

## Le concept d'action et les récepteurs d'action

---

1) La mise en service du nouveau programme de Sciences physiques, avec des expériences sur table à coussin d'air, peut conduire la réflexion des élèves vers des chemins fort détournés et les engager à poser des questions auxquelles il est bon de s'être préparé. Les tables à coussin d'air ont, en effet, pour fonction de produire la sustentation des objets à étudier ; mais, tandis que le professeur a la charge de faire porter l'attention sur les déplacements horizontaux de ces objets, peut-il éluder les questions touchant à cette sustentation ?

Par la télévision, par les voyages, par les bandes dessinées, les élèves sont familiarisés avec la sustentation. Ils connaissent les hélicoptères en vol stationnaire, les avions à décollage vertical, les hydroglisseurs à jupe... Les encyclopédies enfantines leur montrent le vol des insectes et la manière de butiner des colibris. Ne serait-ce pas faire de la mauvaise physique que de paraître s'occuper, autour des tables à coussin d'air, d'un seul phénomène dans des expériences où, avec raison, les élèves en observent deux ?

Or, on peut relier aisément les phénomènes de sustentation à une foule de phénomènes qui possèdent en commun la particularité suivante : « Une fois établi le régime stationnaire, au moins un des objets du système concerné est le siège d'un échange d'énergies caractérisé par un travail utile nul ».

### 2) PHENOMENES MELANT LA DYNAMIQUE ET LA STATIQUE.

1. Soit un ampèremètre électromagnétique. Son équipage mobile est un véritable moteur capable d'un quart de tour. Pour tourner, il doit recevoir de la source un travail utile jusqu'à ce que l'aiguille se stabilise sur une division du cadran ; alors le régime stationnaire s'installe et l'équipage mobile appartient à la statique. La loi du couple moteur égal au couple résistant du ressort antagoniste entraîne l'équilibre ; l'énergie de la source traverse le cadre et s'y perd en chaleur ; l'effort des conducteurs actifs n'apparaît pas à l'observateur.

2. Un électro-aimant porteur fournit à son armature (et aux objets qui y sont accrochés) une énergie magnétique initiale pour

la plaquer sur les entrefers. L'armature devient ainsi un élément rigidement lié au circuit magnétique, lequel est soumis dès lors à une excitation constante. L'énergie de la source est tout entière perdue par effet Joule dans les enroulements, mais sa fourniture est indispensable au maintien statique de la pression négative sur l'armature.

3. Un simple cerf-volant, envolé dans un vent régulier, peut être stabilisé à toute altitude. Il appartient à la dynamique au cours de son envol, puis pour les changements d'altitude ; entre temps, il est en palier et appartient à la statique. L'équilibre est, de manière évidente, liée à l'absence de sautes de l'énergie éolienne ; l'altitude, à un ensemble de facteurs actifs ou passifs.

4. D'innombrables dispositifs, mécaniques ou non, sont de la sorte. En raison peut-être des découpages des programmes d'enseignement et des divisions des chapitres des manuels, ils sont rarement examinés à la fois sous leurs aspects dynamique et statique. N'est-il pas souhaitable de leur accorder un effort pédagogique particulier ? Ils semblent le mériter ; car ils font appel à des concepts majeurs.

### 3) CLASSEMENT GENERAL DES RECEPTEURS D'ENERGIE.

— On peut ranger les objets ou systèmes récepteurs d'énergie en deux grandes classes selon leur fonction technologique essentielle :

a) les récepteurs qui transforment l'énergie qu'ils absorbent en une autre énergie, au prix d'une énergie perdue ; ce sont les « *récepteurs d'énergie proprement dits* » ; en régime permanente, leur loi générale s'écrit par l'équation des puissances :

$$P_a = P_u + P_p$$

b) les récepteurs qui délivrent un « produit technologique » autre qu'une énergie, au prix de l'entretien de leur énergie interne ; en régime permanent, ils ne font apparaître aucune puissance utile ; leur loi est :

$$P_a \neq 0 ; \quad P_a = P_p ; \quad P_u = 0$$

— On peut convenir d'appeler « *récepteurs d'action* » les récepteurs de cette deuxième classe. Leur fonctionnement est lié à la présence d'un générateur d'énergie, source naturelle ou dispositif technologique de nature appropriée.

#### 4) NOTION D'ATTELAGE D'UN GENERATEUR D'ENERGIE ET D'UN RECEPTEUR D'ACTION.

1. Soit un générateur d'énergie ; en région stationnaire, son fonctionnement est caractérisé par la puissance  $P_g$ .

Soit le récepteur d'action attelé à ce générateur d'énergie ; la grandeur physique qui qualifie et quantifie son état en régime stationnaire est l'énergie  $W_r$ , emmagasinée dans son mécanisme et/ou dans sa structure.

La relation fondamentale de l'attelage est :

$$W_r = k \times P_g$$

2. On peut donner au facteur  $k$  le nom de « *coefficient de performance* » (\*). Ainsi défini, le coefficient de performance associe deux grandeurs physiques fondamentalement disjointes puisqu'elles caractérisent deux systèmes de natures différentes, le générateur d'énergie et le récepteur d'action. Le coefficient de performance peut être constant ou variable, selon la constitution de l'attelage et la nature de ses composants.

#### 5) ENERGIES DE L'ATTELAGE.

On distingue :

a) l'énergie  $W_r$  fournie par le générateur lors du démarrage de l'attelage ; cette énergie, constante en régime stationnaire, est variable en régime transitoire ;

b) les énergies d'échange, caractérisées par leur débit instantané.

#### 6) ECHANGES D'ENERGIE ENTRE UN GENERATEUR ET UN RECEPTEUR D'ACTION.

— En régime continu, le générateur fonctionnant à puissance constante  $P_g$  fournit au récepteur d'action l'énergie :

$$W_a = P_g \times t$$

Cette énergie est totalement perdue : dès l'instant  $t_1$  du régime stationnaire, on a :

---

(\*) NOTA : Voir en annexe la relation de principe entre  $k$  « *constante de temps* », et  $k$  « *coefficient de performance* ».

$$\Delta W_a = \Delta W_p \quad \Delta W_u = 0$$

— Cependant, la traversée du récepteur d'action par  $\Delta W_a$  et sa disparition sous forme de  $\Delta W_p$  ont pour conséquence le maintien de  $W_r$  à la valeur qu'avait cette énergie à l'instant précis où le régime est devenu stationnaire. On dit que  $W_r$  est engendrée par  $P_g$ .

### 7) NOTION D'ACTION.

— Au cours d'un régime stationnaire, le générateur d'énergie exerce sur le récepteur une « action » dont la grandeur est définie par le produit :

$$A = W_r \times \Delta t$$

— Cette action est de même nature physique que le « *quantum d'action* » de Max PLANCK, avec pour équation aux dimensions :  $A = \dot{M} \cdot L^2 \cdot T^{-1}$ .

### 8) NIVEAU D'ENERGIE DU RECEPTEUR D'ACTION.

— Le maintien de  $W_r$  à une valeur définie peut être interprété comme un niveau d'énergie conservé tout au long du régime stationnaire (voir fig. 1).

— Le niveau zéro pour  $W_r$  est déterminé arbitrairement, soit par référence au système lui-même, soit par référence à d'autres systèmes. Il peut, par exemple, être manifesté par une altitude repère, ou encore par une butée dans un mécanisme ; mais il peut aussi être rattaché, par des moyens abstraits mais plus généraux, à la notion de potentiel.

— Dans le fonctionnement du système, toute modification de la valeur de  $P_g$  entraîne une variation correspondante de  $W_r$  et, par conséquent, un autre équilibre de l'attelage à un niveau d'énergie différent : la condition d'équilibre entraîne l'existence d'un niveau d'énergie, mais, en général, ne définit pas lequel.

### 9) GRANDEUR CARACTERISTIQUE APPARENTE.

— Tout régime stationnaire se traduit par l'équilibre statique du récepteur d'action :

Les lois d'équilibre statique permettent de déterminer une « grandeur caractéristique apparente ». Ainsi, pour les objets pesants en sustentation, la grandeur caractéristique apparente est

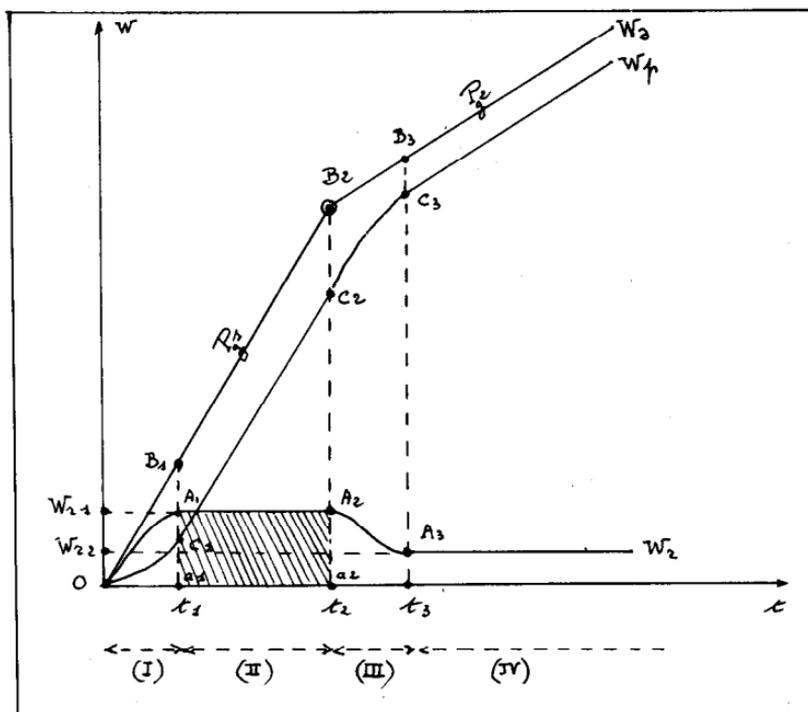


Fig. 1. — Représentation graphique des énergies concernant un récepteur d'Action :  $W_r = k P_g$  avec  $k = \text{cte}$ .

a) De  $O$  à  $t_2$  : Puissance fournie :  $P_{g1} = \text{cte}$ .

Régime transitoire I. Etablissement du régime stationnaire II, puisque l'on obtient le palier  $W_{r1} = \text{cte}$ ,

avec :  $W_{a1} = P_{g1} \times t$ , et  $W_{p1} = W_{a1} - W_{r1}$ .

b) De  $t_2$  à  $t_3$  : Puissance fournie :  $P_{g2} = \frac{2}{5} P_{g1} = \text{cte}$ .

Régime transitoire III. Etablissement du régime stationnaire IV avec ensuite le palier :

$$W_{r2} = \frac{2}{5} W_{r1} = \text{cte};$$

$W_{a2}$  décrit la droite de pente  $P_{g2}$ ;

$$W_{p2} = W_{a2} - W_{r2}.$$

c) Les paliers  $W_{r1} = \text{cte}$  et  $W_{r2} = \text{cte}$  sont les représentations de deux niveaux d'énergie.

d) L'aire  $a_1 A_1 A_2 a_2$  mesure l'action :  $A = W_{r1} \times (t_2 - t_1)$  au cours du régime stationnaire II.

la force exercée par le générateur sur le récepteur. On dit que cette grandeur, nécessaire à l'équilibre, n'est qu'une *caractéristique apparente* parce que :

- 1° elle n'est pas directement liée au niveau d'énergie du récepteur d'action ;
- 2° elle ne rend pas compte du « coefficient de performance ».

### 10) MONTAGE DIDACTIQUE ELEMENTAIRE (voir fig. 2).

1. Avec un évier, un robinet d'eau, une balance à long fléau oscillant entre deux butées et un jeu d'entonnoirs lestés de conicités et d'ouvertures diverses, il est facile de bricoler un montage, démarqué du très vénérable problème des baignoires sans bonde et des robinets de l'école primaire. Le générateur d'énergie est le robinet d'eau ; le récepteur d'action est l'entonnoir. Pour qu'il demeure vertical, il suffit de le munir d'une masselotte  $m$  à son extrémité inférieure et lui permettre, à l'aide d'un support fourchu, d'osciller autour d'un axe parallèle au couteau central de la balance. Ainsi placé à une extrémité du fléau, il peut équilibrer une masse  $M$  préparée dans le plateau qui est à la deuxième extrémité.

Pour une masse  $M$  donnée, les niveaux d'énergie sont marqués par les divisions du secteur devant lequel se déplace l'aiguille. Chacun peut imaginer des variantes pour ce montage, et pour son utilisation pédagogique (voir fig. 3).

2. Le frein de PRONY se rattache à ce montage ; c'est également un récepteur d'action, et sa grandeur caractéristique apparente est le couple résistant statique qu'il oppose au couple moteur dynamique de l'arbre tournant auquel il est attelé.

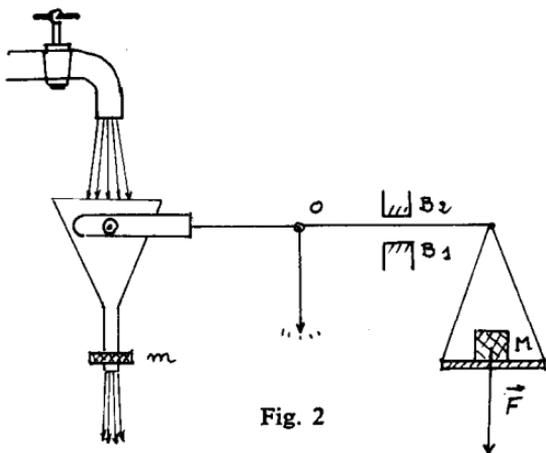


Fig. 2

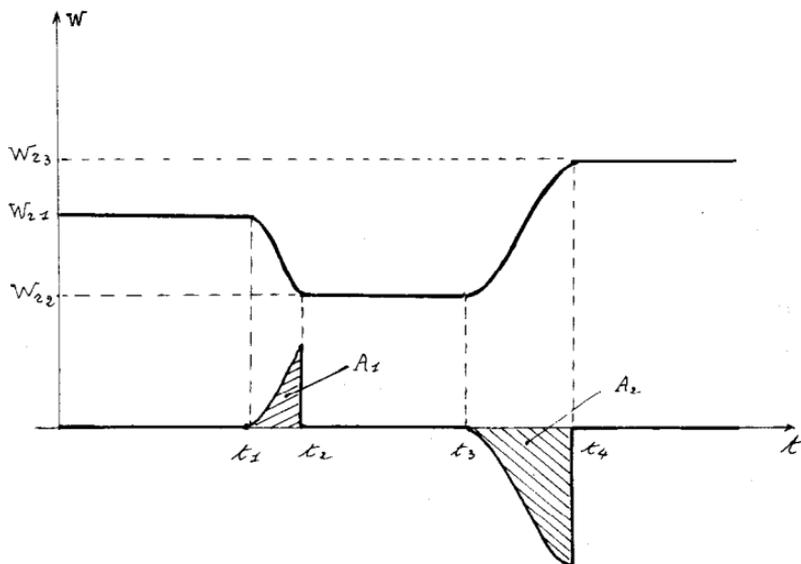


Fig. 3. — *Changements de niveaux d'énergie d'un « récepteur d'action » :*

a) Lorsque le niveau d'énergie passe de  $W_{r1}$  à  $W_{r2}$ , le récepteur d'action libère une « quantité d'action » mesurée par l'aire  $A_1$  .....

$$A_1 = - \int_{t_1}^{t_2} dW_r \cdot dt.$$

b) Lorsque le niveau d'énergie remonte de  $W_{r2}$  à  $W_{r3}$ , le « générateur d'énergie » fournit au « récepteur d'action » la quantité d'action  $A_2$ .

## 11) LES RECEPTEURS D'ACTION ET LA TECHNOLOGIE.

1. La notion de récepteur d'action permet d'observer d'un point de vue nouveau (?) la structure profonde et la nécessité technologique de maints dispositifs utilisés depuis l'Antiquité, ou bien développés depuis l'essor des sciences modernes.

Le caractère commun à ces dispositifs est leur indéniable utilité. Cette utilité apparaît dès que l'on réfléchit aux détails de la construction et au « produit technologique ». Par exemple, le maintien d'un potentiel ou la réduction de la perte de potentiel sont obtenus par les ailes de l'avion, la dérive d'un bateau à voile, le ski nautique, le parachute remorqué, l'ancre flottante ; l'aileron arrière des voitures de course qui force les pneus à s'aplatir sur le sol par l'effet même du « vent de la vitesse », c'est aussi un récepteur d'action, qui offre une portance négative en échange d'une perte de puissance motrice.

2. Outre leurs conditions de fonctionnement, les récepteurs d'action sont soumis à des règles spécifiques comme, par exemple, celles qui touchent à leur vieillissement : ainsi, l'action :  $A = W_r \times t$  s'attaque à la solidité de leur dispositif mécanique. Les vibrations et d'autres effets peuvent provenir des fluctuations de  $W_r$ . Les échanges d'énergie et, surtout, la dispersion de l'énergie perdue nécessitent souvent une adaptation particulière de la structure. Il est clair que le technicien ne dissocie pas l'étude statique de l'étude dynamique de chaque attelage.

3. On peut remarquer que beaucoup de récepteurs d'action sont dotés de symétrie : ils sont arrangés par paires ou constitués d'une association de deux moitiés, tandis que les récepteurs d'énergie ont le plus souvent une structure dissymétrique. D'autres récepteurs d'action sont réalisés de manière à opposer des travaux fictifs. C'est le cas du modèle didactique proposé précédemment ; du frein de PRONY ; à la place d'une symétrie des structures, on y trouve la symétrie des couples de forces appliquées. C'est aussi le cas de l'hélicoptère en vol stationnaire, où la manœuvre de pilotage consiste à mettre en opposition deux sortes de travaux fictifs :

- d'une part, celui du poids de l'appareil et celui de la force engendrée par l'hélice principale ;
- d'autre part, celui de la réaction de la carcasse à l'action de l'hélice principale et celui de la poussée de l'hélice stabilisatrice située à l'arrière du fuselage.

4. Ajoutons que l'on peut classer parmi les récepteurs d'action des appareils d'une ancienneté aussi respectable que le régulateur de WATT (\*), mais également tous les interrupteurs à force centrifuge de diverses machines tournantes.

12) Une réflexion particulière doit être accordée au simple fil que la statique a rendu quasiment immatériel, sans élasticité et sans raideur, dans une bonne part des phénomènes qu'elle envisage ; ou encore tendu en « chaînette » immobile, dans d'autres phénomènes. Toutes les hypothèses simplificatrices qui s'y rapportent sont effacées lorsqu'on a affaire au cordage réel, à la

---

(\*) NOTA : La puissance motrice de la machine, dont une très faible partie est prélevée pour assurer la rotation du dispositif à boules du régulateur, entretient l'écartement de celles-ci et, par suite, l'altitude du coulisseau centré sur l'arbre ; une tige liée au coulisseau permet de commander la constance de la puissance motrice de façon automatique.

remorque énorme (\*) qui attelle, au remorqueur de haute mer tirant de toute sa puissance, le pétrolier géant. En généralisant, il apparaît que tout lien de traction, tout élément matériel « travaillant » à la compression, bref toute chaîne de molécules transmettant un travail mécanique constitue en soi un « récepteur d'action ».

A côté de ces moyens matériels destinés à la transmission de mouvements de translation, on reconnaît également l'existence d'une énergie  $W_r$ , fonction de la puissance mise en jeu, dans tous les arbres des attelages mécaniques tournants : la preuve en est fournie par la conception même des torsiomètres, grâce auxquels on déduit la valeur de la puissance fournie au récepteur d'énergie par la déformation d'une génératrice de l'arbre cylindrique qui l'entraîne ; tout arbre tournant est donc un « récepteur d'actions » ayant comme « produit technologique » le couple qui constitue sa charge mécanique.

### 13) GENERALISATION DE LA NOTION D'ACTION.

1. Les effets du « produit d'une énergie par un temps » apparaissent dans des phénomènes qu'on n'a pas l'habitude de rapprocher. Prenons quelques exemples dans la métallurgie. L'opération de recuit consiste à maintenir un métal ou un alliage solide à une température déterminée par l'expérience, et à lui assurer ainsi une énergie thermique constante pendant la durée de temps nécessaire à l'évolution du solide vers l'homogénéité. On sait que, s'il s'agit d'un métal pur, le recuit, en supprimant les tensions internes, le rend neuf pour de futurs usages. Le recuit des alliages en rétablissant leur homogénéité les rend propres à subir divers traitements thermiques. Or, ceux-ci sont également des « actions ». Limitées dans le temps, les trempes causent des transformations solides : l'énergie thermique initiale au lieu de s'évacuer totalement du métal se métamorphose en partie en une « énergie potentielle élastique » appliquée aux constituants de l'alliage et se manifeste à l'échelle des ions et de leurs arrangements cristallins. L'existence même des courbes T.T.T. (Transformations - Température - Temps) est une confirmation de l'appartenance du phénomène de la trempe à la famille des phénomènes causés par des « actions ».

On peut aller plus loin en constatant que la présence d'une telle énergie potentielle et le déroulement du temps créent la

---

(\*) NOTA : Le remorqueur, le bâtiment remorqué, et la remorque constituent un attelage où la flèche de la remorque est une fonction de la puissance fournie par l'hélice du premier. Simple récepteur d'action par temps calme, la remorque devient par gros temps un oscillateur aux à-coups très redoutables.

trempe par vieillissement des duralumins ; on retrouve encore l' « action » dans les traitements de surface par défilement : une source chaude, faite d'un chalumeau, et une source froide, faite d'une buse d'arrosage, défilent à vitesse constante sur une surface plane à traiter.

2. On pourrait aisément trouver d'autres exemples d'action. Citons seulement le nettoyage des cristaux de semi-conducteurs par la concentration des impuretés dans une zone chauffée et leur migration au fur et à mesure que la zone chauffée avance vers une extrémité que l'on tronçonne par la suite.

3. La chimie, enfin, utilise l' « action », produit de l'énergie thermique et du temps, dans la marche vers l'équilibre de mélanges d'Acides et d'Alcools : notons que la question se complique très vite par l'évolution même des concentrations des produits et des premiers corps mis en présence les uns des autres, au fur et à mesure de l'avance du phénomène d'estérification. En s'imposant aux corps en présence, l' « action », dans ce cas typique, a pour effet de modifier à chaque instant le « récepteur d'action » lui-même.

P. GOURMELON,

(*Lycée Les Eucalyptus - Nice*).

P.S. — L'auteur remercie très vivement M. FLEURY et M. MARTINAND de lui avoir permis d'apporter à ce texte d'indispensables retouches. La modernité de certains aspects du sujet s'entrechoquent avec l'ancienneté des concepts qu'il a fallu réajuster pour relier des phénomènes très divers, ces lignes ne sont rien d'autre qu'une invitation à la réflexion ; et l'auteur, conscient de n'avoir pu ni tout dire ni tout bien dire, accepte volontiers les critiques des collègues.

---

## ANNEXE I

LE CONCEPT DE « RECEPTEUR D'ACTION »  
ET L'EQUATION AUX DIMENSIONS

1. On sait combien l'équation aux dimensions est sacrée pour le physicien.

Soit un fil conducteur d'une bobine inductive, ayant une résistance  $R$  et une inductance  $L$ . Le passage d'un courant continu  $I$  engendre un champ magnétique constant dont l'énergie est déterminée par la relation :

$$W = \frac{1}{2} L I^2.$$

La puissance électrique qui traverse le fil et s'y dépense sous forme calorifique entretient la constance de cette énergie  $W$ . La puissance absorbée est égale à la puissance perdue :  $P_a = P_p$ . Comme  $P_p = R I^2$ , on aboutit à la relation :

$$W = \frac{1}{2} \frac{L}{R} \times P_a$$

qui est de la forme :

$$W_r = k \times P_g$$

... avec les notations antérieures (§ 4).

2. La même expression peut être appliquée à tout fil conducteur et à son environnement magnétique. Le dispositif de l'expérience de CÆRSTED apparaît ainsi comme un « récepteur d'action ». L'histoire de toutes les inventions, qui ont précédé l'avènement des machines tournantes de GRAMME, est remplie de récepteurs d'action auxquels on tâchait de rendre l'équilibre impossible, grâce à des artifices de commutation qui les transformaient en récepteurs d'énergie plus ou moins boîteux (\*).

3. L'expression de l'énergie en fonction de la puissance fait apparaître  $\frac{L}{2R}$  comme un temps. C'est une « constante de

temps », qui intervient dans l'établissement du régime stationnaire, mais qui n'a plus ce caractère au cours de celui-ci. Il semble préférable d'y voir un simple « coefficient de performance ». On a en effet :

$P_a$  = Grandeur causale,

$W$  = Grandeur induite,

$R$  et  $L$  sont des grandeurs paramétriques qui définissent le cuivre, le fer et l'arrangement de la bobine inductive.

P. G.

---

(\*) NOTA : On se souviendra des efforts qui ont commencé aussitôt après les inventions d'AMPÈRE et la mise au point des électro-aimants puissants par ses successeurs et ceux de FARADAY : Moteur de HENRY (1831) ; de DAL NEGRO (Padoue) (1833) ; de PAGE (1834) ; de BOURBOUZE (moteur à balancier animé par 4 E.A.) ; de FROMENT (moteur à commutateur et à armatures tournantes) ; de JACOBI (moteur à commutateurs, et à E.A. fixes et mobiles) ; de PACINOTTI (1861) prédécesseur immédiat de GRAMME. Un autre exemple de récepteur d'action transformé par un commutateur alternatif est le très curieux « électromoteur » capillaire de LIPPMANN ; assemblage de 2 pistons à tubes capillaires placés dans un bac à eau acidulée et plongés dans des vases à mercure, c'est un bel exemple d'ingéniosité, pratiquement oublié malgré l'énigme que pose sa réversibilité.

## ANNEXE II

REMARQUES SUR LE « RECEPTEUR D'ACTION »  
ET LA TENSION MUSCULAIRE

1. Le biceps est un muscle dont le fonctionnement en tension statique fournit un bon exemple de récepteur d'action. Chaque fois que son activité sert à maintenir une charge sans qu'elle ne monte ni ne descende, son travail est nul aux yeux du physicien ; et tous comprennent que le langage du physicien engendre alors un paradoxe :

1° « Fatigue et travail sont effet et cause.

2° Il est difficile d'admettre que, chez toute personne en état de santé normale, le travail soit la cause directe d'une fatigue, et que la fatigue puisse être la conséquence d'un travail nul. »

Si dans un muscle la fatigue apparaît, il convient d'en définir la cause. Le langage courant utilise le mot « effort ». Nous pouvons donc dire que l'effort est le produit technologique créé par les échanges de puissance qui se produisent dans les tissus musculaires : chaque fibre reçoit du flot sanguin et tire de sa propre énergie interne une puissance chimique ; cette puissance chimique est dégradée et se transforme partiellement en puissance thermique. L'acide lactique et l'acide carbonique sont les fruits de la dégradation chimique ; l'échauffement du muscle accompagne leur synthèse (voir fig. 4).

2. Soit  $P_g$  la puissance chimique fournie à un instant donné à l'ensemble des fibres agissantes du biceps. Soit  $\|\vec{T}\|$  la valeur de la tension exercée par ce muscle sur le tendon qui le lie à l'avant-bras. On a :

$$\|\vec{T}\| = k_0 \times P_g.$$

Ce coefficient  $k_0$  ne peut guère être détaillé sans une description de chaque situation. Cependant, on peut tenter de faire apparaître l'action exercée sur la charge elle-même sous la forme :

$$A = k \times P_g \times t.$$

Alors que  $k_0$  apparaît comme un coefficient technologique, le facteur  $k$  prend la forme d'un coefficient de performance.

$P_g$  est indispensable au maintien de  $\|\vec{T}\|$  à sa valeur actuelle ; l'action  $A$  lorsque le temps s'écoule devient :

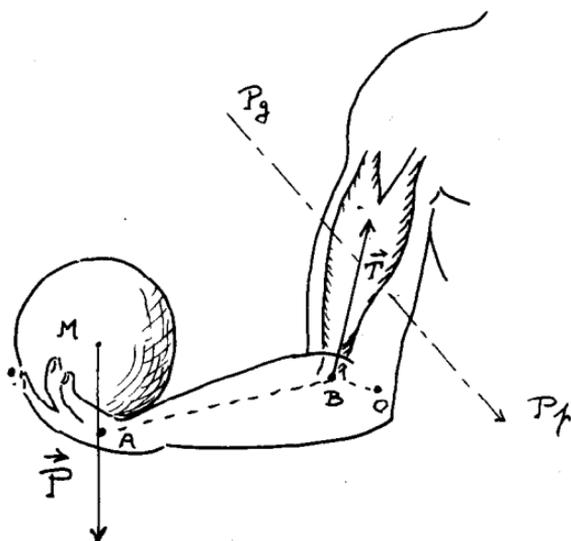


Fig. 4. — Tension musculaire du biceps entretenue par la puissance fournie  $P_g$ .

Le biceps est un récepteur d'action tant que la masse  $M$  est en équilibre statique.

$$A = \int_0^t k P_g dt.$$

Le coefficient de performance  $k$  n'est pas une constante. La fatigue le fait varier : l'accumulation de l'acide lactique dans les tissus musculaires semble la cause la plus claire de cette fatigue. Malgré la dilatation des vaisseaux sanguins qui apportent le glucose et l'oxygène des hématies et augmentent ainsi la valeur de  $P_g$ , le difficile drainage de l'acide lactique installe la fatigue et ne permet plus de conserver le produit  $[k P_g]$  à une valeur constante ; le régime d'équilibre statique de la tension, de la charge et du poids de l'avant-bras ne peut plus se maintenir.

Ces remarques permettent d'effacer le paradoxe énoncé plus haut : « La fatigue est causée par la tension musculaire, que l'effet de cette tension engendre, ou non, un travail ».

De nombreux exercices de gymnastique dits « de force » sont basés sur une telle situation : agrès, figures statiques de danse, etc.

La relation entre le poids des objets manipulés et les efforts à faire pour y parvenir demandent que l'on examine quelque peu,

pour la didactique des Sciences physiques, ce que signifie leur lourdeur. En effet, la notion de lourdeur reste trop souvent une notion primitive inexprimée.

### 3. NOTION DE LOURDEUR.

3.1. La « *lourdeur* » est une notion intuitive qui se définit en Physiologie.

— La *lourdeur* est la perception que l'esprit reçoit d'un poids soulevé ; cette perception est transmise par les muscles et le squelette sous forme de signaux.

— La fidélité des signaux ne permet pas de définir une relation simple entre la *lourdeur* et la force exercée par la charge : elle est, en effet, très médiocre et elle varie, d'une part, selon la charge ; d'autre part, selon la fatigue ; enfin, selon l'entraînement du sujet.

3.2. La *lourdeur* est une « *grandeur physiologique* ». Son unité de mesure, définie par convention strictement arbitraire, est le « V E G ».

— Le « V E G » est la *lourdeur* d'une charge de 100 gp, soit pratiquement 1 newton.

3.3. Les études des *lourdeurs* ont été effectuées selon les méthodes de la physiologie, méthodes qui comprennent des relevés et une recherche d'équation significative.

— On a tenté de retrouver la loi expérimentale de WEBER (\*) : « *La sensation suit une loi logarithmique quand la stimulation suit une loi linéaire* ». Réf. : Etudes de HARPER et STEVENS (1948) - Etudes de GUILFORD et DINGMAN (1954).

— L'estimation d'un poids passe par sa *lourdeur* : c'est une appréciation de la puissance  $P_g$  à fournir au système musculaire concerné pour qu'il maintienne ce poids en équilibre, appréciation qui tient compte du facteur de performance défini précédemment.

4. Ces remarques permettent de faire la liaison entre la connaissance intuitive de la valeur d'un poids soulevé à une hauteur constante et présentant une certaine *lourdeur*, et la connaissance expérimentale par les moyens de la Physique.

---

(\*) NOTA : La loi de WEBER apparaît, en physique, à la naissance du Bel et du déciBel, ainsi que du Savart, en Acoustique. Rappelons que la loi de WEBER est parfois désignée comme loi de WEBER-FECHNER.

Elles permettent de préparer une réponse capable de satisfaire la raison de l'élève qui ne voudrait pas admettre que son corps ne travaille pas lorsqu'il se suspend à un agrès de gymnastique et qu'un haltérophile ne fait rien tandis qu'il retient sa charge levée à bout de bras.

P. G.

---

## SOLUTION DE L'INTERLUDE N° 1

1) On appelle poids apparent de la machine d'Atwood la valeur de  $T$ .

$$T = 4 \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} g ; \text{ ce résultat est pertinent avec :}$$

$$T = f(m_1, m_2, g) = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} g \cdot \varphi\left(\frac{m_1}{m_2}\right)$$

avec :

$$\varphi(x) = \varphi\left(\frac{1}{x}\right) \text{ et } \varphi(1) = 4(*) \text{ et } \varphi(0) = 4 = \varphi(\infty)(**).$$

Il se retrouve aisément :  $T = m_1(\gamma + g) + m_2(g - \gamma)$   
avec :

$$\gamma = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} g.$$

2) Nous venons de trouver que dans un champ de pesanteur  $g$  (ou dans un champ apparent vertical  $g_{app}$ ), la machine

d'Atwood se comporte comme une masse  $m_2 * m_1 = 4 \frac{m_2 m_1}{m_1 + m_2}$ .

L'inertie qui s'oppose à  $m_5$  est donc :  $m_4 * [m_3 * (m_2 * m_1)]$ .  
Donc :

$$\gamma = \frac{m_5 - m_4 * m_3 * m_2 * m_1}{m_5 + m_4 * m_3 * m_2 * m_1}$$

avec :

$$m_4 * m_3 * m_2 * m_1 = \frac{4^3 m_1 m_2 m_3 m_4}{4^2 m_1 m_2 m_3 + 4 m_1 m_2 m_4 + m_3 m_4 (m_1 + m_2)}$$

Dans le cas  $m_1 = m_2 = m$   $m_3 = 2m$   $m_4 = 4m$ , on retrouve bien  $8m$ .

---

## SOLUTION DE L'INTERLUDE N° 2

— En moyenne, le pendule ne tombe pas :  $\bar{T}_y - mg = 0$   
(et  $\bar{T}_x = 0$ ).

— On en déduit que :  $\bar{T} > mg$  car  $T > T_y$ ; donc la masse  $m_1$  ne saurait rééquilibrer en moyenne la masse  $m_2$  qui se balance :  $m_1$  va monter, tandis que  $m_2$  va descendre *en moyenne*.

---

## SOLUTION DE L'INTERLUDE N° 3

C'est une question à poser après l'étude de la masse volumique : comme on flotte tout juste :  $\mu \sim 1 \text{ g.cm}^{-3}$ . Donc un homme de 70 kg a un volume de 70 litres.

En général, les élèves répondent beaucoup plus. Rares sont ceux qui choisissent la première réponse : moins de 0,1 m<sup>3</sup>.

Sans en avoir fait une étude sérieuse, je pense qu'il y a 2 raisons à cela :

- 1) Poser la question en m<sup>3</sup> plutôt qu'en litres, conduit à penser en mètres et, du fait de la répugnance aux petits nombres, à surévaluer le résultat. Ce d'autant plus que :
  - 2) La réponse spontanée est celle du volume du « cercueil » minimum, c'est-à-dire longueur de pieds  $\times$  largeur d'épaules  $\times$  hauteur  $\simeq 30 \times 50 \times 170 \text{ cm}^3 = 0,255 \text{ m}^3$ , réponse confortée par la quasi impossibilité de s'enfermer dans une boîte de  $10 \times 40 \times 170 \text{ cm}^3$ .
- 

---

(\*)  $\varphi(1) = 4$  car  $T = 2mg$  dans ce cas.

(\*\*)  $\varphi(0) = 4$  car alors  $\gamma \simeq g$  donc  $T \equiv 2m_1(g + \gamma) \simeq 4m_1g$ .