endocrino épithélial - Endotoxine bactérienne. à faible doses → augmente la durée de 9' pour 20 g. chez le rat

C- REPETITION DES ACCELERATIONS. Chez des chiens on a trouvé des lésions rénales identiques à celles qu'on rencontre chez des cardiaques. Les Russes viennent de décrire des remaniements de la structure pulmonaire.

D- TRES LONGUE DUREE . Pourtant on peut se demander ce qui se passe lorsqu'on

jusqu'à 4 G il y a peu d'effets mécaniques.



la valeur ^{de g} qui est plus grande
le muscle est plus faible

mais on ne sait guère ce qui se passe sur niveau central (mémoire)

Pendant 1 an on a mis des rats à 3 G (Roumain) on observe un espèce de vieillissement précoce. Il y aurait remaniements des os longs. Epaissement.

Apparemment l'hypergravité est plus grave que l'hypogravité

II ème partieLES IMPACTS

-accidents

- L'ejection du siège éjectable

- Rentrée dans l'atmosphère - parachutage

Il est plus difficile d'étudier les accélérations de brève durée . On ne peut pas mesurer certains impacts d'autant plus qu'ils ne sont pas des phénomènes pass.

RECHERCHE DE NIVEAUX LESIONELS

- avec des chariots

- ou des capsules expérimentales lancées de

tours à parachutes avec des animaux ou hommes.

Animaux cochons d'indes.... les renseignements ne sont que peu transposables o l'homme. TAYLOR emploi l'ours brun, le cochon, la girafe, le cadavre.

Mannequins anthropométriques. Modèles analogues du corps humain.

Chute libre du corps humain. (SNYDER), étude systématique des impacts accidentels. 12000 cas de chute avec survie: il a sélectionné 168 cas et à étudié très minutieusement le détail de ces cas.

Facteurs; - position des corps au moment de l'impact

78 cas sur 128 sur les pieds -- blessures dues à l'impact initial (fracture calcaneum, cuisse, tibia , charnières dorso lombaire Rein et poumon.

21 cas sur 128 tête Fracture du crâne

10 cas fesses

+ recroquevillés et latérale

Distribution de la force; Tout dépend de la surface du corps qui est mise en jeu, en particulier il vaut mieux les genoux pliés.

Tension musculaire- Plus on est décontracté moins les lésions sont graves.

Poids, trainée aérodynamique

Durée pendant 1 milliseconde on peut atteindre jusqu'à 5000 g. avec survie (ex. passager d'avion qui est tombé de 1500 m. avec survie)

Nature du matériel d'impact

Mais il n'y a pas de relation linéaires entre la dureté du matériau et l'importance des lésions.

Pour des durées inférieurs à 2 ou 7/10 cm de secondes le corps se comporte comme un matériau inerte (dégats de structure) au dessus de 7/10 de secondes les phénomènes liquidiens entrent en jeu.

Les enfants résistent mieux que les adultes

Les malades mentaux se font moins de mal que les autres (pas de contraction)

AVIATION

harnais de fixation qui les maintiennent au siège
casques anti chocs

Ce sont les lésions centrales qui sont à l'origine de la plupart des morts en pathologie

Dans certains cas, il n'y a pas de troubles viscérales mais mort par commotion cérébrale.

On a cherché à mesurer la protection de la tête par des mesures sur les casques.

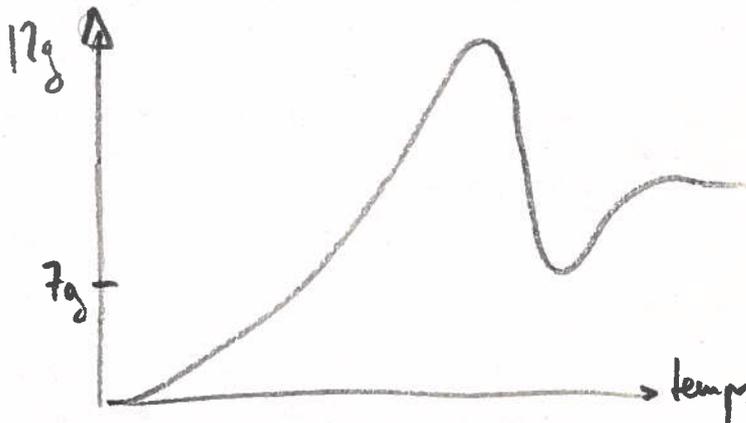
Actuellement, on a montré qu'on peut avoir des pics très brefs de 2000 g avec survie.

Il faut actuellement éjecter le pilote

1° sièges en 1944 Heinkel. sur les premiers sièges 10 m/sec. 12 g max.

" " " " actuellement 20 m/sec 20 g max. 170 g/sec à l'éta

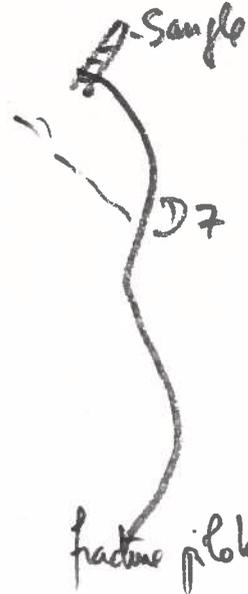
On sait maintenant s'éjecter au sol. (sièges fixes)



Accidents les + fréquents: fracture de la colonne vertébrale au moment de l'éjection.



fracture parachute



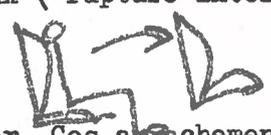
fracture pilote

Il faut que la colonne soit très rectiligne

+ coussin de siège ne pas en mettre

parfois les poches sont défectueuses mais rarement

ASIONS DE TRANSPORT On est réduit à la ceinture abdominale.
Dangereux (rupture interne chez femme enceinte)



Le siège aussi peut s'arracher. Ces arrachements du siège sont plus graves que les ruptures de ceinture qui absorbent une partie de l'énergie.

Possibilité de filets de crash.

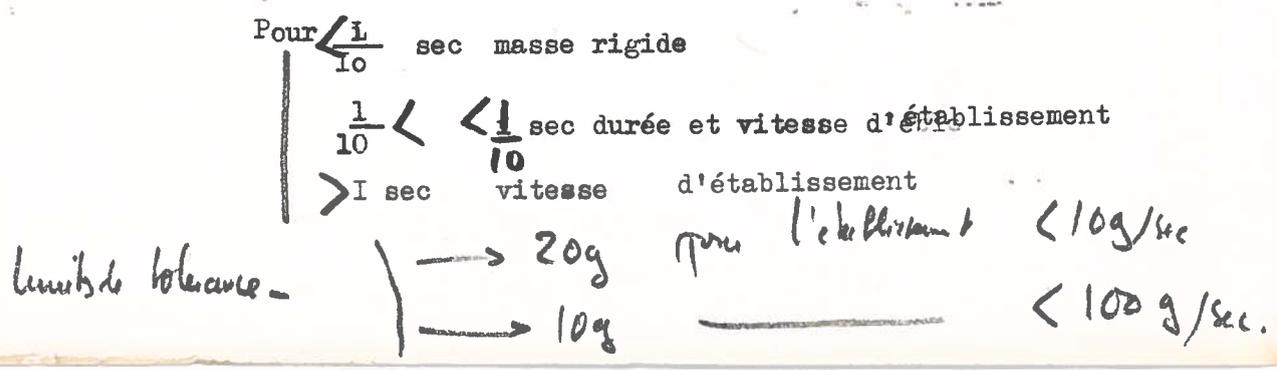
ASTRONAUTIQUE

Rentrée dans l'atmosphère et atterrissage de la capsule. Sur 146 volontaires humains la limite de tolérance supérieure est à 26 g pour des vitesses d'établissement de 250 à 2130 g:sec. pendant 168 à 192 millisecc. (TAYLOR)

Pas de lésions dans ces conditions. La seule observation faite est une brady-^{cardie} cardia à cond. qu'on dépasse 15 g force dirigée vers la tête. Si la force n'est pas ^{vers} la tête pas de bradycardie sauf si ^{> 24 g} 24 g. Fracture de la colonne vert ^{→ 83 g (ours)} 83 g (ours)
On a envisagé d'éjecter une cabine mais on n'a pas pu éviter encore des effets de tournoiement (actuellement abandonnée)

On a pu prendre des clichés de l'estomac -- déplacements importants

Il est très difficile de fixer le paramètre crucial. Pour ^{Kell} Kellhauser la durée est un paramètre crucial.



Questions

Ceinture abdominale ou baudrier sur les voitures . Repense : le harnais
Les Cosmonautes ont-ils eu des lesions abdominales

Niveau des accélérations dans les fusées Rep. 7-9 g.

Destructeur de l'oreille interne: ce serait la mise en condition qui joue un rôle.

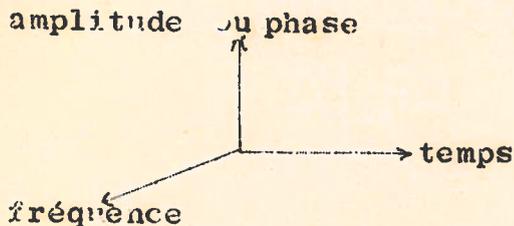
ETUDE PHYSIQUE D'UNE SOURCE DE VIBRATION

Ce qui suit rappelle les concepts essentiels pour l'analyse de la plupart des vibrations. Ces concepts et les méthodes de mesure indiquées servent dans l'analyse d'un très grand nombre de fonctions oscillantes (Vibrations stationnaires ou transitoires, chocs, bruits, électroencéphalographie, électromyographie...).

Les quatre paramètres les plus importants pour caractériser une vibration sont :

- le temps t (en secondes par exemple)
- la fréquence f (en cycles par secondes), ou son équivalent la pulsation $\omega = 2\pi f$ en radians par seconde
- la phase en degrés ou en grades
- l'amplitude (en unités de longueurs, de vitesse, d'accélération, etc...).

Analyser une vibration revient à étudier les variations de ces différents paramètres les uns par rapport aux autres. Le trièdre ci-dessous schématise les combinaisons possibles.



On obtiendra successivement :

- dans le plan amplitude-temps : l'"histoire" de la vibration (x en fonction de t) qui donne lieu à l'analyse de l'amplitude.
- dans le plan amplitude-fréquence : l'analyse de fréquence (ou analyse spectrale)
- dans le plan fréquence-temps : l'analyse sonagramme.

Nous dirons quelques mots de l'analyse par corrélation

I/ - ANALYSE DE FREQUENCE, ANALYSE DE L'AMPLITUDE.

1) - Vibrations sinusoidales

Une vibration sinusoidale se caractérise par le fait que le mouvement se produit à une fréquence f donnée, avec une amplitude maxi x_m constante et une amplitude instantanée $x(t)$ de la forme :

$$x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi) \quad \varphi \text{ constant}$$

Analyse de fréquence. Il n'y en a pas à faire, il suffit d'obtenir sur un papier le tracé du mouvement pour calculer ω et f .

Analyse de l'amplitude. On peut mesurer directement sur le tracé l'amplitude maxi $x_m(t)$. Mais on sait faire une description plus complète de l'amplitude : on peut calculer sa valeur moyenne \bar{x} , sa valeur quadratique moyenne $\{\bar{x}^2(t)\}$ ou plutôt la racine carrée de $\{\bar{x}^2(t)\}$ que l'on note σ

Rappelons que pour une fonction $x(t)$ quelconque :

La valeur moyenne est $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$

La valeur quadratique moyenne est $\bar{x}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$ avec

$$\sigma = \sqrt{\bar{x}^2}$$

Autres descriptions

Il est commode de considéré un mouvement sinusoidal comme la projection sur l'axe ox du mouvement d'un vecteur d'amplitude x_0 tournant autour de o avec la vitesse angulaire ω . Une telle représentation permet d'assimiler la vibration à une grandeur dite "complexe" exprimée par un "nombre complexe". Ce qui, a son tour, permet de simplifier les calculs concernant ce type de vibrations.

On dit que l'amplitude instantanée $x(t)$ est la partie réelle de la vibration complexe $X(t)$

$$X(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)$$

j = symbole des "imaginaires"

$$j(\omega t + \varphi)$$

on démontre que $\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi) = e^{j(\omega t + \varphi)}$
et on exprime la vibration complexe sous la forme: $X(t) = x_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$

2) - Vibrations périodiques.

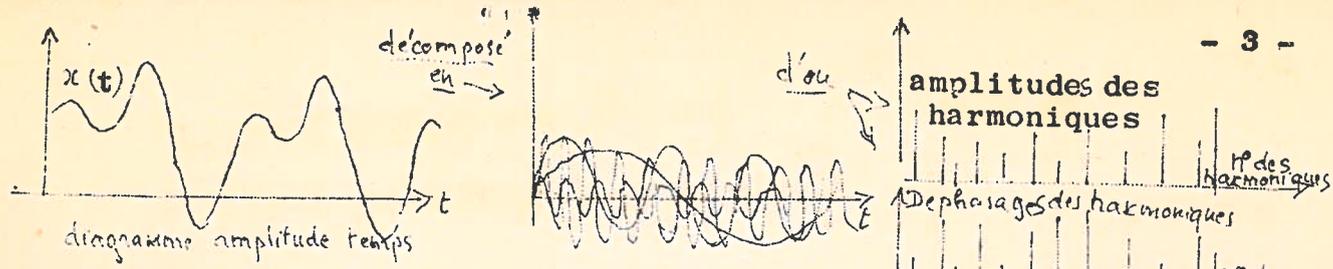
L'amplitude instantanée d'une fonction périodique est du type $x(t) = x(t + nT)$ ce qui veut dire qu'elle reprend la même valeur au bout d'un temps T . Pour étudier une telle vibration on démontre qu'on peut la décomposer en une somme de sinusoides appellées harmoniques. On dit qu'on décompose la vibration en série de Fourier.

L'amplitude instantanée est alors de la forme $x(t) = x(t + nT)$ $x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$

- ou ω est la pulsation dite fondamentale
- C_n est l'amplitude de l'harmonique n
- $n \cdot \omega$ est la pulsation de l'harmonique n
- φ_n est la phase de l'harmonique n

Le vecteur représentant la vibration sera donc la somme des vecteurs représentant les différentes harmoniques.

Pratiquement on aura décrit la vibration lorsqu'on disposera (1) du diagramme $x(t)$ en fonction de t ; (2) des amplitudes et des déphasages des divers harmoniques. La figure 1 récapitule les différentes étapes d'une telle étude.



- Mesures** - Analyse harmonique graphique (très long)
 - Filtrage des différentes fréquences par des filtres électriques (précis)
 - Analyse vectorielle wattmétrique (ne donne pas les déphasage entre les diverses harmoniques).
 - Analyse par calculatrice : on prend une période de la vibration, on la découpe en un certain nombre d'éléments (20, 50; 100) et on tabule les différentes valeurs de l'amplitude ainsi obtenue. On introduit ces valeurs dans une calculatrice programmée pour faire l'analyse de Fourier. La machine donne directement les amplitudes des différentes harmoniques et de leurs déphasages. Un programme de synthèse permet de reconstituer la courbe initiale. Cette méthode est très précise.

En somme il faut retenir que pour analyser une vibration périodique on peut la décomposer en une dérie discontinue de sinusoides et la représenter par un tableau de valeurs numériques (amplitudes et phases des harmoniques et de la fondamentale.)

3) Vibrations aléatoires
 a - Analyse spectrale

... une série discontinue de sinusoides. On cherche leur domaine de validité en fonction de la position ...

Ces vibrations contiennent théoriquement toutes les fréquences et de façon imprévisible, on ne peut donc pas les décomposer en fractions de la fréquence. Pour cela on garde le principe de la décomposition de Fourier. On démontre que la série de Fourier doit être remplacée par sa limite si la fréquence de la fondamentale tend vers zéro: L'intégrale de Fourier

Si $x(t)$ est la vibration aléatoire
$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$
 avec $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$

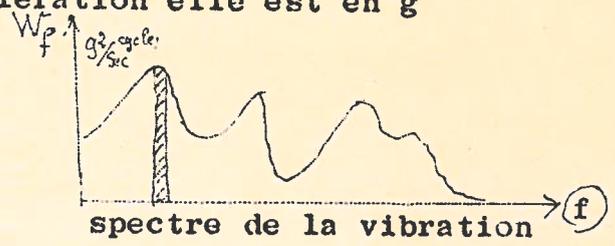
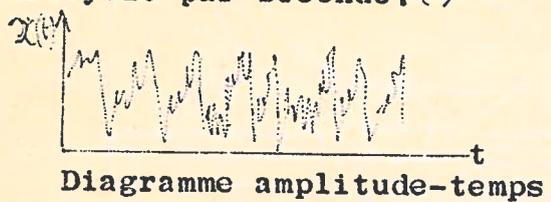
ce qui définit la densité spectrale $S(\omega)$ qui est une mesure de l'"intensité" ou de la "densité" des vibrations (ou des fréquences f) présentes dans la vibration.

On démontre que
$$\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x^2(t) dt$$
 $T = \text{periode} = \frac{1}{f}$

$S(\omega)$ est donc une moyenne quadratique par unité de fréquence. Elle s'exprime en valeurs quadratiques moyennes par radian par seconde. On obtient donc une courbe continue ou spectre de la vibration aléatoire. La surface entre la courbe et l'axe des fréquences représente la moyenne quadratique totale de $x(t)$

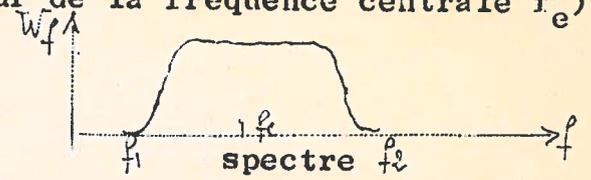
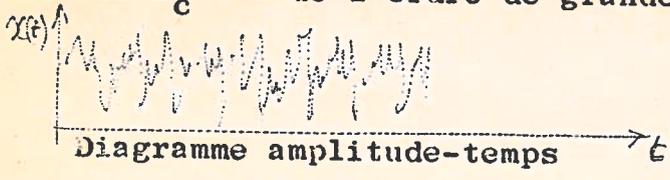
On utilise pratiquement le symbole $W_f = 4 \pi S(\omega)$ - W_f est la densité spectrale mesurée; elle s'exprime en valeurs moyennes quadratiques par cycles par secondes

. Dans le cas des mesures d'accélération elle est en g^2 par cycle par seconde. (I).



CAS PARTICULIERS.

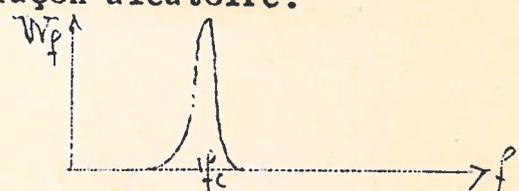
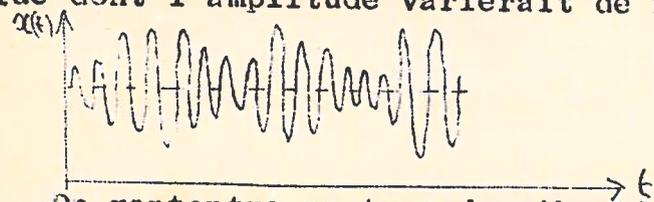
Spectre à bande large. C'est le spectre d'une vibration aléatoire qui ne contient qu'un nombre limité de fréquences (Alors qu'une véritable vibration aléatoire contient toutes les fréquences) La largeur de la bande est grande par rapport à la fréquence centrale f_c (ou de l'ordre de grandeur de la fréquence centrale f_c).



Dans ce cas l'intégrale de Fourier est prise de ω_1 , à ω_2 au lieu de $-\infty$ à $+\infty$. La plupart des spectres aléatoires rencontrés dans la réalité sont de ce type (Par exemple le "bruit blanc" d'un générateur qui fonctionne entre deux fréquences).

Spectre à bande étroite. C'est le spectre d'une vibration aléatoire qui n'a de valeurs significatives que dans une bande de fréquence étroite par rapport à la grandeur de la fréquence centrale.

La vibration correspondante a les caractéristiques d'une sinusoïde dont l'amplitude varierait de façon aléatoire.



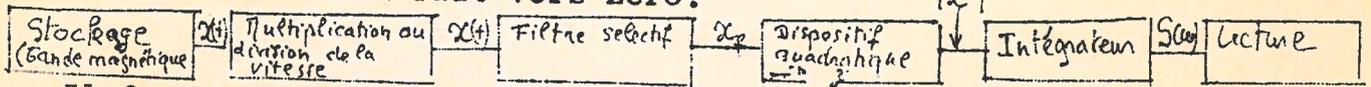
On rencontre ce type de vibration dans la réponse d'un système de masses suspendues excité par une vibration aléatoire. Ceci permet la prévision de l'ampleur des mouvements d'un tel système avant sa réalisation ou pour le modifier une fois réalisé (ex. : véhicule sur un terrain).

...

(I) - Une autre définition de la densité spectrale est la suivante : c'est la valeur limite de la réponse quadratique moyenne $|\bar{x}|^2$ d'un filtre sélectif parfait (gain zéro en dehors de la bande passante, gain 1 dans la bande passante, qui a une courbe caractéristique rectangulaire) divisée par la largeur de la bande passante du filtre lorsque cette largeur tend vers zéro. C'est d'ailleurs ainsi qu'on mesure pratiquement la densité spectrale. (Seulement la largeur de bande des filtres n'est pas vraiment nulle).

MESURES -

Le schéma ci-dessous indique les principales étapes de l'analyse spectrale. Nous avons indiqué un dispositif multiplicateur de vitesse qui est particulièrement intéressant pour l'étude des basses fréquences. Le schéma propose l'utilisation d'un seul filtre en changeant la vitesse de la bande magnétique. On peut aussi utiliser une vitesse unique et une batterie de filtres. La mesure réalisée est toujours une approximation puisque pour satisfaire à la théorie il faudrait disposer d'un filtre parfait dont la largeur de bande tendrait vers zéro.



Il faut retenir de l'analyse spectrale qu'on décrit la vibration par une fonction continue de la fréquence. Contrairement aux vibrations périodiques pour lesquelles on connaît exactement la valeur numérique des différents harmoniques on ne dispose que d'une courbe représentant les valeurs les plus probables de l'intensité (moyenne quadratique) des différentes fréquences.

b - Analyse de l'amplitude d'une vibration aléatoire.

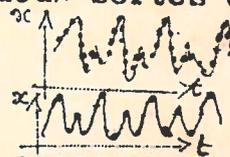
La connaissance que l'on a de la valeur instantanée d'une vibration aléatoire $x(t)$ à un instant donné ne fournit aucune information sur la valeur qu'elle prendra à un instant ultérieur. On sait seulement qu'il y a une certaine probabilité pour que sa valeur soit située à l'intérieur d'un certain domaine de valeur. C'est-à-dire qu'on ne peut le décrire qu'en termes statistiques.

On connaît l'emploi ^{en} statistique classique des notions de :
 - Densité de probabilité - La densité de probabilité $p(x)$ mesure la probabilité pour que la fonction $x(t)$ soit comprise entre x_1 et $x_1 + dx_1$.

- La probabilité cumulative - La probabilité cumulative $P(x \gg)$ est la probabilité pour que $x(t)$ dépasse une certaine valeur. On normalise les courbes en considérant le rapport $\frac{x}{\sigma}$. La probabilité cumulative est alors $P(\frac{x}{\sigma} \gg)$

Ceci posé on peut s'intéresser à deux sortes de valeurs de l'amplitude d'une vibration aléatoire :

- ses valeurs instantanées x_i
- ses valeurs maximales x_m



Le tableau ci-dessous indique les différentes analyses possibles et donc les différentes courbes que l'on peut obtenir.

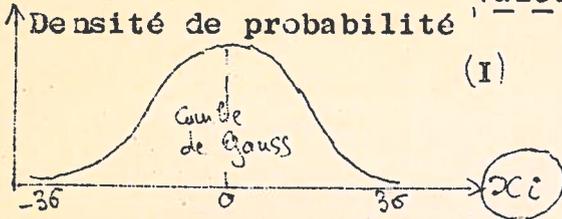
	Densité de probabilité	Probabilité cumulative
(x_i) Valeurs instantanées....	I	II
(x_m) Valeurs maxi.....	III	IV

.....

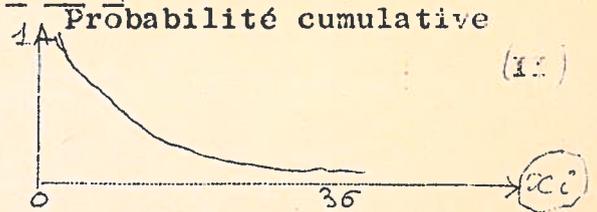
Exemple :

Les courbes ci-dessous donnent quelques exemples de courbes dans le cas d'une vibration gaussienne à bande large ou étroite. Une vibration gaussienne est une vibration pour laquelle la distribution des amplitudes instantanées est une loi normale (ou de Gauss). C'est le cas le plus fréquemment rencontré. (1)

Valeurs instantanées

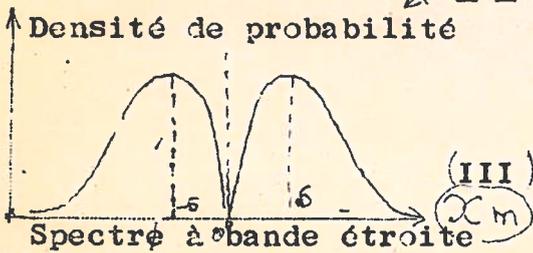


Spectre à bande large ou étroite

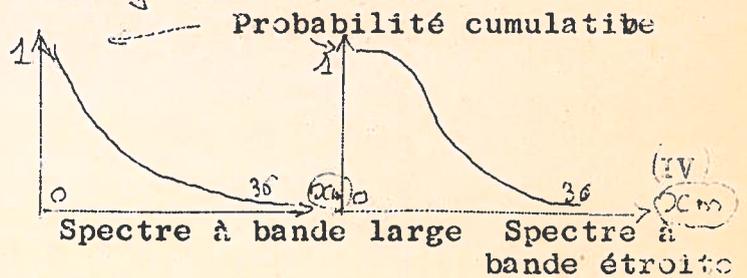


Spectre à bande large ou étroite

Valeurs maxi



(Distribution de RAYLEIGH).



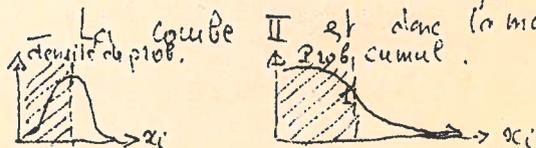
Spectre à bande large Spectre à bande étroite

MESURES. L'ensemble des résultats obtenus ci-dessus montre que l'analyse de l'amplitude d'une vibration aléatoire ne tient pas compte de la fréquence. On peut bien sûr appliquer les différents concepts à l'analyse de la vibration globale. On utilisera pour cela des compteurs statistiques de niveaux ou de la tabulation manuelle.

Si on veut utiliser la théorie correctement on doit filtrer la vibration et les fonctions de probabilité doivent être les signaux de sortie $x'(t)$ d'un filtre sélectif appliqué à la vibration aléatoire $x(t)$.

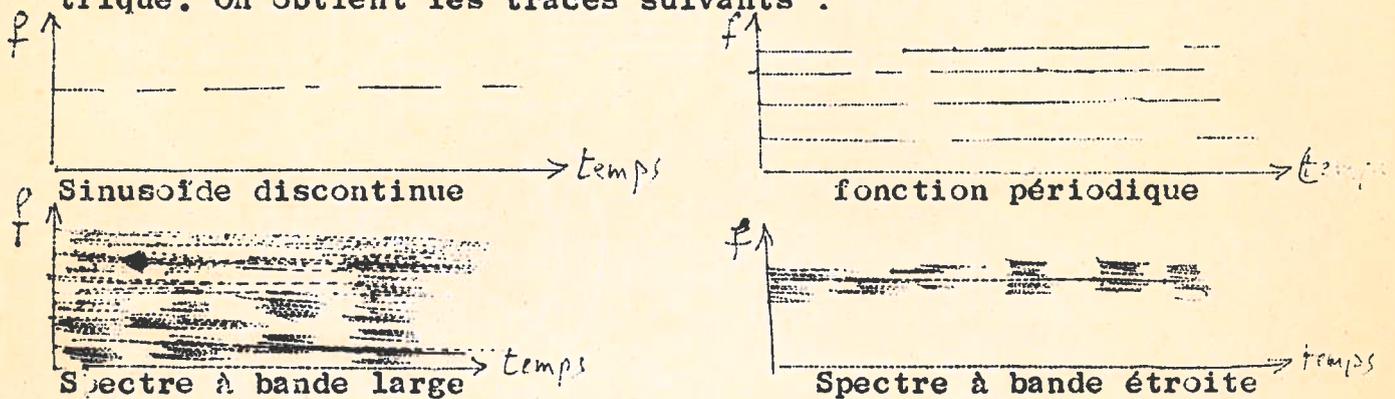
On peut alors utiliser diverses techniques et en particulier des papiers de probabilité. Ces techniques permettent de caractériser l'amplitude de la vibration par des paramètres simples dont on pourra facilement étudier la variation.

(1) les courbes de probabilités cumulatives sont dessinées seulement pour des valeurs positives de x (de 0 à 3σ) d'une origine de sahm classique.



II/ - ANALYSE FREQUENCE - TEMPS

Quelle que soit la nature de la vibration on peut obtenir la variation de la fréquence en fonction du temps. Cette méthode permet de faire en même temps une analyse de fréquence et l'étude de la répartition temporelle des différentes fréquences. La technique utilisée consiste à envoyer le signal analysé dans une batterie de filtres. Suivant l'intensité du courant sortant du filtre un papier spécial sera plus ou moins brûlé par un petit arc électrique. On obtient les tracés suivants :



Ceci est intéressant pour voir si les phénomènes vibratoires sont continus, intermittents et pour chiffrer exactement leur répartition temporelle. On l'obtient avec un appareil nommé sonographe d'où le tracé de sonagramme.

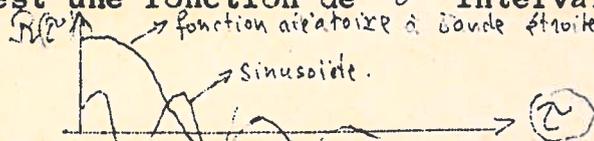
III/ - ANALYSE PAR CORRELATION.

Autocorrélation. On fait l'étude de la vibration en effectuant la moyenne temporelle du produit des valeurs instantanées d'une fonction $x(t)$ à deux instants t et $t + \tau$

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot x(t + \tau) dt$$

$R_x(\tau)$ est la fonction d'autocorrélation.

$R_x(\tau)$ est une fonction de τ intervalle entre les 2 mesures.



Corrélation croisée même chose entre deux fonctions $x_1(t)$ $x_2(t)$

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x_1(t) \cdot x_2(t + \tau) dt$$

$R(\tau)$ est la fonction de corrélation croisée

On démontre que la connaissance de $R(\tau)$ entraîne la connaissance de $S(\omega)$ et réciproquement. L'étude de $R(\tau)$ peut être intéressante lorsqu'il y a un bruit de fond important.