

J. P. BENZÉCRI

## **La psychophysique : histoire et critique de la notion de seuil**

*Les cahiers de l'analyse des données*, tome 4, n° 4 (1979),  
p. 391-404

[http://www.numdam.org/item?id=CAD\\_1979\\_\\_4\\_4\\_391\\_0](http://www.numdam.org/item?id=CAD_1979__4_4_391_0)

© Les cahiers de l'analyse des données, Dunod, 1979, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Les cahiers de l'analyse des données » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme  
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

LA PSYCHOPHYSIQUE :  
HISTOIRE ET CRITIQUE  
DE LA NOTION DE SEUIL

[SEUIL]

par J. P. Benzécri (1)

L'analyse des données, c'est-à-dire la recherche inductive de dimensions cachées définies par combinaison de mesures primaires, s'est développée d'abord avec la psychométrie qui débute elle-même par la psychophysique. Ainsi furent conçus pour la mesure des grandeurs des modèles mathématiques, dont l'analyse des données s'est légitimement affranchie ; mais qui outre leur intérêt historique ont le mérite d'appeler notre attention sur le jeu complexe des sens.

1 Psychométrie et psychophysique : L'objet de la psychométrie est de mesurer, d'exprimer en nombres les faits psychiques : elle s'intéresse donc tant aux facultés (intelligence) qu'aux passions (indice d'émotivité) et aux sensations. La psychophysique est la partie de la psychométrie qui étudie les effets psychiques d'agents physiques déjà eux-mêmes mesurables. Un système mathématique de référence est ainsi connu avant toute recherche. Tandis que dans une étude psychométrique de l'intelligence on ne sait *a priori* s'il faut associer à chaque individu un point sur un axe ou plutôt sur un plan (deux coordonnées : e.g. finesse et géométrie, selon Pascal...) ou un espace de dimension plus élevée, l'étude psychophysique des impressions thermiques éprouvées par la main plongée dans une eau de température variable se place naturellement dans un cadre unidimensionnel. Si le stimulus physique a plusieurs dimensions (par exemple un son pur a une fréquence et une intensité ; dans un son musical on peut considérer la proportion des harmoniques successifs du fondamental etc.) on peut expérimenter en n'en faisant varier qu'une seule. Parfois (par exemple dans le problème des couleurs auquel nous devons consacrer des articles ultérieurs) la complexité de l'agent physique est très grande mais les sens n'en perçoivent que certaines variations qui correspondent à quelques paramètres (3 dans l'exemple des couleurs) physiquement repérables. Dans cet exposé il s'agira principalement d'expériences unidimensionnelles : appliquant à un sujet un stimulus dont varie une coordonnée, mesurée par un nombre, le psychophysicien se propose de mesurer par un autre nombre, fonction du premier la sensation ou la réaction du sujet. Comme on le verra, la notion de seuil sensoriel, et la loi de Weber-Fechner jouent ici un rôle central. Mais la diversité des schémas expérimentaux utilisés, n'a d'égale que celle des conceptions générales dans lesquelles s'élaborent les résultats des expériences. Sur le rôle de ces conceptions, les philosophes ne s'accordent pas : c'est là un problème de théorie de la connaissance que nous ne prétendons pas discuter ici. Cependant, comme, sans hypothèse générale, calculs et expériences seraient souvent inintelligibles nous devons tenter de préciser les vues philosophiques des psychologues.

---

(1) Professeur de statistique. Université Pierre et Marie Curie.

Dans ce travail de critique nous utilisons plusieurs ouvrages de synthèse parus depuis bientôt un siècle : un long et dense article de P. Tannery (1884), les deux éditions du traité de Guilford (1936 et 1954), le manuel de Psychologie expérimentale (Handbook...) de Stevens (1951), les ouvrages méthodologiques de Torgerson (1958) et de Reuchlin (1962), et un recueil édité par Gulliksen et Messick (1962). Parmi les mémoires originaux signalons particulièrement celui de Von Békésy (1930) qui expose très clairement les distinctions essentielles que les ouvrages généraux ne nous semblent pas reprendre avec tout le détail indispensable. Les citations d'auteurs étrangers seront données dans la langue originale, et traduites ou résumées en français.

2 Origine de la psychophysique : Dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, des physiciens et astronomes, (français, notamment : Guilford, 1936 p. 115 et 1954 p. 23, cite Sauveur 1700, Bouguer 1760, Lambert 1764, et Delezenne 1826), étudièrent des phénomènes relevant de la psychophysique. Leur but était, semble-t-il, moins de faire oeuvre de psychologie, que de déterminer les erreurs introduites par les sens de l'homme dans l'emploi des instruments de mesure physique (préoccupation toute pratique, qui est celle des études ergonomiques contemporaines sur l'interaction homme-machine!). Dans ces mesures, le rôle de l'homme est principalement soit de lire sur une échelle la position d'une aiguille ou d'un autre repère, soit d'établir, par une manipulation, l'égalité ou la coïncidence apparente d'un terme que l'on peut modifier, avec un autre qui demeure constant. Par exemple, quant on utilise un pendule de torsion, on doit tordre un fil vertical jusqu'à amener l'aiguille horizontale qui y est suspendue à reprendre la direction d'un repère ; en photométrie, on déplace une source jusqu'à ce qu'une vitre dépolie qu'elle éclaire paraisse également lumineuse qu'une autre surface à étudier etc. Dès les schémas d'expériences de psychophysique (que nous décrirons en détail dans la suite) et la nature de leurs résultats. Les sujets portent, sur des stimuli, des jugements d'égalité ( $x = y$ ) ou d'inégalité ( $x > y$ ). On en déduit la marge d'erreur, ou seuil, que comportent ces jugements; (soit qu'il s'agisse de la plus petite valeur perçue d'une grandeur physique, soit de la plus petite variation que l'on puisse percevoir d'une grandeur déjà perçue : dans le premier cas on parle de seuil absolu, dans le second de seuil différentiel).

Etudiant le seuil différentiel dans la perception des intensités lumineuses, Bouguer et Lambert avaient reconnu la loi selon laquelle, ce seuil est proportionnel à la grandeur physique que l'on fait varier (e.g., pour emprunter un exemple à un domaine où la terminologie nous est plus familière qu'en photométrie, si sur une masse de 100 grammes on perçoit une variation de 10 grammes, sur une masse de un kilogramme on perçoit une variation de 100 grammes). Cette loi de la relativité des erreurs est si naturelle que, de même que pour la loi de Mariotte ("doublez la pression, le volume est divisé par deux"), on en conçoit mal d'abord l'importance. Et ce n'est qu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle que, sur un domaine dont l'étude était déjà commencée, la psychophysique se constitua en une discipline autonome. Sous l'impulsion de savants allemands et notamment du fougueux Fechner (il forgea, croyons-nous le nom même de psychophysique et les contemporains évoquent souvent son ardeur de polémiste à défendre la science nouvelle!) on en vint à considérer le jeu imprécis des sens, non en tant que cause d'erreurs perturbant la rigueur de la physique, mais comme une source précieuse d'informations quantitatives sur un des domaines de la nature jusque-là rebelle aux chiffres : le psychique.

3 La loi de Weber-Fechner : Sur la mesure des sensations, Fechner déduit de la loi des erreurs relatives (appelée communément la loi de Weber, du nom du savant allemand qui en marqua le premier la généralité) une formule logarithmique fameuse, qui porte son nom (souvent associé à celui de Weber). Nous donnerons d'abord le raisonnement mathématique

très simple qui justifie la formule. Nous présenterons ensuite difficultés mathématiques et subtilités philosophiques qu'expérience et théorie concourent à découvrir derrière les notions de seuil et de sensations...

Soit S un stimulus, agent physique (poids, température, courant électrique...) mesuré par un nombre noté aussi S. L'impression produite par le stimulus sur un sujet donné ne varie notablement que si S augmente (ou diminue) d'une quantité  $\Delta S$  liée à S par la formule (loi de Weber) :

$$\Delta S = kS$$

où k est une constante propre au sujet. Il est plausible que si le sujet note la variation  $\Delta S = kS$ , c'est qu'il y correspond une augmentation d'un degré constant  $\Delta I$  indépendant de S dans la sensation ou impression psychique I(S) produite par S. Si ce degré constant est mesuré par le nombre unité, on pourra écrire :

$$\Delta I(S) = \Delta S / (kS) ;$$

ou, sous forme différentielle :

$$dI/dS = 1/(kS) ;$$

et par intégration :

$$I(S) = \frac{1}{k} \text{Log}(S) + \text{Cte} ;$$

On détermine cette constante d'après le seuil absolu  $S_0$ , valeur du stimulus qui produit la plus petite impression perceptible, en posant :

$$I(S) = \frac{1}{k} \text{Log}(S/S_0)$$

C'est la loi de Fechner (ou de Weber-Fechner), selon laquelle la sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation.

Signalons dès maintenant (cf Tannery 1884 et 1927) deux objections que soulève cette formule : 1° d'une équation aux différences (en  $\Delta$ ) on passe à une équation différentielle (en d) ; 2° faisant du 0 ( $I(S_0) = 0$ ) le point de départ des impressions perceptibles, on donne à toutes les valeurs négatives de I la même interprétation d'impressions imperceptibles. Et passons aux difficultés inhérentes à la notion de seuil qui est à la base de la loi.

4 Dispersion statistique et seuil sensoriel : Pour un chercheur contemporain, habitué à ne rencontrer dans les sciences humaines aucun nombre qui ne soit défini statistiquement, on ne peut, sinon par abus de langage définir sommairement le seuil, ainsi que nous l'avons fait, comme la plus petite variation que l'on puisse percevoir d'une grandeur déjà perçue. Guilford (1936 p. III) écrit : "*The difference limen is not an observable psychological quantity as Weber and others had thought. It is rather an ideal calculated statistical value...*" (Le seuil différentiel n'est pas une quantité observable comme le pensaient Weber et d'autres auteurs. C'est plutôt un nombre défini par un calcul statistique...) Et il donne plus loin (1936, p. 187) cette définition dont la rigueur est conforme aux exigences d'un statisticien : "*It should be recalled that the D. L. is statistically defined as that stimulus difference which can be observed correctly 50 per cent of the time*". (Rappelons que le seuil différentiel est défini comme la variation du stimulus qui est correctement observée 50% des cas, par "correctement observé", il faut entendre que non seulement le sujet a déclaré que tel stimulus  $S_1$  est différent de tel autre  $S_2$ , mais encore

qu'il a reconnu lequel de  $S_1$  et  $S_2$  est le plus grand, ou le plus aigu, ou le plus lourd etc.). Une définition toute semblable peut être donnée du seuil absolu : ce sera le stimulus dont la présence est remarquée dans 50% des cas. Dans l'esprit des "lois du jugement comparatif" élaborées par Thorndike et Thurstone (cf Guilford 1954, Torgerson 1958... on peut faire l'hypothèse que les impressions produites par les stimuli sont entachées d'erreurs normales ; ce sont ces impressions que le sujet compare, avec une parfaite exactitude, (si elles dépassent le seuil absolu...), et l'ordre n'en est pas toujours celui des stimuli mêmes, d'où des erreurs. Cette propriété de normalité peut d'ailleurs être énoncée sous une forme qui ne fasse pas intervenir la mesure d'une grandeur hypothétique telle que l'impression sensible, mais seulement les effets d'une grandeur mesurable, (le stimulus physique). Si on dit que l'effet produit par  $S$  dans une expérience particulière, se trouve équivalent à l'effet moyen correspondant à un stimulus  $S + \Delta S$  où  $\Delta S$  est une grandeur aléatoire normale centrée, on s'affranchit à peu près des hypothèses structurales pour ne parler que des données expérimentales mêmes.

Il importe de noter ici que le seuil différentiel, défini avec Guilford comme un paramètre de dispersion, suit en général (approximativement, cf § 7 la loi de Weber. Mais, pour les fondateurs de la psychophysique, le seuil différentiel est, d'abord, une différence finie au-dessous de laquelle la précision des sens ne peut jamais descendre. Weber et Fechner, n'ignoraient pas la théorie des erreurs aléatoires, utilisées par les astronomes, précurseurs, on l'a dit, de la psychophysique. Mais seuil fini et erreur normale ne sont pas incompatibles. Nous verrons plus bas que des formules utilisées aux alentours de 1880 correspondent au schéma suivant. D'une part l'impression sensible produite par un stimulus n'en est pas une fonction certaine, mais une fonction entachée d'une erreur normale (dont l'écart-type limite la précision des mesures) ; d'autre part deux impressions sensibles ne sont distinguées par le sujet (et elles le sont alors de façon certaine) que si leur différence dépasse le seuil sensoriel (qui est tout autre chose que l'écart-type de l'erreur normale considérée ci-dessus). A ceci on croit pouvoir répondre que (cf Tannery 1886 et 1927 p. 254) : "S'il y a un seuil différentiel, dans toutes les séries d'expériences faites au-dessous de ce seuil, puisqu'il n'y a pas de différence réellement perçue, il y aura autant de probabilité pour une réponse fausse que pour une vraie ; on devra donc, sur un grand nombre, trouver autant de unes que des autres". Or des expériences dues à Peirce et Jastrow montrèrent dès 1886 que si faible que soit le différence des stimuli le sujet tend à donner plus de réponses vraies que de fausses ; fait que Guilford (1936 p. 195) invoque aussi dans le même sens que P. Tannery en se référant aux expériences de Warner Brown (1910). En fait il est clair mathématiquement que si coexistent d'une part une erreur (imprécision) continue normale sur l'impression sensible et d'autre part un seuil différentiel fini, la probabilité d'une réponse exacte sera supérieure à 1/2 même si à la différence des stimuli correspond une variation d'impression sensible inférieure en moyenne au seuil. On échappe ainsi à l'argument tiré des expériences de Peirce et Jastrow ou de W. Brown. Mais la conception du seuil différentiel esquissée ci-dessus n'en est pas justifiée pour autant. Par de remarquables expériences, G. von Békésy (1930) montra la validité d'un autre schéma qui a encore (du point de vue de l'objection) l'avantage de donner une probabilité de réponse exacte supérieure à 1/2, même si l'impression sensible n'est affectée que d'erreur normale minime.

5 Le psychique et le physique dans la loi de Fechner : Avant d'exposer au § 6 les vues de G. von Békésy le moment est venu de préciser le terme, volontairement vague d'"impression sensible", que nous avons employé jusqu'ici. Guilford (1954 p. 20) propose de la psychophysique la définition suivante : " *From the time of Fechner, psychophysicists has*

been regarded as the science that investigates the quantitative relationships between physical events and corresponding psychological events" (Depuis Fechner on assigne pour objet à la psychophysique l'étude des relations quantitatives entre les faits physiques et les faits psychiques qui leur correspondent). Et, précisant en quel sens il entend cette phrase, l'auteur américain reprend : "In more familiar terms, this means quantitative relationships between stimuli and responses" (Pour user des termes qui nous sont plus familiers, cela veut dire : relations quantitatives entre stimuli et réponses). Cette dernière formule ne semble pas équivalente à la première. On peut identifier "stimulus" et "fait physique" ; mais la réponse est aussi un fait physique, du moins constatable physiquement (si le sujet doit régler un potentiomètre jusqu'à ce que deux intensités lumineuses paraissent égales, sa réponse est la position de réglage ; si le sujet doit comparer deux stimuli, sa réponse pourrait être d'appuyer sur un bouton si le premier stimulus est supérieur au second). Le fait psychique est ce qui s'interpose entre le stimulus et la réponse. Pour certains psychologues, l'objet ultime de l'étude du comportement (de la relation entre stimulus et réponse) est de découvrir, autant qu'il se peut, quel est ce maillon psychique interposé. Mais pour plus d'un psychologue américain, marqué par le *behaviorisme* de Watson, le sujet psychique est une "black box" (boîte noire) sur laquelle il est vain de formuler des conjectures dans le langage de la psychologie traditionnelle ; le mot de "sensation", (ou "impression sensible"), ne peut être plus qu'un nom commode pour l'un des paramètres de nos calculs.

Or ici se retrouve la même opposition que sur la notion de seuil. Où Guilford ne veut voir qu'une construction mathématique sur les données de l'expérience, Fechner recherche l'homme. Cette opposition, qui retentit sur les formules mathématiques et la conception même des expériences, n'échappe d'ailleurs pas à Guilford qui note, quelques lignes après le passage cité : *Fechner's original interest was in the philosophical question of the relation between body and mind, between the physical and the psychical aspects of the world. He saw in his logarithmic law describing the relationship between stimulus and sensation a principle of cosmic importance. His energies and his ingenuities were bent toward the testing of the universality of this law*". En bref : Fechner s'intéressait à l'origine au problème philosophique des relations entre le corps et l'esprit... La loi logarithmique revêtait à ses yeux une importance cosmique. Il employa toutes ses énergies, tout son esprit d'invention à en démontrer l'universalité.

Pour plus de détails sur Fechner, revenons à P. Tannery qui écrit (1884 ; et, 1927 pp. 200 sqq.) : "Voici comment je comprends la théorie de Fechner : il faut distinguer entre l'excitation externe (Reiz), [en 1965 on dirait le stimulus, poids, courant électrique etc.] et l'irritation interne (Erregung), c'est-à-dire les ébranlements que produit la cause externe dans le système nerveux". C'est à cette irritation interne que la sensation est liée par la loi de Weber, et, d'après Fechner, cette liaison est rigoureuse. Mais l'irritation interne ne peut être mesurée directement ; on se trouve donc obligé de lui substituer, dans les calculs des expériences, l'excitation interne, et Fechner admet que celle-ci varie à peu près proportionnellement à l'irritation interne. Cependant, cette proportionnalité est troublée par des causes accidentelles ;... La théorie de Fechner, que nous venons d'exposer, fait nettement concevoir son point de vue, qu'il appelle psychophysique. Il dénomme au contraire physiologique l'hypothèse d'après laquelle la sensation serait proportionnelle à l'irritation interne, et celle-ci liée suivant la loi de Weber à l'excitation externe". Et, plus loin, (loc. cit. p. 212), P. Tannery attribue à Fechner "l'affirmation que cette relation logarithmique doit être considérée comme réglant véritablement les rapports entre la sensation éprouvée par le moi et l'irritation interne, qu'il faut bien distinguer de l'excitation externe, sur laquelle portent en réalité les expériences".

6 Les vues de G. von Békésy

G. von Békésy reprend les termes de Fechner, (Reiz, Erregung,...), mais ses conceptions sont plus physiologiques... et plus positives. Pour lui, la loi logarithmique ne relie pas d'un seul trait le corps à l'âme, elle relie la périphérie du système nerveux (pour Békésy l'unité de structure de la peau, organe de tous les sens, est une intuition de base patiemment élucidée au cours d'une très féconde carrière : non seulement la membrane basilaire de l'oreille (interne) est un membre de peau où les terminaisons nerveuses sont très denses, mais à la rétine et à la peau correspondent deux organisations inhibitrices analogues, cf 1960) à une couche plus profonde où les informations sensorielles parviennent codées sous une forme plus proche de celle directement accessible à la conscience, et, dans certains cas, presque sous cette forme même. Voici comment von Békésy représente la sensation d'intensité sonore (1930 p. 331) :

*"Von der Lautstärkempfindung, wie sie durch die Einwirkung eines Schalles eintritt, machen wir uns daher folgendes Bild. Durch die Erregung der Nervenenden auf der Basilarmembran entsteht ein Erregungsstrom, dessen Stärke sich je nach den Ermüdungsverhältnissen usw. mit der Schallstärke in einer vorläufig unbekanntem Weise verändert. Der Erregungsstrom erregt nun mit zunehmender Stärke nacheinander einzelne Zellen, durch die die Lautstärkempfindung entsteht. Jedesmal und nur dann, wenn eine neue Zelle mehr erregt wird, entsteht eine Lautstärkezunahme, wodurch sich die Unterschiedsschnelle erklärt. Da die Zellen des Nervensystems sehr gleichartig sind, so scheint es anatomisch verständlich zu sein, dass jedesmal beim Erregen einer neuen Zelle die Empfindungsstärke immer um den gleichen Betrag zunimmt, unabhängig davon, wieviel Zellen bereits erregt sind".* [De la sensation d'intensité sonore, je me fais l'image suivante. L'excitation des terminaisons nerveuses réparties sur la membrane basilaire donne naissance à un courant d'excitation qui, compte-tenu de la fatigue etc., dépend de l'intensité sonore d'une façon inconnue. Ce courant excite des cellules, l'une après l'autre, d'où naît la sensation d'intensité sonore. Si par suite de l'augmentation de l'intensité sonore, une nouvelle cellule est déclenchée, il se produit une sensation d'accroissement d'intensité d'où la notion de seuil. (Nous employons le terme de déclenchée de préférence à excitée, traduction littérale de l'allemand "erregt", car il nous semble clair que, pour Békésy, toutes ces cellules sont soumises à l'"Erregungsstrom", première traduction de stimulus, mais qu'elles ne se déclenchent qu'une à une, dans un ordre aléatoire, le nombre total de cellules déclenchées étant seul rigoureusement déterminé par l'"Erregungsstrom"). Comme les cellules nerveuses se ressemblent, il est plausible, du point de vue anatomique, qu'au déclenchement d'une cellule corresponde toujours le même accroissement de la sensation, quelque soit le nombre des cellules déjà déclenchées].

Pour Békésy, il y a là les points essentiels de la loi de Fechner:

1° : il existe un seuil "quantique" (une quantité finie discontinue...) qui est une caractéristique du système nerveux, caractéristique que l'attention ni l'exercice ne peuvent réduire. Ce seuil se retrouve aux divers niveaux considérés : au niveau sensoriel, il n'est que le déclenchement d'une cellule de plus ; au niveau du courant d'excitation  $E$ , il est la variation  $\Delta E$  susceptible de déclencher une cellule de plus (cf 3°) ; au niveau de l'excitant physique, du stimulus, auquel  $E$  est approximativement proportionnel (cf *infra*) le seuil est l'accroissement qui entraîne une variation de  $E$  égale au seuil d'excitation  $\Delta E$ . Dans la suite on parlera de "seuil", sans plus, chaque fois que le niveau considéré n'a pas à être précisé.

2° : au déclenchement d'une cellule du niveau sensoriel, correspond une augmentation subjective constante de la sensation. Il y a

constance du seuil au niveau sensoriel ; une quantité (intensité) de sensation peut être mesurée comme un nombre de seuils (forme accessible à l'expérience du nombre de cellules déclenchées).

3° : Enfin (et Békésy tente de donner ici une démonstration physico-chimique évidemment conjecturale...), la sensation  $S$ , mesurée par le nombre  $N$  des cellules déclenchées est proportionnelle au logarithme du courant d'excitation  $E$ , d'où la formule :

$$S = k \text{ Log } E,$$

ou, plus exactement,  $S$ , ( $= N$ ), est le plus grand entier contenu dans  $k \text{ Log } E$ . Le seuil de courant d'excitation est la variation  $\Delta E$  telle que :

$$k \text{ Log}(E + \Delta E) = 1 + k \text{ Log } E.$$

$$\Delta E \approx E/k ;$$

et le seuil de stimulus (physique) a la valeur correspondante à  $\Delta E$ .

Il nous reste à préciser (cf *infra* § 7) que, pour G. von Békésy, les accidents divers ("fatigue etc.", cf *supra*) n'en jouent pas moins un rôle essentiel, et que dans certains cas l'augmentation subjective de la sensation correspondant à un seuil peut varier (autrement dit, la constance du seuil au niveau sensoriel peut disparaître).

Auparavant, répondons à l'objection (présentée plus haut sous la plume de P. Tannery) que s'il existait un seuil, deux stimuli différant de moins d'un seuil ne seraient jamais distingués. Dans le système de Békésy, il n'est pas question (comme plus haut § 5) de mesurer la différence de deux stimuli nés de deux courants d'excitation pour conclure qu'il y aura confusion si cette différence est inférieure au seuil. A chaque présentation de stimulus correspond un nombre  $N$  de cellules déclenchées, deux stimuli, présentés consécutivement, paraissent égaux si et seulement si les nombres  $N$  correspondants sont égaux : Békésy a, à ce propos, une figure très claire : deux stimuli produisant des courants d'excitation  $E$  et  $E'$  sont confondus si et seulement si ils tombent "entre deux barreaux de l'échelle". i.e. si le  $\text{Log } E$  et  $k \text{ Log } E'$  sont compris entre deux entiers consécutifs. Deux stimuli fort proches peuvent ainsi être distingués, pourvu qu'ils tombent de part et d'autre d'un "barreau". Mais, évidemment, il n'y a pas de stimulus "barreau", i.e. de stimulus qui provoque toujours un courant  $E$  tel que  $k \text{ Log } E$  soit un entier constant. Selon l'état de fatigue etc.  $E$  fluctuera aléatoirement autour d'une valeur moyenne : c'est là le phénomène de dispersion signalé plus haut (§ 5). Si on présente quasi simultanément à un sujet deux stimuli différant d'une quantité inférieure au seuil il pourra se faire qu'ils tombent "entre deux barreaux" ou de part et d'autre d'un barreau et, selon les cas, ils seront confondus ou distingués. (Nous donnerons plus bas, avec les descriptions expérimentales, les courbes de probabilité de confusion en fonction de la différence des stimuli). En quelque sorte, il y a une échelle fixe des sensations, en face de laquelle vient se mesurer un continuum des stimuli affecté pour ainsi dire de vibrations et sur lequel ne se dessine donc aucune échelle fixe.

7 Exception à la loi de Weber : Nous présenterons d'abord ici les exceptions à la loi de constance de seuil sensoriel étudiées par Békésy, avant de passer aux vues d'autres auteurs.

D'une part, l'attention et l'apprentissage interviennent en ce que, (et l'expérience, cf *infra*..., le montre avec une précision singulière), la plus petite variation sensorielle remarquée par un sujet (inattentif ou non éduqué) peut correspondre au déclenchement de deux (ou de trois...) et non d'une seule cellule ; d'où variation du seuil au niveau sensoriel.



D'autre part, lorsque se mêlent plusieurs mécanismes, peut disparaître l'égalité, sur l'échelle sensorielle, des plus petits accroissements perçus. Békésy étudie l'exemple de la perception de la direction d'où provient un bruit. Deux facteurs principaux interviennent : décalage temporel et différence d'intensité entre les ondes sonores reçues par les deux oreilles. Expérimentalement, on peut faire varier séparément les deux facteurs, et noter les impressions du sujet qui reçoit dans chaque oreille des bruits artificiels. Si, ces bruits étant simultanés, on ne fait varier que la différence d'intensité, intervient d'abord le seuil sensoriel des intensités avant que, le sujet ne puisse traduire en déplacement apparent de la source sonore cette inégalité d'intensité. Or le seuil d'intensité se traduit par un déplacement apparent supérieur au seuil de direction, et dans un rapport variable avec lui, selon le rapport entre intensités droite et gauche. La constance du seuil sensoriel en est détruite.

Certes, plus que tel ou tel cas complexe où, comme dans la perception directionnelle s'enchevêtrent des mécanismes divers, on s'émerveille d'une expérience où semble déterminé le codage du stimulus sous une forme que l'attention puisse rendre quasi-totalement accessible à la conscience, (le sujet est conscient, sinon de l'expression codée elle-même - du nombre de cellules déclenchées-, du moins de chacune de ses variations). Mais, non content d'avoir reconnu des domaines où les vues de Weber et de Fechner trouvent, dans toute leur finesse une rigoureuse justification expérimentale, G. von Békésy a voulu décrire un exemple de mécanisme détaillé qui mette en défaut les lois de Weber et de Fechner, sans pour autant faire intervenir aucun principe nouveau.

Dans le même esprit, Stevens (1951, p. 35), en vue d'améliorer l'accord entre la loi de Weber et les faits expérimentaux, reprend une formule déjà considérée par Fechner, Helmholtz et G.A. Miller) selon laquelle le seuil (au niveau de l'excitant) est proportionnel non au stimulus  $S$  mais au stimulus augmenté d'un résidu  $S_r$  : ( $\Delta S = k(S + S_r)$ ). Si l'on peut trouver une interprétation concrète de ce résidu, la confiance dans la loi de Weber s'en trouvera renforcée ; et, dit Stevens, il n'y a pas tant de lois en psychophysique qu'on puisse les traiter à la légère ! ("*These basic invariances are too precious few to be taken lightly*").

D'autres auteurs, au contraire, ont proposé comme de nouvelles lois des formules qui, mieux que la loi de Weber, leur paraissent représenter des résultats des mesures de seuil. Guilford, (1936 p. 136 sq.), cite des lois :

$$\Delta S = k S^n, \text{ ou même}$$

$$\Delta S = k/\text{Log } S.$$

Parmi les lois monomiales, la formule

$$\Delta S = k\sqrt{S}$$

proposée par Fullerton et Cattell (1892) a reçu une justification particulière, précisée par Woodworth (1914). Par seuil, ces auteurs entendent (comme Guilford lui-même et la plupart des expérimentateurs qui s'intéressent à des situations moins bien définies que celles des expériences de Békésy) paramètre statistique de dispersion. Représentons-nous, avec F. et C. le stimulus  $S$  (e.g. une longueur observée par le sujet) comme composé de deux parties égales  $S'$  et  $S''$ . L'effet produit par  $S$  peut, dans une expérience particulière, se trouver équivalent à l'effet moyen correspondant à un stimulus  $S + \Delta S$ , où  $\Delta S$  est une grandeur aléatoire normale centrée d'écart-type  $\sigma_S$  (cf *supra* § 4 *in fine*). De même  $S'$  (resp.  $S''$ ) sera équivalent à  $S' + \Delta S'$  (resp.  $S'' + \Delta S''$ ) où  $\Delta S'$  (resp.  $\Delta S''$ ) est

normal centré d'écart-type  $\sigma_S$ , (resp.  $\sigma_{S''} = \sigma_S$ , puisque  $S' = S''$ ).

Les trois différences aléatoires sont liées par l'équation :

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S''.$$

Si on suppose que  $S'$  et  $S''$  sont aléatoires indépendants, on a :

$$\begin{aligned} \sigma_S &= \sqrt{2} \sigma_{S'} , \\ \frac{\sigma_S}{\sqrt{S}} &= \frac{\sigma_{S'}}{\sqrt{S'}} = \frac{\sigma_{S''}}{\sqrt{S''}} \end{aligned}$$

C'est la loi de la racine carrée. Si, au contraire,  $\Delta S'$  et  $\Delta S''$  sont parfaitement corrélés (donc égaux) :

$$\sigma_S = 2\sigma_{S'} ,$$

on a la loi de Weber. A quoi Woodworth ajoute que tous les cas intermédiaires (tous les coefficients de corrélation entre  $\Delta S'$  et  $\Delta S''$ ) peuvent être introduits pour rendre compte de diverses exceptions à la loi de Weber. Quoique Guilford écrive (1936, p. 143), à propos d'expériences (recherches du milieu d'intervalle sensoriel) dont nous parlerons au § suivant, "*Not that intense sensations are merely heaps or summations of smaller sensations ; this notion has long since disappeared from the mind of thinking psychologists*" (les sensations internes ne sont pas de simples amas, ni même des sommes de sensations élémentaires ; voilà longtemps qu'il n'y a plus un psychologue raisonnable pour le croire...) il nous paraît difficile de présenter les vues ingénieuses de Fullerton et Cattell et de Woodworth, sans en évoquer cette justification certes contestable.

§ Echelle de mesure : Dans les expériences psychophysiques que nous considérons, le stimulus est repéré par un nombre  $S$  et l'on veut mesurer par un nombre  $I(S)$  l'impression produite par  $S$ . La formule logarithmique de Fechner (cf § 3) requiert la double hypothèse que le seuil suit la loi de Weber ( $\Delta S = k/S$ ) et que la différence entre deux sensations est égale au nombre de seuils différentiels qui les séparent. Ces hypothèses qui sont les mieux justifiées dans certaines expériences, analogues à celles de G. von Békésy, dues à Stevens, Morgan et Volkman (1941 cf *infra*), ne sont pas généralement admissibles ; nous devons donc revenir sur la mesure de la sensation.

Ici se présente une distinction essentielle bien marquée par Stevens (1951 p. 36). Ou bien à l'accroissement du nombre  $S$  correspond le déclenchement d'un nombre de plus en plus grand de cellules nerveuses, et alors l'impression sensible a une intensité  $I(S)$  qui croît avec  $S$  ; ou bien quand  $S$  varie de nouveaux neurones sont déclenchés tandis que d'autres cessent leur activité et le nombre  $I(S)$  mesure seulement le déplacement de l'impression sensible. Dans le premier cas, (intensité sonore, intensité lumineuse, pression) l'espace des sensations est une demi-droite dont l'origine correspond sur l'axe des  $S$  au seuil absolu : quand on s'éloigne de cette origine, l'impression sensible croît jusqu'à devenir de plus en plus douloureuse... Dans le second cas (fréquence d'un son pur) les stimuli perçus par le sujet forment un segment de l'axe des  $S$  : l'impression sensible apparaît, devient nette, disparaît sans qu'aucun phénomène douloureux ne se produise. Il faut remarquer que du point de vue de la topologie il n'y a aucune différence entre une droite entière, une demi-droite (privée de son origine) et un intervalle (ouvert) : ces trois espaces peuvent être mis en correspondance biunivoque et bicontinue l'un avec l'autre. De même, pour l'éternité temporelle, ou l'infini spatial le problème n'est pas de savoir si les instants ou les lieux doivent être repérés par des paramètres

donnés en prenant des valeurs arbitrairement grandes, car une transformation continue peut relier des paramétrages de l'un et l'autre type ; mais la question est : existe-t-il des points frontières ? ou : le contenu spatial, temporel, spatio-temporel est-il compact ? . Cependant comme la sensation doit être définie comme un nombre fonction de  $S$  il est intéressant de savoir si cette fonction est définie sur une demi-droite ou sur un segment !

Dans le cas d'une impression d'intensité (demi-droite) il s'impose (on l'a dit § 3) de poser  $I(S_0) = 0$ , où  $S_0$  est le seuil absolu ; seulement le seuil absolu étant défini statistiquement (cf § 4) la position de ce zéro peut dépendre de la forme des expériences.

Dans le cas d'un intervalle, il n'est pas naturel de donner à la sensation une valeur nulle à l'une plutôt qu'à l'autre des extrémités : aucun zéro ne s'impose.

On a posé que  $\Delta I = 1$ , lorsque  $\Delta S =$  un seuil. Plusieurs difficultés apparaissent ici. D'une part si sur une demi-droite il est normal que  $I(S)$  croisse quand on s'écarte du seuil  $S_0$ , il n'y a rien de tel sur le segment : il est aussi naturel de poser que  $\Delta I$  vaut  $+1$ , ou qu'il vaut  $-1$  quand la fréquence d'un son augmente d'un seuil (coma). D'autre part si le seuil différentiel est un paramètre dispersionnel, sa valeur (encore plus que celle de  $S_0$ ) dépendra du processus expérimental. Notons

$$\Delta(S, \text{Exp})$$

le seuil trouvé à partir du stimulus  $S$ , dans l'expérience  $\text{Exp}$ .

Supposons que, quel que soit le nouveau 'mode d'expérience  $\text{Exp}'$  le rapport :

$$\Delta(S, \text{Exp}') / \Delta(S, \text{Exp}) ;$$

ne dépend pas de  $S$  ; il en résultera que si  $S_1, S_2, S_3$  sont trois stimuli perçus, le rapport :

$$|I(S_1) - I(S_2)| / |I(S_1) - I(S_3)|$$

entre différences sensorielles mesurées en seuils ne dépendra pas du processus expérimental choisi. Autrement dit passer de  $\text{Exp}$  à  $\text{Exp}'$  aura le même effet que de passer de la mesure des masses en grammes à leur mesure en grains. Mais, selon Torgerson (1958 p. 151) on peut douter que tel soit en général le cas.

Jusqu'ici on a discuté dans quelle mesure les postulats définissant  $I(S)$  étaient applicables aux données expérimentales. Dès le début de la psychophysique, (Plateau, Delboeuf...), on s'est aussi demandé s'ils étaient légitimes, si les opérations arithmétiques auxquelles on peut se livrer sur les nombres  $I(S)$  avaient leurs correspondants psychologiques. D'où, par exemple, les questions suivantes :

1°) Un stimulus  $S$  dépassant de 20 seuils (différentiels) le seuil absolu  $S_0$  paraît-il "deux fois plus fort" qu'un autre  $S'$  de 10 seuils supérieur à  $S_0$  ?

2°) Un stimulus  $S$  tel que :

$$I(S) = \frac{1}{2} (I(S_1) + I(S_2))$$

paraît-il "au milieu" de l'intervalle ( $S_1, S_2$ ) ?

Selon Stevens, (1951 p. 36), dans le cas des intensités sonores la

réponse à la première question est négative (S semble plus de deux fois plus fort que S') et l'égalité subjective des seuils doit en général être rejetée pour toute sensation d'intensité (demi-droite), notamment pour les expériences de Békésy.

En revanche dans les sensations de déplacement (variation d'une fréquence, d'une couleur, sur un intervalle, ...) la réponse à la deuxième question est souvent affirmative. D'où l'intérêt des travaux de Stevens et al. (1941) reprenant, avec des stimuli sonores de fréquence variable, le schéma expérimental de G. von Békésy : on a là l'exemple, (bien rare !), d'un cas pleinement conforme aux vues des fondateurs de la psychophysique.

Dans la suite nous reviendrons sur l'étude expérimentale des échelles sensorielles, ainsi que sur leur définition formelle. Mais, en conclusion à ce §, formulons les points suivants :

a) Le domaine des sensations provoquées par un stimulus physique unidimensionnel est un continuum assimilable à une droite (ou, ce qui topologiquement revient au même, à une demi-droite ou un segment).

b) Ce continuum peut être muni d'une orientation naturelle, depuis l'insensibilité (zéro) jusqu'à la douleur ; ou au contraire, se résoudre à ces deux extrémités en des sensations de moins en moins distinctes.

c) Il est en général impossible de définir une distance absolue, car la valeur de l'unité, ou seuil, varie selon le processus expérimental. Au mieux on peut postuler que les échelles définies par les divers processus sont reliées entre elles linéairement.

d) En l'absence de telles relations, les auteurs américains (Stevens (1951, pp. 26 sqq.) appellent le continuum des sensations une "*ordinal scale*" (échelle ordonnée). Si la sensation peut être mesurée par un nombre défini à une transformation linéaire près (comme des températures en centigrade aux températures en Fahrenheit dit Stevens) il y a "*interval scale*". Si de plus on a un zéro (intensités sonores etc.) il y a "*ratio scale*" (*ratio* = rapport ; parce qu'on peut alors définir le rapport de deux sensations).

e) La possibilité de définir de façon stable une échelle de tel ou tel type ne permet pas de préjuger de l'existence d'un équivalent psychique pour les opérations mathématiques que permet l'échelle (e.g. milieu sur une "*interval scale*", produit par un scalaire sur une "*ratio-scale*").

9 Sensation et perception : Nous avons déjà employé les mots de sensation et de perception, disant par exemple que le stimulus produit une impression *sensible*, ou que le sujet *perçoit* une variation du stimulus. Il importe de préciser le sens de ces mots.

D'une part, par des recherches très ingénieuses et très fines (G. von Békésy) des psychologues ont précisé, presque jusque dans les détails physiologiques, comment des impressions produites par les agents physiques (stimuli) sont traduites, codées en phénomènes nerveux : dans de telles recherches, on vise à éliminer autant que possible de comportement conscient, rationnel du sujet, la complexité de son attitude pour isoler par la situation expérimentale le jeu d'un mécanisme inné, comme on isolerait avec un scalpel une fibre nerveuse.

D'autre part les informations codées ne sont pas immédiatement accessibles dans leur détail au sujet nouveau-né. Et G. von Békésy (e.g. 1930 p. 351) note même qu'il faut quelques jours à des sujets adultes pour retrouver ces informations dans le cadre très dépouillé de certaines

expériences (cf *infra*). Un apprentissage est nécessaire pour distinguer dans la masse d'abord confuse des impressions nerveuses certains traits qui se revêtent d'un sens. Le rapport établi ainsi entre un stimulus extérieur et un sens, (c'est-à-dire tel ou tel intérêt matériel ou intellectuel du sujet) doit avoir sa marque matérielle, physiologique : de nouveaux codages et des associations qui ne sont pas innés. Mais le scalpel (stratégie de situations, plutôt qu'instrument chirurgical!, cf *supra*) qui isolera ces circuits reste à inventer.

Cette distinction entre le codage nerveux des impressions physiques d'une part, et d'autre part la sélection, l'organisation de ces informations en une forme disponible à la conscience pour la pensée et pour l'action, reprend, croyons-nous, (décrite en un style marqué par la cybernétique), la distinction classique entre sensation et perception. Si les expériences de psychophysique ont surtout été jusqu'à présent considérées du point de vue de la sensation (comme un codage plus ou moins précis d'un nombre par un autre) le point de vue de la perception n'est pas absent. Notons rapidement, (Bruner et Postman, 1948, cités d'après Stevens 1951 p. 37), qu'un disque marqué d'un signe dollar paraît plus grand qu'un disque de même diamètre marqué d'un signe "neutre" (sic.), et passons aux applications psychologiques de la théorie de la détection des signaux.

Décrivons les expériences de Tanner et Swets (1954) (pour plus de détails, cf *infra in fine*). A chaque essai l'expérimentateur peut, ou non, présenter au sujet un signal ; le sujet doit répondre s'il vient ou non d'y avoir signal, et le sujet est rétribué ou pénalisé, (encore le  $\beta$ !), selon un barème qui prévoit les quatre cas possibles (selon que l'expérimentateur a, ou non, présenté un signal ; et selon que le sujet en a, ou non, annoncé un). Une première constatation est que, l'intérêt jouant, la probabilité qu'un signal présenté soit reconnu varie avec le barème, ainsi qu'avec la fréquence de présentation effective. Comme aussi le sujet annonce parfois des signaux alors qu'il n'y en a pas eu, une explication simple, et d'ailleurs classique se présente. D'une part le sujet à une probabilité  $v$  de voir un signal réel ; et tout signal, effectivement vu, est annoncé par le sujet. D'autre part, s'il n'y a pas eu de signal, ou s'il ne l'a pas vu, le sujet a encore une probabilité  $f$ , d'annoncer un signal, effectuant ainsi une détection fictive, sans base sensible. Le sujet a toujours intérêt à disposer du maximum d'information vraie, donc à maintenir, par l'attention, le paramètre  $v$  au niveau maximum que permettent ses facultés sensorielles. En revanche, l'intérêt d'introduire des détections fictives varie avec le barème... on peut donc admettre que les variations de comportement du sujet correspondent à des variations inconscientes de  $f$ . S'il en est bien ainsi, on peut calculer  $f$  d'après le nombre des détections erronées (signal annoncé alors qu'il n'a pas été présenté), puis par une différence calculer  $v$ . Or de l'analyse statistique des données expérimentales, il résulte que le paramètre  $v$  ainsi calculé varie significativement, contrairement au schéma de comportement suggéré ci-dessus. Il faut donc conclure que, dans la détection des signaux, l'intérêt du sujet interfère avec le donné sensoriel plus intimement qu'on ne l'a jusqu'ici supposé. Tanner et Swets proposent le schéma suivant. L'impression sensible produite par le fond sur lequel apparaît le signal n'est pas elle-même constante ; elle fluctue. Le signal se manifeste donc par une variation de niveau de l'impression sensible, qui pourrait aussi être due à une fluctuation. Le sujet choisit (inconsciemment, mais en fonction de son intérêt) un seuil, au-delà duquel il décide qu'il y a signal et non simple fluctuation. Si on fait une hypothèse de normalité sur les fluctuations, les réponses du sujet peuvent être décrites à partir de deux paramètres. L'un, (comme tout à l'heure  $v$ ), est sensoriel : c'est le rapport de la valeur du signal à l'écart-type de la fluctuation ; l'autre (qui se substitue à  $f$ ) est plutôt perceptif : c'est le seuil (fixé par le sujet), seuil que l'on peut mesurer par son rapport au signal. Les formules calculées dans ce

cadre s'accordent bien, disent Tanner et Swets avec leurs résultats expérimentaux.

Selon ces très intéressantes conceptions, (que l'on peut généraliser à d'autres situations expérimentales que celles de T. et S.), il faut distinguer entre le paramètre de fluctuation, (grandeur sensorielle dont le sujet n'est pas maître), et le seuil de décision que le sujet choisit (inconsciemment toutefois!) en fonction du problème perceptif qu'il doit résoudre.

Signalons enfin que, récemment, sont apparus des modèles où interviennent à la fois les seuils quantiques de Fechner et de Békésy et la théorie de la détection des signaux. Norman (1964 p. 96) rappelle que von Békésy et ses émules ne réussissent à mettre clairement en évidence le seuil quantique qu'avec des sujets parfaitement entraînés et dans des conditions de régularité absolue : *"Only select, well-trained observers seem to produce a clean, stable data, and the experimental conditions must be as simple as possible for the observer"* (pour obtenir des données nettes et stables, il faut choisir ses sujets, les bien entraîner, les placer dans des conditions expérimentales aussi simples qu'il se peut). En modifiant les expériences, e.g. par l'introduction de stimuli-pièges égaux au niveau de référence (Larkin et Norman, 1963) on voit, en quelque sorte, dégénérer les résultats. Or Norman (1964, p. 109) note que *"No continuous detection model has been proposed as yet that is able to describe quantitatively the results of both the quantal experiments and the "catch trial" experiments"* (aucun modèle continu n'a pu décrire à la fois les résultats des expériences de Békésy et ceux des expériences modifiées par l'introduction de stimuli-pièges). Mais pour rendre compte des résultats expérimentaux par un modèle discontinu, il ne suffit pas de remplacer la fluctuation continue du signal, envisagée ci-dessus, par une fluctuation discontinue (i.e. de supposer qu'un même stimulus physique peut produire, selon les cas, diverses impressions dont les valeurs diffèrent toutes entre elles par un nombre entier de seuils quantiques). Il faut compliquer le processus de décision: il n'y a pas un simple seuil de décision, mais pour chaque valeur de l'impression produite (valeur exprimée à partir d'un niveau de référence par un nombre entier de seuils) le sujet a une probabilité de répondre qu'il a, ou non, enregistré une variation. Ces probabilités ne constituent pas une stratégie optimale (car, ici, ce serait avoir un seuil de décision : toutes les probabilités vaudraient zéro ou 1) mais elles sont, l'aboutissement d'une évolution, d'un processus d'apprentissage.

Luce (1963) puis Norman (1964) ont étudié en détail des modèles de tels processus, comportant un renforcement linéaire. Sans entrer dans la description de ces modèles, bornons-nous à en signaler ici l'inconvénient majeur. Il est certes assez facile de concevoir un modèle qui s'accorde avec les résultats expérimentaux dont on dispose : mais nombreux sont les modèles acceptables de ce point de vue ; et les plus simples d'entre eux dépendent encore de trop de paramètres pour que l'on puisse en choisir un, sans un nombre d'expériences qu'aucun sujet ne supporterait. Des trois critères qui doivent concourir pour qu'une formule empirique soit mise au rang de loi, à savoir :

la simplicité structurale,

l'ajustement optimum aux données,

l'accord avec les structures reconnues dans des domaines voisins de la science,

aucun ne force l'adhésion à un modèle précis d'apprentissage. Le processus inconscient suivant lequel le sujet oriente volontairement sa stratégie aléatoire de décision est certes du plus haut intérêt psychologique : mais présentement on n'en peut rien dire que de conjectural.

## BIBLIOGRAPHIE

- G. von Békésy : *Neural Inhibitory Units of the Eye and Skin. Quantitative Description of Contrast Phenomena. Journ. opt. Soc. America*, T 50, pp. 1060-1070 (1960) ; reproduit dans : *Readings in Mathematical Psychology*, T II ; J. Wiley ; New-York (1965).
- G. von Békésy : *Über des Fechnersche Gesetz und seine Bedeutung für die Theorie der akustischen Beobachtungsfehler und die Theorie des Hörens, Annalen der Physik* ; 5° série T. 7 pp. 329-359 (1930).
- W. Brown : *The judgement of difference* ; Univ. Calif. Pub. Psycho. ; Vol. 1, n° 1 ; (1910).
- J.S. Bruner et L. Postman : *Symbolic value as an organizing factor in perception* ; J. Psychol. ; T. 27 ; pp. 203-208 ; (1948).
- G.S. Fullerton et J. Mc K. Cattell : *On the perception of small differences* ; Publ. Univ. Penn. Phil. Series, n° 2 ; (1892).
- J.P. Guilford : *Psychometric Methods* ; Mc Graw-Hill, N.-Y. ; 1° édit. (1936) ; 2° édit. (1954).
- W.D. Larkin et D.A. Norman : *An extension and experimental analysis of the neural quantum theory. In R.C. Atkinson (ed.) : Studies in mathematical psychology* ; Stanford University Press ; (1963).
- R.D. Luce : *A threshold theory for simple detection experiments* ; *Psychological Review* ; T. 70, pp. 61-79 ; (1963).
- D.A. Norman : *Sensory thresholds, responses biases, and the neural quantum theory* ; *Journal of Mathematical Psychology* ; T. 1, pp. 88-120 (1964).
- C.S. Peirce et J. Jastrow : *On small differences of sensation* ; *National Academy of Science* ; Baltimore Vol. III.
- M. Reuchlin : *Les méthodes quantitatives en psychologie* ; Presses universitaires de France ; Paris 1962.
- W. P. Tanner jr et J.A. Swets : *A decision-making theory of visual detection* ; *Psychological Review* ; Vol. 61, pp. 401-409 ; (1954).
- P. Tannery : *Critique de la loi de Weber* ; *Revue philosophique* T. XV pp. 15-35 (1884), et : *Oeuvres complètes*, T.VIII pp. 187-217 ; Privat et Gauthier-Villars ; Toulouse-Paris (1927).
- P. Tannery : *A propos de la loi de Weber* ; *Revue Philosophique* , T. XXI pp. 386-387 (1886), et : *Oeuvres complètes* , T. VIII pp. 253-256 (1927).
- W.S. Torgerson : *Methods od scaling* ; J. Wiley ; New-York ; (1958).