

UNIVERSITE de ROUEN - S.C.U.R.I.F.F.

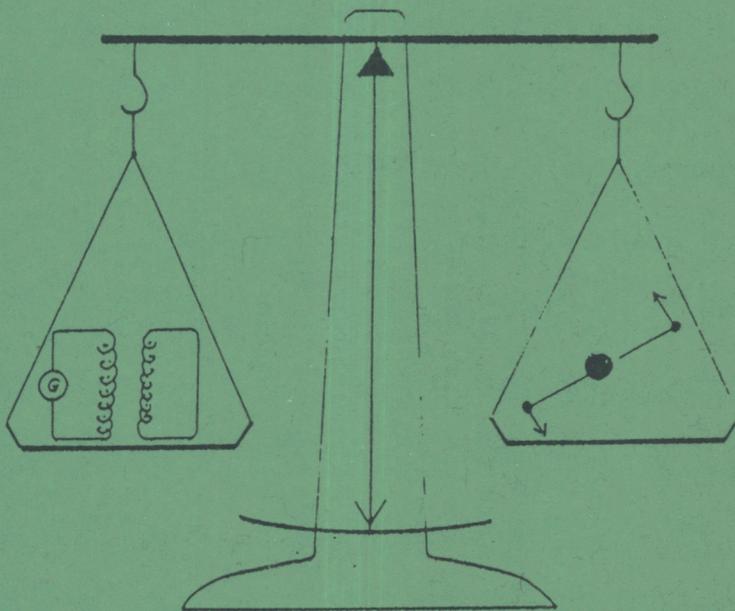
IREM de ROUEN

1, rue Thomas Becket 76130 Mont-Saint-Aignan tél: 35 14 61 41

L'ANALOGIE EN PHYSIQUE

TOME II

ASPECT INTERDISCIPLINAIRE ET PEDAGOGIQUE



RAPPORT DU GROUPE "SCIENCES PHYSIQUES"

IREM de ROUEN - BP 153 , 76135 Mont-Saint-Aignan Cedex

UNIVERSITÉ DE ROUEN
Institut de Recherche sur l'Enseignement des Mathématiques
1 rue Thomas Becket 76130 MONT SAINT AIGNAN
Tél : 35 14 61 41

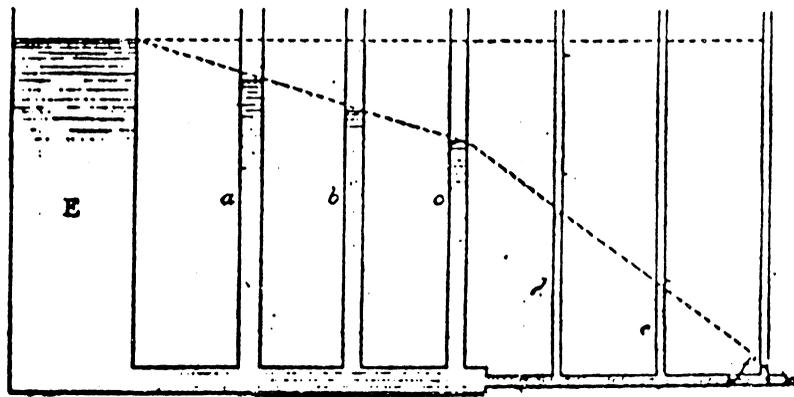
TOME II

ASPECT INTERDISCIPLINAIRE ET PEDAGOGIQUE

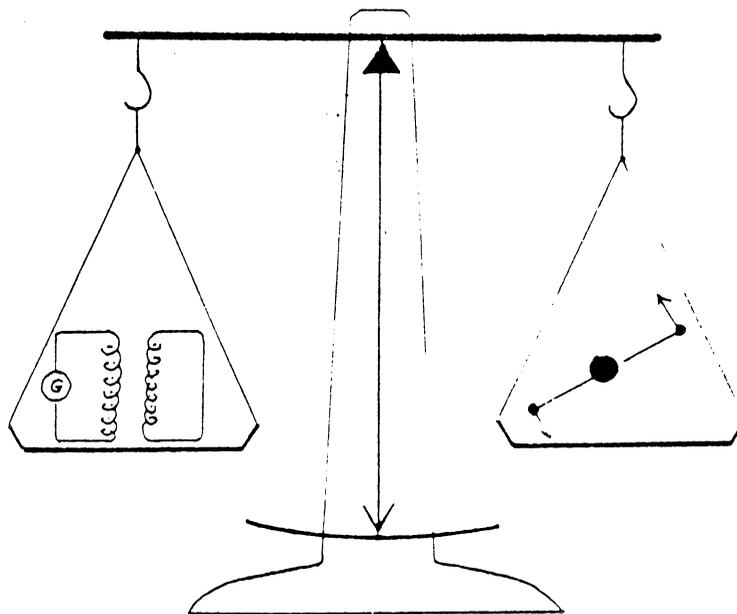
RAPPORT DU GROUPE "SCIENCES-PHYSIQUES" - IREM DE ROUEN
B.P. 153, 76135 Mont-Saint-Aignan Cedex

SOMMAIRE

Introduction générale au tome II.	page	3
L'analogie au carrefour des disciplines		
<i>(Nicole Chaumat, Colette Etasse)</i>	page	7
Etude	page	9
Bibliographie.....	page	23
Annexes.....	page	25
L'analogie dans les manuels de physique de l'enseignement secondaire de 1883 à 1914		
<i>(Josette Hauchemaille, Monique Lobry)</i>	page	31
Etude	page	35
Bibliographie.....	page	59
L'analogie : outil pédagogique contemporain		
Propagation des ondes <i>(Colette Etasse)</i>	page	63
Acide / Base; Complexe / Accepteur; Oxydant / Réducteur <i>(Josette Hauchemaille)</i>	page	71
Lois de conservation <i>(Bruno Maheu)</i>	page	87
Applications actuelles : éléments de calculateur analogique		
<i>(Bruno Jech)</i>		
Etude	page	97
Bibliographie.....	page	112



INTRODUCTION



L'ANALOGIE EN PHYSIQUE

INTRODUCTION AU TOME II

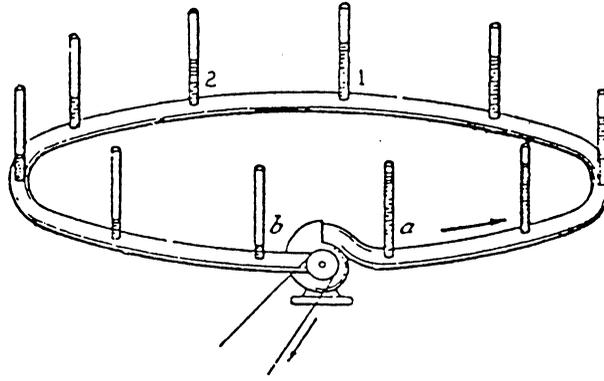
Les analogies, tout le monde en fait et les utilise sans le savoir. C'est une évidence ou un lieu commun, comme on voudra. Mais que des professeurs de Sciences Physiques se mettent en tête d'analyser ce que recouvre ce terme pourra paraître téméraire ou pédant. Ne pensant être ni l'Un ni l'Autre, nous accueillerons avec beaucoup d'enthousiasme ceux qui voudront bien nous aider à combler les omissions et à rectifier les quelques "bourdes" qui jalonnent inévitablement une telle entreprise.

Que les collègues de Lettres Classiques et de Philosophie qui nous ont si volontiers aidés à démarrer ce travail soient ici chaleureusement remerciés.

Nous espérons qu'ils ne frémiront pas trop en voyant comment nous avons interprété leurs interventions.

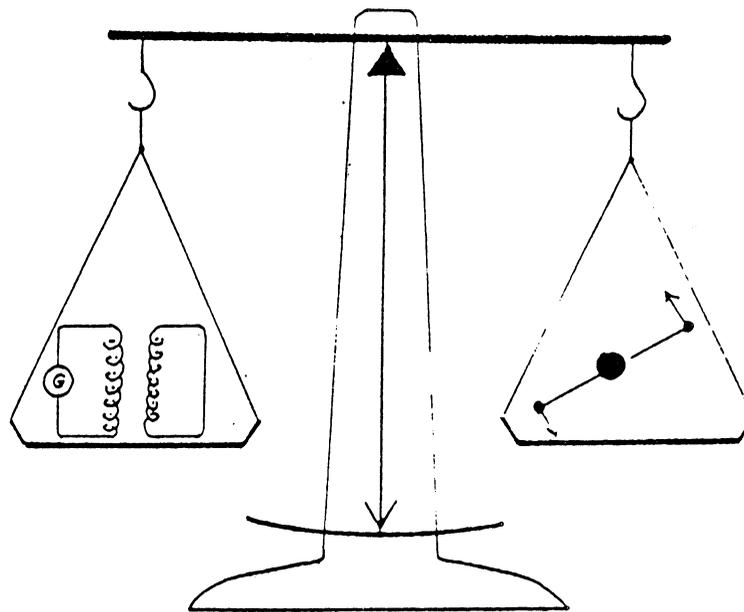
Ont participé aux travaux du groupe "Sciences Physiques" de l'IREM de ROUEN :

Nicole	CHAUMAT
Colette	ETASSE
Josette	HAUCHEMAILLE
Bruno	JECH
Monique	LOBRY
Bruno	MAHEU



Une pompe centrifuge qui produit une circulation continue d'eau, est assimilable à un électromoteur.

ANALOGIE AU CARREFOUR DES DISCIPLINES



ANALOGIE AU CARREFOUR DES DISCIPLINES

N. Chaumat - C. Etasse

Il ne s'agit ici ni d'écrire l'histoire de l'analogie, ni même d'approcher l'ensemble des significations et des utilisations actuelles du terme -- travail qui a déjà été fait et bien fait [7] -- mais de poser très succinctement quelques jalons dans ce vaste domaine.

Parmi les concepts interdisciplinaires qui facilitent la circulation des idées d'un domaine à l'autre, l'analogie est le plus omniprésent. Elle joue un rôle considérable car c'est l'un des modes de raisonnement les plus spontanés. On peut relever son emploi en pédagogie, en linguistique, en logique, en ontologie, en biologie... Toutefois, nous ne prêtons plus aujourd'hui à l'analogie autant de pouvoirs que lui accordait le XIX^{ème} siècle où l'on voit, par exemple, toutes les classifications d'histoire naturelle placées sous son signe.

A) Origine du mot analogie

L'étymologie grecque donne deux orientations

- * *analogia* :
 - proportion mathématique, employé par Platon et Aristote.
 - correspondance.

- * *analogon* :
 - rapport.
 - proportion, terme de géométrie.

Au sens général, c'est un rapport de ressemblance qui ne semble pas dû au hasard. Ce rapport peut être établi entre deux ou plusieurs choses, concrètes ou abstraites, ou entre des objets, des mots ou des personnes (souvent avec un complément indiquant la nature de la ressemblance). Il y a entre chaque terme du rapport une analogie des caractères communs, ces termes restant essentiellement différents. L'analogie se fonde sur des ressemblances qui paraissent significatives.

Du fait de la richesse de ses significations, le mot grec n'a pas son "analogue" en français.

B) Evolution du sens du mot dans le langage courant

Une première explication est celle que l'on trouve en ouvrant un dictionnaire Larousse [6] .

Analogie (à quelque chose) se dit de ce qui offre de la ressemblance avec quelque chose d'autre.

"C'est une aventure analogue à celle qui m'est arrivée".

---> synonyme : *comparable, pareil, semblable*.

"Je remplace certains mots par d'autres mots de consonance voisine et de sens analogue". (G. DUHAMEL)

---> synonyme : *voisin*.

"J'ai à son égard des sentiments analogues aux vôtres".

---> synonyme : *proche de* et contraire : *opposé*.

C) Mots voisins [6], [11]

Un certain nombre de mots, de sens voisin peuvent être rassemblés en deux groupes qui complètent ou introduisent des nuances.

a - rapport, correspondance, convenance

Le rapport établit une liaison d'ordre souvent mathématique entre choses qui sont ou semblent différentes.

La correspondance est un rapport de corrélation et de réciprocité.

La convenance est un rapport entre choses "qui vont bien ensemble".

b - conformité, ressemblance, similitude

L'analogie porte sur des rapprochements significatifs.

C'est une ressemblance partielle qui suggère une ressemblance cachée, plus complète.

"On lui avait plutôt répété qu'il se conduisait comme un manche ou qu'il avait des analogies avec la Lune" (R. QUENEAU).

" Les deux organisations présentent une analogie de structure".

La ressemblance peut être superficielle. La similitude est une ressemblance de contours, de cadres (triangles semblables). La conformité est une ressemblance plus intérieure et moins brutale : conformité de goûts, de pensées.

I. EVOLUTION ET USAGE DANS LES LANGAGES SPECIFIQUES

"LITTERAIRES ET SCIENCES HUMAINES"

A) En linguistique et grammaire

Plus une grammaire est "régulière", plus l'analogie est en jeu car celui qui parle n'a qu'à suivre les modèles donnés par les "règles de grammaire".

Le procédé analogique est donc dans une large mesure un facteur de conservation. Mais c'est aussi un facteur d'innovation, lorsque l'esprit, méconnaissant l'existence d'une forme aberrante, ("les exceptions qui confirment la règle") y substitue une forme nouvelle créée sur le modèle d'une autre forme.

Ainsi [6], lorsqu'un enfant, prenant pour modèle " *j'éteindrai, éteindre* " dit, à l'infinitif " *viendre* " au lieu de *venir* (à cause de " *je viendrai* "), ou encore lorsque sur le modèle de " *je finirai, finir* ", il dit au futur " *je venirai* ", au lieu de " *je viendrai* " (à cause de *venir*), il fait dans les 2 cas, une création analogique. Il y a beaucoup de créations analogiques qui n'aboutissent pas, parce que l'usage les rejette (aspect conservation); mais l'usage en admet constamment aussi, plus ou moins, (aspect innovation), si bien que l'analogie est un des procédés les plus actifs de l'évolution des grammaires.

Dans l'histoire de la grammaire ancienne, on a donné le nom d'analogistes, aux philosophes, grammairiens et écrivains qui, dans la déclinaison, la conjugaison, et la formation des mots n'admettaient que l'analogie et repoussaient toute anomalie, c'est-à-dire, toute exception (ex : grammaires d'Alexandrie, de Jules César à Rome). Ils étaient opposés aux anomalistes (les stoïciens grecs, les grammairiens de l'école de Pergame, et Cicéron à Rome).

Le concept d'analogie explique la réorganisation des systèmes linguistiques bouleversés par l'effet aveugle des lois phonétiques. (Par exemple, *clou* donne *cloutier*, créé sur le modèle de *pot* qui donne *potier*)

B) En littérature

On peut distinguer 2 aspects : l'aspect formel où l'analogie entraîne l'utilisation de différentes figures telles que les images, les métaphores et l'aspect "référentiel" comme la poésie "symboliste" (Baudelaire, Rimbaud...) qui postule des *correspondances* [2] (annexe 2).

La métaphore est le transfert à une chose d'un nom qui en désigne une autre. Elle permet d'établir des comparaisons entre signifiant et signifié. Dans l'exemple :

"bergère ô tour Eiffel le troupeau des ponts bêle ce matin "

[1] (APOLLINAIRE Alcools - Zone - voir annexe 1), la correspondance s'établit entre

bergère	<--->	troupeau	: les signifiants
et			
tour	<--->	ponts	: les signifiés

On appelle "*rapport d'analogie*", tous les cas où le deuxième terme ("tour") est au premier ("bergère") ce que le quatrième ("ponts") est au troisième ("troupeau").

Autre exemple, le poète pourra dire du *soir* que c'est

"*la vieillesse du jour*" et de la *vieillesse* que c'est

"*le soir de la vie*" car il y a le même rapport entre

la *vieillesse* et la *vie*
qu'entre
le *soir* et le *jour*

On retrouve les propriétés mathématiques des proportions

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} : \text{le produit des extrêmes } a.d \text{ est égal au produit des moyens } b.c$$

C) En philosophie

L'analogie est le fondement d'un grand nombre de raisonnements philosophiques. C'est par elle que notre pensée et notre sentiment atteignent ce que certains philosophes déclarent inaccessible : les causes premières et les causes finales. Ainsi, l'une des premières applications de l'analogie à des considérations cosmologiques, se trouve-t-elle chez Platon.

Si l'Être et le Monde s'opposent comme *réalité* et *apparence*, la *Vérité de l'Être* et *l'Ordre des Apparences* se correspondent analogiquement [10].

L'analogie fonctionne terme à terme entre le public et le privé:

la *tête* est à *l'homme*
ce que
le *gouvernement* est à *la cité*.

A la limite, l'abrégé métaphorique serait

"L'*Homme* est une *cité*"
ou
"la *cité* est un *Homme*".

Dans le langage courant, il est fréquent d'entendre parler du "*gouvernement* qui est à la *tête* d'un pays".

Un des exemples les plus riches de cette dialectique se manifeste dans l'Allégorie de la Caverne. [8] (PLATON La République livre VII)

Il reproduit à plusieurs niveaux le rapport entre l'apparence et la réalité. La première étape concerne

les *reflets dans la caverne* qui sont aux *figurines*,
ce que
les *figurines* sont aux *réalités*.

(Les niveaux suivants peuvent être retrouvés dans l'extrait du livre VII mis en annexe 3).

Le lien entre les deux lignes, le médiateur, peut être l'objet lui-même d'une correspondance analogique.

Ce médiateur "lumière" qui permet d'obtenir les ombres est l'analogue de l'Idée du Bien ou "lumière première" qui permet d'accéder à la connaissance. Le médiateur met en évidence la notion de participation, source même de tradition de l'analogie.

La contestation de la participation par Aristote, sera une source de renouvellement.

La signification de l'Être n'est pas unique mais multiple. L'Être est à la fois divers et unifié; il s'est différencié d'une réalisation primordiale par des degrés successifs.

On retrouve bien, chez les Anciens, le double aspect conservateur et innovateur de l'analogie. Pour les hommes de la Renaissance, l'analogie ne fait que traduire la nature des choses et matérialiser le parallélisme fondamental du macrocosme et du microcosme.

Kant [5] dans "Critique de la raison pure" parle des analogies qui, a priori, intéressent plus les physiciens. Ce sont "les analogies de l'expérience".

"Ces principes ont ceci de particulier qu'ils ne concernent pas les phénomènes et la synthèse de leur intuition empirique, mais simplement l'existence et leur rapport réciproques relativement à cette existence".

"Une analogie de l'expérience ne sera donc qu'une règle suivant laquelle l'unité de l'expérience doit résulter des perceptions et elle s'appliquera aux objets (aux phénomènes) non comme un principe constitutif, mais simplement comme un principe régulateur".

Pour d'autres philosophes, l'analogie est d'ordre ontologique. En permettant d'atteindre ou d'approcher "l'inaccessible", ce sera le domaine de la théologie (Dieu fait homme, ou l'homme à l'image de Dieu) et ce pourra être un stimulant de recherche scientifique vers de nouveaux champs de connaissance.

D) Dans les domaines socio-éthico-juridiques

Coutumes, lois, justice sociale et égalité relèvent de l'analogie dans un aspect proportion c'est-à-dire portion donc partage [10]. Tous les être humains sont égaux mais pas semblables. Cette égalité obtenue par une démarche analogique respecte donc les différences, l'identité de chacun.

Le partage d'un territoire, c'est-à-dire d'un espace social, ne relève pas seulement d'une considération quantitative et mathématique de division mais introduit l'analogie par le reçu d'une juste part et de la réciprocité. Tout autre acte accompli par un sujet vis-à-vis d'autres implique l'autorisation virtuelle d'un acte analogue entre les mêmes sujets qui, par hypothèse, auraient interverti leur rôle.

E) En histoire

L'intervention de l'analogie dans le raisonnement historique peut prendre les formes les plus diverses : elle peut conduire à interpréter le présent en fonction du passé, à projeter le présent sur le passé ou un passé sur un autre passé, à établir des parallèles entre le rythme de l'Histoire et celui de la végétation, de la biologie, des modèles mécaniques, à suggérer des positions politiques, à élaborer les hypothèses les plus valides à côté d'élucubrations pseudo-scientifiques aberrantes.

II. UTILISATION DE LA DEMARCHE ANALOGIQUE EN SCIENCES

Du point de vue plus strictement scientifique et d'une manière plus précise, on considère que des systèmes de *catégories différentes*, représentables par des *équations fermées* et déterminées par des conditions initiales et aux limites ayant les mêmes formulations, sont analogues.

Le cheminement de l'invention et la circulation interdisciplinaire des concepts sont si étroitement associés à l'analogie, qu'il est impossible de les dissocier.

Arbitrairement on classera les analogies du domaine scientifique en deux catégories : celles où elles ne sont que similitudes et celles où elles sont source de progrès.

A) En sciences, l'analogie peut être similitude

En mathématiques l'analogie est parfois employée comme synonyme de :

*** proportion**

C'est alors l'identité des rapports :

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad \text{ce que } a \text{ est à } b, c \text{ l'est à } d$$

*** similitude, homothétie**

La *similitude géométrique* de deux figures est réalisée lorsque ces dernières ne diffèrent l'une de l'autre que par leurs échelles de longueurs. (triangles semblables, relevés et cartes topographiques). L'homothétie, cas particulier de la similitude est aussi une analogie.

A la jonction des mathématiques et de la physique, la *similitude mathématique* est utilisée pour des systèmes dont les équations sont identiques : leurs solutions sont alors les mêmes en termes non dimensionnels.

Les longueurs, les temps, les masses seront respectivement rapportés à des longueurs, temps, masses de référence caractéristiques des phénomènes. Par exemple, pour étudier l'écoulement de l'air autour d'avions géométriquement semblables, on rapportera les longueurs à la corde de l'aile, les temps à la durée du parcours de l'avion sur cette longueur, les masses à celle du fluide ambiant. Les équations auront alors les mêmes termes affectés de coefficients sans dimension, appelés *paramètres de similitude*, qui auront des valeurs numériques propres à chaque système.

En mécanique, les systèmes sont en *similitude dynamique* lorsqu'il y a *identité du rapport* qui unit les *termes homologues* comme les forces, les trajectoires...

Pour de tels systèmes, il n'est pas indispensable d'exprimer les équations pour trouver les paramètres de similitude; ceux-ci peuvent être obtenus par *l'analyse dimensionnelle*.

En effet, toutes les lois physiques devant pouvoir s'exprimer sous une forme indépendante des unités de mesures employées, il suffit de choisir (convenablement) les grandeurs régissant la catégorie considérée de systèmes et leurs combinaisons constituant les paramètres de similitude.

Dans l'exemple de l'étude de l'écoulement de l'air autour d'avions géométriquement semblables, les grandeurs régissantes sont les coefficients de viscosité cinématique ν , la vitesse d'écoulement V et le diamètre d dont le rapport

$$N = \frac{Vd}{\nu} \quad \text{constitue le paramètre de similitude de Reynolds [3].}$$

Ainsi, lorsque les techniques de calcul ne permettent pas d'obtenir les solutions complètes des équations, lorsque l'élaboration de théories nécessitent des vérifications expérimentales, des essais empiriques peuvent être pratiqués.

Le comportement d'une catégorie de phénomènes se déduit de l'un d'entre eux par des considérations de similitude.

Des essais sur maquette, en soufflerie et sur prototypes permettent ainsi de prévoir le comportement des avions pour lesquels les conditions de similitude sont réalisées.

De même, les constructions de barrages, de jetées de port ne sont entreprises qu'après étude de "modèles réduits", l'apprentissage et le perfectionnement du pilotage des pétroliers se fait en bassins avec des modèles miniatures.

Peu de domaines échappent à l'essai en similitude : la météorologie y recourt pour répondre aux questions des archéologues : un des derniers exemples est l'étude des dépôts de sédiments de la grotte de Tautavel. Là, sur une maquette au 1/5000^{ème} de la vallée et de la grotte, immergée dans une veine hydraulique, l'eau a simulé l'air [9].

La pensée analogique, riche en procédés de tous ordres pour détecter les ressemblances entre deux objets ou systèmes perçus comme différents, forme un grand ensemble complexe au sein duquel le raisonnement par analogie, la similitude, la métaphore, ou des figures de rhétorique telles que la catachrèse (1), constituent des cas particuliers. Réduire l'analogie à ces cas particuliers est aussi aberrant que de la réduire aux systèmes de relations symboliques du Moyen-Age et de la Renaissance, et qui, pendant plus d'un millénaire, structurèrent les travaux de l'esprit.

L'analogie, en sciences, est donc similitude mais sans y être réduite car, même ainsi, elle permet de progresser en répondant à des problèmes posés.

B) L'analogie est progrès

"Ainsi le mathématicien lorsqu'il extrapole par analogie s'expose à voir les faits lui donner un démenti, mais le risque ainsi couru ne saurait lui interdire cette forme d'exploration pourvu que la logique ne perde jamais ses droits.

L'exploration analogique conduit du reste dans certains domaines à des perspectives d'ensemble dont l'harmonie constitue un élément essentiel de la beauté des mathématiques." (R. DELTHEIL [4])

"L'analogie fonctionne dans le discours de création; elle est toujours un moment dans beaucoup de démarches intellectuelles ou poétiques, un moment qui est voué à la dissolution." (A. LICHNEROWICZ [7]).

- (1) **Catachrèse** : métaphore dans laquelle il y a "abus", un mot étant employé au-delà de son sens strict.
"Les pieds d'une table", "à cheval sur un mur", et pourquoi pas "à cheval sur les principes".

Le raisonnement par analogie, qui consiste à conclure de la ressemblance de certains objets à quelques égards à leur ressemblance à d'autres égards n'intervient pas comme instrument de démonstration. Mais son rôle est immense en tant qu'"*instrument de découverte orientant le chercheur vers la question de savoir précisément, dans l'analogie observée, la part des éléments de ressemblance et la part des éléments de dissemblance.*" (R. DELTHEIL [4])

L'histoire des Sciences et techniques fournit de nombreux exemples de progrès importants réalisés grâce à la constatation d'analogies suggestives entre des faits paraissant jusque là complètement indépendants. C'est ainsi que Képler a pu déduire les lois du mouvement des planètes des observations de Tycho-Brahé en rapprochant ces observations des propriétés géométriques de l'ellipse étudiées par les Grecs anciens.

Etablir de tels rapprochements est le propre même du génie de la découverte, et l'objet d'une forme d'intuition de première importance, *l'intuition analogique*.

C'est ainsi que de nombreux problèmes de géométrie du tétraèdre sont tout à fait analogues aux problèmes correspondants de la géométrie du triangle. Mais cette analogie devient trompeuse dès que les trois dimensions de l'espace interviennent plus profondément : deux trièdres de mêmes angles sont nécessairement égaux, ce qui n'est pas le cas de deux triangles semblables.

L'histoire des mathématiques a enregistré les vains efforts inspirés par l'intuition analogique aux algébristes du XVIII^{ème} siècle et à Lagrange en vue de résoudre des équations entières de degré quelconque par des formules littérales généralisant celles devenues classiques pour les équations du second degré.

L'analogie fonctionne dans la recherche (intuition et extrapolation en mathématiques comme en physique) mais aussi en communication (partir du connu pour approcher l'inconnu).

L'histoire des sciences, toujours elle, foisonne d'exemples.

* Huygens a trouvé son inspiration dans l'analogie :

Il doit au parallèle **son-lumière**, la notion d'onde lumineuse, et au rapprochement **corps chaud-corps électrisé**, le moyen d'exprimer des lois relatives à deux objets physiques différents par deux groupes d'équations semblables.

* Maxwell a utilisé l'analogie **chaleur-travail** pour ses théories en physique statistique.

* D'autres exemples sont analysés en détail dans les autres chapitres de cette publication.

L'image du "fluide", la mécanique du fluide étant connue, fut appliquée à la chaleur, à l'électricité. Cette image a fini par se dissoudre au sein de ses propres limites en montrant qu'elle ne pouvait pas rendre compte pleinement des phénomènes qu'elle visait à décrire en première approximation.

"En fait, on ne se dégage jamais de l'analogie..."

Prenons l'exemple des particules élémentaires de la physique. La particule la plus élémentaire que nous connaissions est l'électron. On se l'est représenté, depuis les modèles planétaires de Bohr en 1914, comme cette boule électrisée tournant sur elle-même et tournant autour d'un noyau. Nous avons acquis peu à peu le fait que cette image est complètement fautive parce qu'elle conduit à des conclusions fausses. L'électron est devenu essentiellement non imaginable dans notre espace et notre temps quotidiens mais représenté par un réseau de structures mathématiques avec lesquelles on fonctionne très bien. Tout physicien conserve cette image heuristique de l'électron avec le fait qu'il sait très bien qu'elle est trompeuse mais l'imagination physique ne supporte pas d'avoir un monde totalement désincarné." (A. LICHNEROWICZ [7])

Dans un autre exemple, les lois de Kirchoff, (ces lois qui permettent, dans un réseau électrique, de calculer les intensités et les tensions), c'est l'inverse qui s'est produit. Des lois électriques, elles sont devenues, les lois de tout réseau quel que soit ce qui circule dedans, que ce soit un réseau chimique en physiologie, que ce soit, un réseau de trafic d'automobiles, ces lois sont toujours les mêmes et ce sont les lois d'un réseau abstrait.

D'avoir établi une correspondance entre les valeurs de grandeurs physiques de nature différente, caractérisant deux sortes de phénomènes peut permettre la résolution, par des procédés physiques connus, de problèmes concernant un autre problème. Ainsi la correspondance entre le potentiel dans certains domaines physiques et le potentiel électrique a permis la résolution, par des procédés électriques, des problèmes d'hydrodynamique ou d'aérodynamique.

Il existe aussi une analogie entre la répartition des lignes de courant d'un fluide, sans frottement, autour d'un corps de forme donnée et la répartition des lignes de courant électrique dans un milieu conducteur autour d'un corps non conducteur de même forme.

Il existe aussi dans l'écoulement d'un fluide des analogies partielles, dites analogies de Reynolds, entre le transport de la matière, celui de la chaleur et celui de la quantité de mouvement.

On voit comment deux utilisations de l'analogie ont pu être efficaces dans des directions complètement différentes mais complémentaires.

CONCLUSION

Même si la liste des erreurs scientifiques dues à l'usage imprudent de l'analogie est longue, ces échecs étant dus, dans la plupart des cas à une méconnaissance des trois niveaux : invention, preuve et exposition, l'analogie reste un puissant outil de progrès qui n'a rien perdu ni de sa force ni de son actualité.

Si on n'en était pas convaincu, il suffirait de suivre les travaux actuels des physiciens pour établir la théorie GU (Grand Unifié) dans laquelle l'infiniment grand et l'infiniment petit seraient régis par une loi unique.

Qu'elle soit correspondance ou proportion, différence dans la ressemblance ou ressemblance dans la différence, l'analogie est une dynamique qui oscille en permanence de l'Un à l'Autre. (si on peut se permettre ainsi une ultime et bien piètre "analogie")

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **APOLLINAIRE** : Alcools - Choix de poèmes
- [2] **BAUDELAIRE** : Les fleurs du mal
- [3] **BRUHAT** : Cours de physique générale
Mécanique (Notions de dynamique des fluides) - Masson
- [4] **DELTHEIL** : Les grands courants de la pensée
mathématique
- [5] **KANT** : Critique de la raison pure
Traduction française de
A. Tremmeraygues et B. Pacaud.
Bibliothèque de philosophie
contemporaine P.U.F.
- [6] **LAROUSSE** : Encyclopédie
- [7] **LICHNEROWICZ , PERROUX, GADORFF.**
: Recherches interdisciplinaires
Analogies et connaissances
Tome I : aspects historiques
Tome II : De la poésie à la science
- [8] **PLATON** : La République
Traduction par R.Baccou- Flammarion
- [9] **POUR LA SCIENCE** : N° 142 Avril 1989
Le climat à Tautavel p 9 à11
- [10] **SECRETAN** : L'analogie
Que-sais-je? n° 2165 - P.U.F.
- [11] **UNIVERSALIS** : Encyclopédie

ANNEXES

- 1** **APOLLINAIRE** : Zone
- 2** **BAUDELAIRE** : Correspondances
- 3** **PLATON** : La République - livre VII

1 - APOLLINAIRE

alcools

ZONE

A LA FIN tu es las de ce monde ancien

Bergère ô tour Eiffel le troupeau des ponts bêle ce matin

Tu en as assez de vivre dans l'antiquité grecque et romaine

Ici même les automobiles ont l'air d'être anciennes
La religion seule est restée toute neuve la religion
Est restée simple comme les hangars de Port-Aviation

Seul en Europe tu n'es pas antique ô Christianisme
L'Européen le plus moderne c'est vous Pape Pie X
Et toi que les fenêtres observent la honte te retient
D'entrer dans une église et de t'y confesser ce matin
Tu lis les prospectus les catalogues les affiches qui chantent tout haut
Voilà la poésie ce matin et pour la prose il y a les journaux
Il y a les livraisons à 25 centimes pleines d'aventures policières
Portraits des grands hommes et mille titres divers

J'ai vu ce matin une jolie rue dont j'ai oublié le nom
Neuve et propre du soleil elle était le clairon
Les directeurs les ouvriers et les belles sténo-dactylographes
Du lundi matin au samedi soir quatre fois par jour y passent
Le matin par trois fois la sirène y gémit

2 - CHARLES BAUDELAIRE

Les fleurs du mal

ÉDITION ÉTABLIE SELON UN ORDRE NOUVEAU,
PRÉSENTÉE ET ANNOTÉE
PAR YVES FLORENNE

PRÉFACE DE MARIE-JEANNE DURRY

16

Les Fleurs du mal

IV

CORRESPONDANCES

La Nature est un temple où de vivants piliers
Laisser parfois sortir de confuses paroles;
L'homme y passe à travers des forêts de symboles
Qui l'observent avec des regards familiers.

Comme de longs échos qui de loin se confondent
Dans une ténébreuse et profonde unité,
Vaste comme la nuit et comme la clarté,
Les parfums, les couleurs et les sons se répondent.

Il est des parfums frais comme des chairs d'enfants,
Doux comme les hautbois, verts comme les prairies
— Et d'autres, corrompus, riches et triomphants.

Ayant l'expansion des choses infinies,
Comme l'ambre, le musc, le benjoin et l'encens,
Qui chantent les transports de l'esprit et des sens.

3 - PLATON

LA RÉPUBLIQUE

Maintenant, repris-je, représente-toi de la façon que voici l'état de notre nature relativement à l'instruction et à l'ignorance. Figure-toi des hommes dans une demeure souterraine, en forme de caverne, ayant sur toute sa largeur une entrée ouverte à la lumière; ces hommes sont là depuis leur enfance, les jambes et le cou enchaînés, de sorte qu'ils ne peuvent bouger ni voir ailleurs que devant eux, la chaîne les empêchant de tourner la tête; la lumière leur vient d'un feu allumé sur une hauteur, au loin derrière eux; entre le feu et les prisonniers passe une route élevée: imagine que le long de cette route est construit un petit mur, pareil aux cloisons que les montreurs de marionnettes dressent devant eux, et au-dessus desquelles ils font voir leurs merveilles¹⁵².

Je vois cela, dit-il.

Figure-toi maintenant le long de ce petit mur des hommes portant des objets de toute sorte, qui dépassent le mur, et des statuettes d'hommes et d'animaux, en pierre, en bois, et en toute espèce de matière¹⁵³; naturellement, parmi ces porteurs, les uns parlent et les autres se taisent. Voilà, s'écria-t-il, un étrange tableau et d'étranges prisonniers.

Ils nous ressemblent¹⁵⁷, répondis-je; et d'abord, penses-tu que dans une telle situation ils aient jamais vu autre chose d'eux-mêmes et de leurs voisins que les ombres projetées par le feu sur la paroi de la caverne qui leur fait face?

Et comment? observa-t-il, s'ils sont forcés de rester la tête immobile durant toute leur vie?

Et pour les objets qui défilent, n'en est-il pas de même? Sans contredit.

Si donc ils pouvaient s'entretenir ensemble ne penses-tu pas qu'ils prendraient pour des objets réels les ombres qu'ils verraient¹⁵⁴?

Il y a nécessité.

Et si la paroi du fond de la prison avait un écho, chaque

fois que l'un des porteurs parlerait, croiraient-ils entendre autre chose que l'ombre qui passerait devant eux?

Non, par Zeus, dit-il.

Assurément, repris-je, de tels hommes n'attribueront de réalité qu'aux ombres des objets fabriqués.

C'est de toute nécessité.

Considère maintenant ce qui leur arrivera naturellement si on les délivre de leurs chaînes et qu'on les guérisse de leur ignorance. Qu'on détache l'un de ces prisonniers, qu'on le force à se dresser immédiatement, à tourner le cou, à marcher, à lever les yeux vers la lumière: en faisant tous ces mouvements il souffrira, et l'éblouissement l'empêchera de distinguer ces objets dont tout à l'heure il voyait les ombres. Que crois-tu donc qu'il répondra si quelqu'un lui vient dire qu'il n'a vu jusqu'alors que de vains fantômes, mais qu'à présent, plus près de la réalité et tourné vers des objets plus réels, il voit plus juste? si, enfin, en lui montrant chacune des choses qui passent, on l'oblige, à force de questions, à dire ce que c'est? Ne penses-tu pas qu'il sera embarrassé, et que les ombres qu'il voyait tout à l'heure lui paraîtront plus vraies que les objets qu'on lui montre maintenant?

Beaucoup plus vraies, reconnut-il.

Et si on le force à regarder la lumière elle-même, ses yeux n'en seront-ils pas blessés? n'en fuira-t-il pas la vue pour retourner aux choses qu'il peut regarder, et ne croira-t-il pas que ces dernières sont réellement plus distinctes que celles qu'on lui montre?

Assurément.

Et si, repris-je, on l'arrache de sa caverne par force, qu'on lui fasse gravir la montée rude et escarpée, et qu'on ne le lâche pas avant de l'avoir entraîné jusqu'à la lumière du soleil, ne souffrira-t-il pas vivement, et ne se plaindra-t-il pas de ces violences? Et lorsqu'il sera parvenu à la lumière, pourra-t-il, les yeux tout éblouis par son éclat, distinguer une seule des choses que maintenant nous appelons vraies?

Il ne le pourra pas, répondit-il; du moins dès l'abord.

Il aura, je pense, besoin d'habitude pour voir les objets de la région supérieure. D'abord ce seront les ombres qu'il distinguera le plus facilement, puis les images des hommes et des autres objets qui se reflètent dans les eaux, ensuite les objets eux-mêmes. Après cela, il pourra affronter la clarté des astres et de la lune, contempler plus facilement pendant la nuit les corps célestes et le ciel: lui-même, que pendant le jour le soleil et sa lumière.

Sans doute.

A la fin, j'imagine, ce sera le soleil — non ses vaines images réfléchies dans les eaux ou en quelque autre endroit — mais le soleil lui-même à sa vraie place, qu'il pourra voir et contempler tel qu'il est.

Nécessairement, dit-il.

Après cela il en viendra à conclure au sujet du soleil, que c'est lui qui fait les saisons et les années, qui gouverne tout dans le monde visible, et qui, d'une certaine manière, est la cause de tout ce qu'il voyait avec ses compagnons dans la caverne¹⁵⁸.

Évidemment, c'est à cette conclusion qu'il arrivera.

Or donc, se souvenant de sa première demeure, de la sagesse que l'on y professe, et de ceux qui y furent ses compagnons de captivité, ne crois-tu pas qu'il se réjouira du changement et plaindra ces derniers?

Si, certes.

Et s'ils se décernaient alors entre eux honneurs et louanges, s'ils avaient des récompenses pour celui qui saisissait de l'œil le plus vif le passage des ombres, qui se rappelait le mieux celles qui avaient coutume de venir les premières ou les dernières, ou de marcher ensemble, et qui par là était le plus habile à deviner leur apparition¹⁵⁹, penses-tu que notre homme fût jaloux de ces distinctions, et qu'il portât envie à ceux qui, parmi les prisonniers, sont honorés et puissants? Ou bien, comme le héros d'Homère¹⁶¹, ne préférera-t-il pas mille fois n'être qu'un valet de charrette, au service d'un pauvre laboureur, et souffrir tout au monde plutôt que de revenir à ses anciennes illusions et de vivre comme il vivait?

Je suis de ton avis, dit-il; il préférera tout souffrir plutôt que de vivre de cette façon-là.

Imagine encore que cet homme redescende dans la caverne et aille s'asseoir à son ancienne place: n'aura-t-il pas les yeux aveuglés par les ténèbres en venant brusquement du plein soleil?

Assurément si, dit-il.

Et s'il lui faut entrer de nouveau en compétition, pour juger ces ombres, avec les prisonniers qui n'ont point quitté leurs chaînes, dans le moment où sa vue est encore confuse et avant que ses yeux se soient remis (or l'accoutumance à l'obscurité demandera un temps assez long), n'apprétera-t-il pas à rire à ses dépens¹⁶², et ne diront-ils pas qu'étant allé là-haut il en est revenu avec la vue ruinée, de sorte que ce n'est même pas la peine d'essayer d'y monter? Et si quelqu'un tente de les délier et de les conduire en haut, et qu'ils le puissent tenir en leurs mains et tuer, ne le tuent-ils pas¹⁶³?

Sans aucun doute, répondit-il.

Maintenant, mon cher Glaucon, repris-je, il faut appliquer point par point cette image à ce que nous avons dit plus haut, comparer le monde que nous découvrons la vue au séjour de la prison, et la lumière du feu qui l'éclaire à la puissance du soleil. Quant à la montée dans la région supérieure et à la contemplation de ses objets, si tu la considères comme l'ascension de l'âme vers le lieu intelli-

LA RÉPUBLIQUE VII 517b-518c

gible, tu ne te tromperas pas sur ma pensée, puisque aussi bien tu désires la connaître. Dieu sait si elle est vraie. Pour moi, telle est mon opinion : dans le monde intelligible l'idée du bien est perçue la dernière et avec peine, mais on ne la peut percevoir sans conclure qu'elle est la cause de tout ce qu'il y a de droit et de beau en toutes choses; qu'elle a, dans le monde visible, engendré la lumière et le souverain de la lumière¹⁶¹; que, dans le monde intelligible, c'est elle-même qui est souveraine et dispense la vérité et l'intelligence; et qu'il faut la voir pour se conduire avec sagesse dans la vie privée et dans la vie publique.

Je partage ton opinion, dit-il, autant que je le puis.

Eh bien! partage-la encore sur ce point, et ne t'étonne pas que ceux qui se sont élevés à ces hauteurs ne veuillent plus s'occuper des affaires humaines, et que leurs âmes aspirent sans cesse à demeurer là-haut. Cela est bien naturel si notre allégorie est exacte.

C'est, en effet, bien naturel, dit-il.

Mais quoi? penses-tu qu'il soit étonnant qu'un homme qui passe des contemplations divines aux misérables choses humaines ait mauvaise grâce et paraisse tout à fait ridicule, lorsque, ayant encore la vue troublée et n'étant pas suffisamment accoutumé aux ténèbres environnantes, il est obligé d'entrer en dispute, devant les tribunaux ou ailleurs, sur des ombres de justice ou sur les images qui projettent ces ombres, et de combattre les interprétations qu'en donnent ceux qui n'ont jamais vu la justice elle-même¹⁶²?

Il n'y a là rien d'étonnant.

En effet, repris-je, un homme sensé se rappellera que les yeux peuvent être troublés de deux manières et par deux causes opposées : par le passage de la lumière à l'obscurité, et par celui de l'obscurité à la lumière; et, ayant réfléchi qu'il en est de même pour l'âme, quand il en verra une troublée et embarrassée pour discerner certains objets, il n'en rira pas sottement, mais examinera plutôt si, venant d'une vie plus lumineuse, elle est, faute d'habitude, offusquée par les ténèbres, ou si passant de l'ignorance à la lumière, elle est éblouie de son trop vif éclat; dans le premier cas il l'estimera heureuse en raison de ce qu'elle éprouve et de la vie qu'elle mène; dans le second, il la plaindra, et s'il voulait rire à ses dépens, ses moqueries seraient moins ridicules que si elles s'adressaient à l'âme qui redescend du séjour de la lumière¹⁶³.

C'est parler, dit-il, avec beaucoup de sagesse.

Il nous faut donc, si tout cela est vrai, en conclure ceci : l'éducation n'est point ce que certains proclament qu'elle est : car ils prétendent l'introduire dans l'âme, où elle n'est point, comme on donnerait la vue à des yeux aveugles¹⁶⁴.

Ils le prétendent, en effet.

Or, repris-je, le présent discours montre que chacun possède la faculté d'apprendre et l'organe destiné à cet usage, et que, semblable à des yeux qui ne pourraient se tourner qu'avec le corps tout entier des ténèbres vers la lumière, cet organe doit aussi se détourner avec l'âme tout entière de ce qui naît, jusqu'à ce qu'il devienne capable de supporter la vue de l'être et de ce qu'il y a de plus lumineux dans l'être; et cela nous l'appelons le bien, n'est-ce pas?

Oui.

L'éducation est donc l'art qui se propose ce but, la conversion de l'âme, et qui recherche les moyens les plus aisés et les plus efficaces de l'opérer; elle ne consiste pas à donner la vue à l'organe de l'âme, puisqu'il l'a déjà; mais comme il est mal tourné et ne regardé pas où il faudrait, elle s'efforce de l'amener dans la bonne direction.

Il le semble, dit-il.

Maintenant, les autres vertus, appelées vertus de l'âme, paraissent bien se rapprocher de celles du corps — car, en réalité, quand on ne les a pas tout d'abord, on les peut acquérir dans la suite par l'habitude et l'exercice¹⁶⁵; mais la vertu de science appartient très probablement à quelque chose de plus divin¹⁶⁶, qui ne perd jamais sa force, et qui, selon la direction qu'on lui donne, devient utile et avantageux ou inutile et nuisible. N'as-tu pas encore

remarqué, au sujet des gens que l'on dit méchants mais habiles, combien perçants sont les yeux de leur misérable petite âme, et avec quelle acuité ils discernent les objets vers lesquels ils se tournent? Leur âme n'a donc pas une vue faible, mais comme elle est contrainte de servir leur malice, plus sa vue est perçante, plus elle fait de mal. Cette remarque est tout à fait juste, dit-il.

Et cependant, poursuivis-je, si de pareils naturels étaient émondés dès l'enfance, et que l'on coupât les excroissances de la famille du devenir, comparables à des masses de plomb, qui s'y développent par l'effet de la gourmandise, des plaisirs et des appétits de ce genre, et qui tournent la vue de l'âme vers le bas; si, libérés de ce poids, ils étaient tournés vers la vérité, ces mêmes naturels la verraient avec la plus grande netteté, comme ils voient les objets vers lesquels ils sont maintenant tournés.

C'est vraisemblable, reconnut-il.

Mais quoi! n'est-il pas également vraisemblable, et nécessaire d'après ce que nous avons dit, que ni les gens sans éducation et sans connaissance de la vérité, ni ceux qu'on laisse passer toute leur vie dans l'étude, ne sont propres au gouvernement de la cité, les uns parce qu'ils n'ont aucun but fixe auquel ils puissent rapporter tout ce qu'ils font dans la vie privée ou dans la vie publique, les autres parce qu'ils ne consentiront point à s'en charger, se croyant déjà transportés de leur vivant dans les îles fortunées.

C'est vrai, dit-il.

Il nous incombera donc, à nous fondateurs, d'obliger les meilleurs naturels à se tourner vers cette science que nous avons reconnue tout à l'heure¹⁶⁷ comme la plus sublime, à voir le bien et à faire cette ascension; mais, après qu'ils se seront ainsi élevés et auront suffisamment contemplé le bien, gardons-nous de leur permettre ce qu'on leur permet aujourd'hui.

Quoi donc?

De rester là-haut, répondis-je, de refuser de descendre de nouveau parmi les prisonniers et de partager avec eux travaux et honneurs, quel que soit le cas qu'on en doive faire¹⁶⁸.

Hé quoi! s'écria-t-il, commettrons-nous à leur égard l'injustice de les forcer à mener une vie misérable, alors qu'ils pourraient jouir d'une condition plus heureuse?

Tu oublies encore une fois, mon ami, que la loi ne se préoccupe pas d'assurer un bonheur exceptionnel à une classe de citoyens, mais qu'elle s'efforce de réaliser le bonheur de la cité tout entière, en unissant les citoyens par la persuasion ou la contrainte, et en les amenant à se faire part les uns aux autres des avantages que chaque classe peut apporter à la communauté; et que, si elle forme de tels hommes dans la cité, ce n'est point pour les laisser libres de se tourner du côté qu'il leur plaît, mais pour les faire concourir à fortifier le lien de l'État.

C'est vrai, dit-il, je l'avais oublié.

Au reste, Glaucon, observe que nous ne serons pas coupables d'injustice envers les philosophes qui se seront formés chez nous, mais que nous aurons de justes raisons à leur donner en les forçant à se charger de la conduite et de la garde des autres. Nous leur dirons en effet : « Dans les autres cités, il est naturel que ceux qui sont devenus philosophes ne participent point aux travaux de la vie publique, puisqu'ils se sont formés eux-mêmes, malgré le gouvernement de ces cités; or il est juste que celui qui se forme soi-même et ne doit sa nourriture à personne, ne veuille en payer le prix à qui que ce soit. Mais vous, nous vous avons formés dans l'intérêt de l'État comme dans le vôtre pour être ce que sont les chefs et les rois dans les ruches; nous vous avons donné une éducation meilleure et plus parfaite que celle de ces philosophes-là, et vous avons rendus plus capables d'allier le maniement des affaires à l'étude de la philosophie¹⁶⁹. Il faut donc que vous descendiez, chacun à votre tour, dans la commune demeure, et que vous vous accoutumiez aux ténèbres qui y règnent; lorsque vous vous serez familiarisés avec elles, vous y verrez mille fois mieux que les habitants de ce séjour, et vous connaîtrez la nature de chaque image¹⁷⁰.

et de quel objet elle est l'image, parce que vous aurez contemplé en vérité le beau, le juste et le bien. Ainsi le gouvernement de cette cité qui est la vôtre et la nôtre sera une réalité et non pas un vain songe, comme celui des cités actuelles, où les chefs se battent pour des ombres et se disputent l'autorité, qu'ils regardent comme un grand bien¹⁷¹. Voici là-dessus quelle est la vérité : la cité où ceux qui doivent commander sont les moins empressés à rechercher le pouvoir, est la mieux gouvernée et la moins sujette à la sédition, et celle où les chefs sont dans des dispositions contraires se trouve elle-même dans une situation contraire. »

Parfaitement, dit-il.

Eh bien! crois-tu que nos élèves résisteront à ces raisons et refuseront de prendre part, à tour de rôle, aux labeurs de l'État, tout en passant d'ailleurs ensemble la majeure partie de leur temps dans la région de la pure lumière?

C'est impossible, répondit-il, car nos prescriptions sont justes et s'adressent à des hommes justes. Mais il est certain que chacun d'eux ne viendra au pouvoir que par nécessité, contrairement à ce que font aujourd'hui les chefs dans tous les États.

Oui, repris-je, il en est ainsi, mon camarade; si tu découvres pour ceux qui doivent commander une condition préférable au pouvoir lui-même, il te sera possible d'avoir un État bien gouverné; car dans cet État seuls commanderont ceux qui sont vraiment riches, non pas d'or, mais de cette richesse dont l'homme a besoin pour être heureux : une vie vertueuse et sage. Par contre, si les mendicants et les gens affamés de biens particuliers viennent aux affaires publiques, persuadés que c'est là qu'il faut en aller prendre, cela ne te sera pas possible; car on se bat alors pour obtenir le pouvoir, et cette guerre domestique et intestine perd et ceux qui s'y livrent et le reste de la cité¹⁷².

Rien de plus vrai, dit-il.

Or, connais-tu une autre condition que celle du vrai philosophe pour inspirer le mépris des charges publiques?

Non, par Zeus.

D'autre part, il ne faut pas que les amoureux du pouvoir lui fassent la cour, autrement il y aura des luttes entre prétendants rivaux.

Sans doute.

Par conséquent, à qui imposeras-tu la garde de la cité, sinon à ceux qui sont les plus instruits des moyens de bien gouverner un État, et qui ont d'autres honneurs et une condition préférable à celle de l'homme public?

A personne d'autre.

Veux-tu donc que nous examinions maintenant de quelle manière se formeront des hommes de ce caractère,

et comment on les fera monter vers la lumière, comme certains sont montés, dit-on, de l'Hadès au séjour des dieux¹⁷³?

Comment ne le voudrais-je pas?

Cela ne sera pas, apparemment, un simple tour de palet¹⁷⁴; il s'agira d'opérer la conversion de l'âme d'un jour aussi ténébreux que la nuit vers le jour véritable, c'est-à-dire de l'élever jusqu'à l'être; et c'est ce que nous appellerons la vraie philosophie.

Parfaitement.

Il faut donc examiner quelle est, parmi les sciences, celle qui est propre à produire cet effet.

Sans doute.

Quelle est donc, Glaucon, la science qui attire l'âme de ce qui devient vers ce qui est? Mais, en parlant, ceci me revient à l'esprit : n'avons-nous pas dit que nos philosophes devaient être dans leur jeunesse des athlètes guerriers¹⁷⁵?

Si, nous l'avons dit.

Il faut donc que la science que nous cherchons, outre ce premier avantage, en ait encore un autre.

Lequel?

Celui de ne pas être inutile à des hommes de guerre. Assurément il le faut, si la chose est possible.

Or, c'est par la gymnastique et la musique que nous les avons précédemment formés¹⁷⁶.

Oui.

Mais la gymnastique a pour objet ce qui devient et ce qui meurt, puisque c'est du développement et du dépérissement du corps qu'elle s'occupe.

Évidemment.

Elle n'est donc pas la science que nous cherchons.

Non.

Serait-ce la musique, telle que nous l'avons décrite plus haut?

Mais, répliqua-t-il, elle n'était, s'il t'en souvient, que la contrepartie de la gymnastique, formant les gardiens par l'habitude, et leur communiquant au moyen de l'harmonie un certain accord — et non la science — et une certaine eurythmie au moyen du rythme; et dans les discours ses caractères étaient semblables, qu'il s'agit de discours fabuleux ou véridiques; mais d'étude qui conduisit au but que tu te proposes maintenant, elle n'en comportait aucune¹⁷⁷.

Tu me rappelles très exactement ce que nous avons dit; en vérité, elle n'en comportait aucune. Mais alors, excellent Glaucon, quelle sera cette étude? Car les arts nous sont tous apparus comme mécaniques...

Sans doute. Mais quelle autre étude reste-t-il si nous écartons la musique, la gymnastique et les arts?

Eh bien! répondis-je, si nous ne trouvons rien à prendre hors de là, prenons quelqu'une de ces études qui s'étendent à tout.

Laquelle?

Par exemple cette étude commune, qui sert à tous les arts, à toutes les opérations de l'esprit et à toutes les sciences, et qui est une des premières auxquelles tout homme doit s'appliquer.

Laquelle? demanda-t-il.

Cette étude vulgaire qui apprend à distinguer un, deux et trois; je veux dire, en un mot, la science des nombres et du calcul; n'est-il pas vrai qu'aucun art, aucune science ne peut s'en passer?

Certes!

Ni, par conséquent, l'art de la guerre?

Il y a grande nécessité.

En vérité, Palamède¹⁷⁸, chaque fois qu'il apparaît dans les tragédies, nous présente Agamemnon sous les traits d'un fort plaisant général. Ne prétend-il pas en effet, que c'est lui, Palamède, qui, après avoir inventé les nombres, disposa l'armée en ordre de bataille devant Iliion, et fit le dénombrement des vaisseaux et de tout le reste, comme si avant lui rien de cela n'eût été dénombré et qu'Agamemnon, apparemment, ne sût pas combien de pieds il avait, puisqu'il ne savait pas compter. Quel général serait-ce là à ton avis?

Un général singulier, dit-il, si la chose était vraie.

Dès lors, repris-je, nous poserons comme nécessaire au guerrier la science du calcul et des nombres.

Elle lui est tout à fait indispensable s'il veut entendre quelque chose à l'ordonnance d'une armée, ou plutôt s'il veut être homme¹⁷⁹.

Maintenant, demandai-je, fais-tu la même remarque que moi au sujet de cette science?

Laquelle?

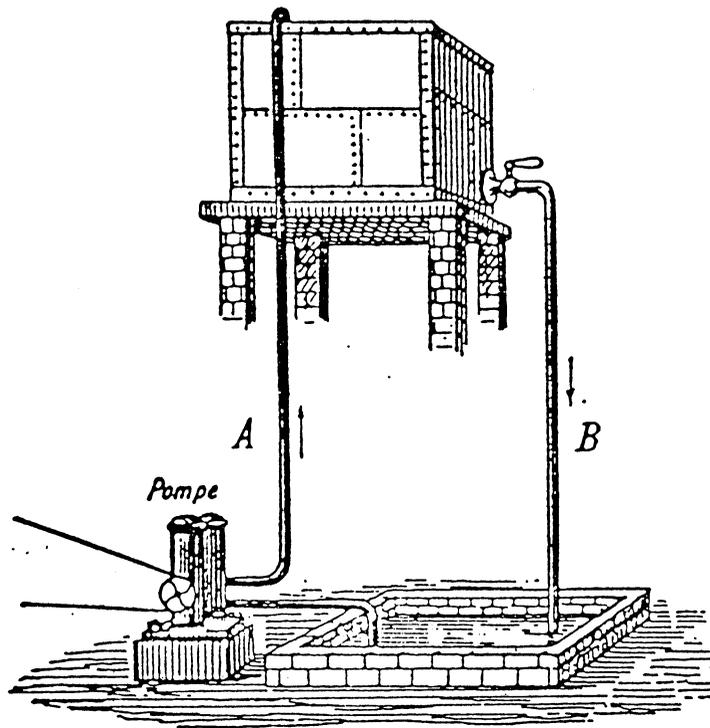
Qu'elle pourrait bien être une de ces sciences que nous cherchons et qui conduisent naturellement à la pure intelligence; mais personne n'en use comme il faudrait, quoiqu'elle soit parfaitement propre à élever jusqu'à l'être.

Que veux-tu dire?

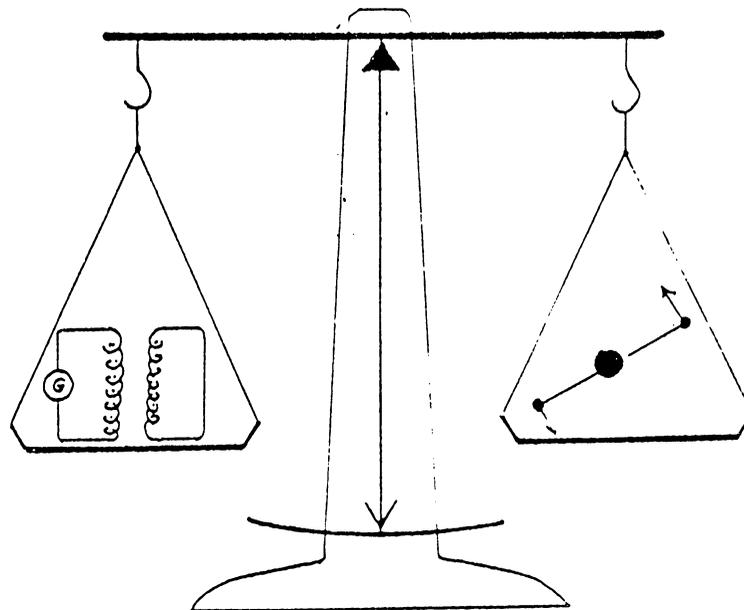
Je vais t'expliquer ma pensée; ce que je distinguerai comme propre ou non à mener au but dont nous parlons, considère-le avec moi, puis donne ou refuse ton assentiment, afin que nous puissions voir plus clairement si la chose est telle que je l'imagine.

Montre ce dont il s'agit.

Je te montrerai donc, si tu veux bien regarder, que parmi les objets de la sensation les uns n'invitent point l'esprit à l'examen, parce que les sens suffisent à en juger, tandis que les autres l'y invitent instamment, parce que la sensation, à leur sujet, ne donne rien de sain.



L'ANALOGIE DANS LES MANUELS DE PHYSIQUE
DE L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE
DE 1883 A 1914



L'ANALOGIE DANS LES MANUELS DE PHYSIQUE
DE L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE
DE 1883 A 1914

J. Hauchemaille - M. Lobry

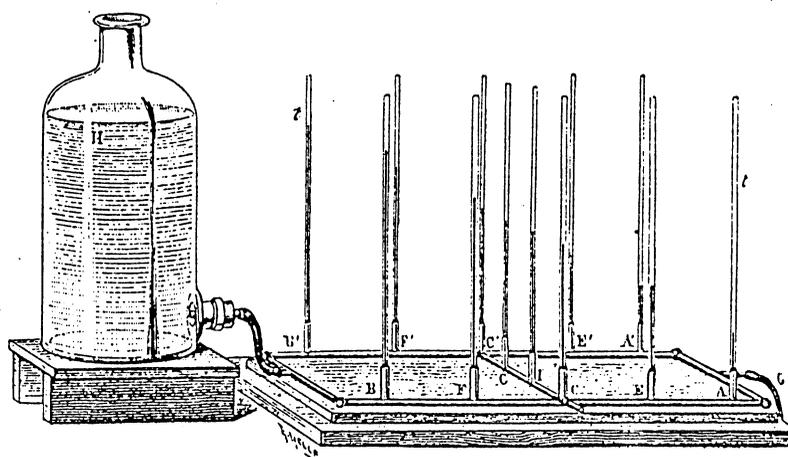


Fig. 164.

REMERCIEMENTS :

Nous tenons à remercier vivement le Directeur du Musée de l'Education de Rouen et ses collaborateurs pour la gentillesse de leur accueil et la patience avec laquelle, à de nombreuses reprises, ils ont sorti des étagères la collection des manuels de sciences physiques.

Musée National de l'Education
39 Rue Croix Vaubois
76130 Mont Saint Aignan
Tél. : 35.75.49.70

L'ANALOGIE DANS LES MANUELS DE PHYSIQUE DE L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE DE 1883 A 1914

L'article suivant va présenter une enquête sur l'utilisation de l'analogie en électricité dans les manuels scolaires du second degré entre 1883 et 1914.

Cette étude n'est pas exhaustive puisque nous nous sommes limitées à la collection de manuels du Musée de l'Education de Rouen. Deux types d'analogies des phénomènes électriques sont développées pendant toute cette période dans le but de présenter des idées nouvelles "**sous une forme très élémentaire**" : l'un avec l'hydrostatique, l'autre avec la chaleur. Une troisième analogie avec l'énergie de pesanteur permet de mathématiser les relations entre grandeurs électriques.

Cette période correspond à l'introduction des découvertes en électricité dans l'enseignement, aussi nous envisagerons successivement chaque grandeur électrique suivant son ordre d'apparition dans les livres. Pour chaque type, les analogies utilisées seront évoquées par ordre chronologique.

I. POTENTIEL

I.1 Un texte de 1883 ([11], p. 380-381), complété en 1893 ([12], p. 527), de **DRION** et **FERNET** précise les grandeurs à mettre en parallèle dans les analogies hydrauliques/thermiques des phénomènes électriques

a) Première comparaison :

<u>Echange de quantité d'électricité</u>	<-->	<u>Transport de liquide d'un réservoir dans un autre</u>
--	------	--

L'énergie mise en jeu dépend :

* De la quantité d'électricité des corps.

* De la quantité de liquide dans chaque réservoir.

* Du degré d'électrisation plus ou moins élevé auquel chacun d'eux se trouvait porté par sa charge primitive.

* De la hauteur de chute, c'est - à-dire de la différence des niveaux primitifs.

D'où l'expression, différence de niveaux électriques, par laquelle on peut représenter la différence des états électriques de divers corps mis en présence.

b) Seconde comparaison :

Echange de quantité d'électricité <--> Echange de chaleur

Cet échange met en jeu de l'énergie qui dépend :

* Des charges électriques que les corps possèdent.

* Des quantités de chaleur respectives que les deux corps contiennent.

* De la différence des états électriques.

* De la différence des températures des deux corps.

De là, l'expression, différence de températures électriques, qui caractérise la différence d'états électriques.

Ces différences d'état électrique, assimilables à des différences de niveau ou à des différences de température, constituent ce qu'on appelle des différences de potentiel.

I.2 En 1898, **DRINCOURT** utilise ces mêmes analogies pour préciser le signe des quantités d'électricité échangées et l'évolution du potentiel électrique ([9], p. 591-592) :

* De la chaleur passe du corps qui a la plus haute température sur celui qui avait la température la plus basse.

* Du liquide passe du réservoir au niveau le plus élevé dans le réservoir au niveau le plus bas.

* De l'électricité positive passe du conducteur au potentiel le plus élevé sur le conducteur au potentiel le plus bas.

La température finale commune aux deux corps est intermédiaire entre les températures initiales, le niveau final commun aux deux réservoirs est intermédiaire entre les niveaux initiaux, de même le potentiel final commun aux deux corps sera intermédiaire entre les potentiels initiaux.

I.3 En 1900, POIRE, dans un livre destiné aux écoles normales, à l'aide de schémas sur les vases communicants et de raisonnements sur les aérostats, précise la relation entre signe des charges en mouvement et potentiel ([19], p. 203-205).

Si l'eau était (fig. 148) dans les réservoirs à deux niveaux positifs différents mn et $m'n'$, quand on ouvrirait le robinet r , l'eau irait de R , où le niveau est plus élevé, vers R' où il est plus bas, jusqu'à ce que l'égalité du niveau soit établie suivant $m_1n_1m'_1n'_1$. De même, si deux conducteurs électrisés A et B sont à des niveaux électriques positifs et différents, celui de A étant plus élevé que celui de B (d'après l'indication de l'électroscope), dès qu'on les mettra en communication l'un avec l'autre, l'électricité positive ira de A vers B et l'électroscope mis en communication avec l'ensemble des deux conducteurs indiquera un niveau électrique ou potentiel intermédiaire entre ceux qu'avaient d'abord A et B .

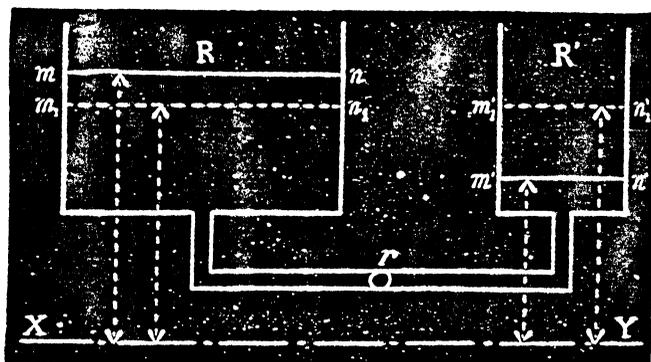


Fig. 148.

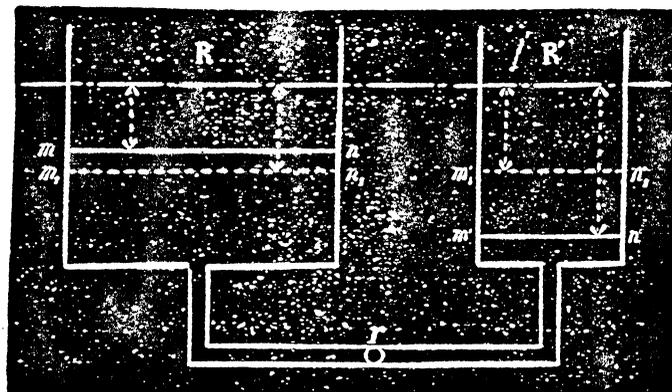


Fig. 149.

Poussons plus loin la comparaison et supposons deux réservoirs R et R' (fig. 149) dans une cave située à un niveau inférieur à celui de la mer XY . Si les niveaux en R et R' sont mn et $m'n'$, négatifs tous deux, dès qu'on ouvrira r , l'eau ira de R , où le niveau était le moins négatif, vers R' où il était le plus négatif, et un niveau commun $m_1n_1m'_1n'_1$ s'établira. De même, si l'on a deux conducteurs A et B à des potentiels négatifs, celui de B étant plus négatif que celui de A , dès qu'on les mettra en communication l'un avec l'autre, l'électricité négative ira de A vers B . On arriverait aux mêmes résultats, si l'un des niveaux était positif et l'autre négatif.

En conclusion, POIRE fait le parallélisme suivant :

- | | | |
|--|------|---|
| * L'électricité positive descend vers les potentiels les plus bas. | <--> | L'eau descend vers les niveaux les plus bas. |
| * L'électricité négative va vers les potentiels les plus élevés. | <--> | Un aérostat monte vers les niveaux les plus élevés. |

II. MESURE DU POTENTIEL

II.1 Définition du potentiel.

Très tôt (1883), on s'intéresse au problème de mesure du potentiel électrique. A partir de 1903 dans la physique de **BASIN** pour les classes de 1ère C et D ([2], p. 228) ou celle de **BOUANT** pour les Ecoles Normales ([4], p. 401) on trouve des schémas légendés : *expérience servant à définir le potentiel par l'électroscope.*

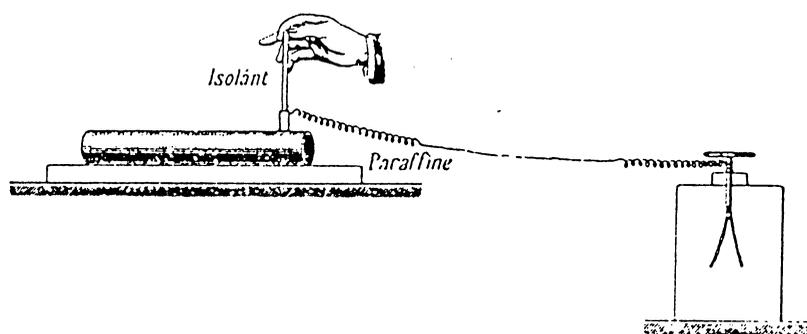


Fig. 190. — Expérience servant à définir le potentiel par l'électroscope.

En 1905, dans la Physique élémentaire de **MEYER** pour les classes de 3ème du 1ère cycle, ([18], p. 285), la mesure du potentiel permet de le définir à un niveau très élémentaire, comme le fait **DRINCOURT** (1906) ([10], p. 550) :

L'électroscope servira donc à définir numériquement le potentiel comme le thermomètre sert à définir la température.

Pour illustrer la mesure des potentiels avec des électroscopes, l'analogie thermique est utilisée dès 1883 alors que, l'analogie hydraulique citée en 1895 n'est développée qu'à partir de 1905.

II.2 Analogie thermique

En 1883, pour comparer les potentiels de deux corps électrisés on compare les charges qu'ils transmettent à une petite sphère métallique par l'intermédiaire d'un fil conducteur ; de même on compare la température de deux corps en comparant leurs actions sur un thermomètre. *Cette petite sphère remplit donc le rôle d'une sorte de thermomètre. Elle prend une certaine température électrique qui est la même pour tous les points du conducteur.* ([11], p. 381)

Le potentiel du sol égal à 0 est analogue au zéro du thermomètre.

A partir de 1898, la sphère d'épreuve est remplacée par l'électroscope à feuilles :
L'indication de l'électroscope peut être comparée à celle que donne un thermomètre mis en contact avec un corps plus ou moins chaud. ([9], p. 590)

La divergence nulle des feuilles, pour l'électroscope au contact avec le sol définit le 0 des potentiels.

Pour une mesure, la valeur du potentiel sera déterminée par l'écart des feuilles de l'électroscope préalablement étalonné, son signe sera celui de la charge prise par l'électroscope. On retrouve bien ici la correspondance charge électrique - température déjà rencontrée.

II.3 Analogie hydraulique

En 1905, MEYER donne une analogie hydraulique des mesures avec l'électroscope ([18], p. 285) :

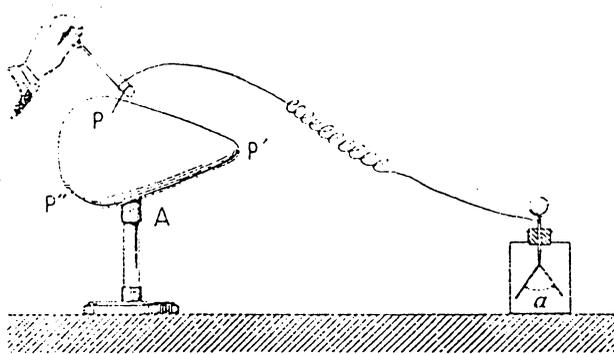


Fig. 238. — *Potentiell.* — On touche le conducteur A en P, P' ou P''. L'angle d'écart a , constant, caractérise le niveau électrique de A.

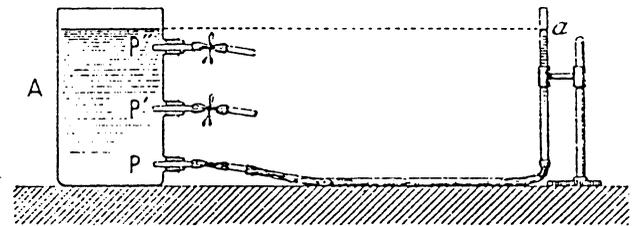


Fig. 239. — *Comparaison hydrostatique.* — On établit la communication en P, P' ou P''. Le point d'affleurement a est le même et indique le niveau de l'eau dans A.

L'indication de l'électroscope est constante lorsqu'on déplace le point de contact à la surface d'un conducteur chargé. De même, le niveau de l'eau dans la tubulure latérale reste constant lorsqu'on la met en communication, par un tube de caoutchouc, avec le réservoir en n'importe quel point de celui-ci, ce qui amène MEYER à établir les correspondances suivantes :

<i>Electrisation du conducteur</i>	<-->	<i>Eau que le vase contient</i>
<i>Fil de métal</i>	<-->	<i>Tube de caoutchouc</i>
<i>Electroscope</i>	<-->	<i>Petit tube vertical de verre</i>
<i>Divergence constante "a" des feuilles</i>	<-->	<i>Niveau constant "a" dans le tube de verre</i>

Potentiel 0, celui du sol.	<-->	Origine des niveaux, le sol.
La divergence a marqué le niveau électrique ou potentiel du conducteur	<-->	Le niveau de l'eau dans le vase est égal à la différence de niveau entre le point a et le sol.

L'analogie justifie alors l'utilisation d'un fil fin pour relier l'électroscope au corps : Le tube indicateur de niveau doit être étroit pour ne pas faire baisser le niveau primitif de l'eau dans le vase, le fil doit être fin pour que son électrisation et celle de l'électroscope ne fassent pas baisser le potentiel du conducteur.

Des dispositifs hydrostatiques semblables sont décrits dans les éditions de 1905 d'autres manuels de l'enseignement secondaire :

a) FAIVRE - DUPAIGNE (Cours de physique élémentaire 1ère C D) ([13], p. 187).

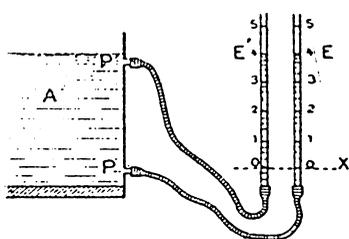


Fig. 185.

Le tube indicateur de niveau étant gradué et le 0 de cette graduation étant astreint à rester dans le plan horizontal origine, on pourra lire le niveau correspondant comme on lit sur l'électroscope gradué le potentiel d'un conducteur c'est à dire sa différence de potentiel avec le sol.

b) CHASSAGNY (Précis de physique 1ère A B C D) ([8], P. 646)

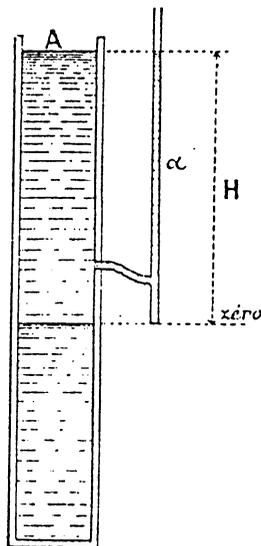


FIG. 427.

INDICATEUR DE NIVEAU.
Le niveau H dans le récipient A est proportionnel au poids p d'eau qui pénètre dans le tube étroit et cylindrique a .

Imaginons qu'il s'agisse de mesurer le niveau H auquel s'élève l'eau dans un récipient cylindrique (fig. 427). Nous pouvons, entre autres méthodes, proposer la suivante : Mettons en communication, par un tube très étroit, avec le réservoir A lui-même, un autre cylindre a , de section s très faible et dont la base se trouve à la hauteur du zéro de l'échelle des niveaux. Dans ces conditions, l'eau s'établira sensiblement dans ce cylindre étroit a au même niveau H que dans le réservoir A lui-même. Le cylindre a contiendra alors un poids d'eau $P = sH$. Si nous savons mesurer ce poids, nous aurons naturellement, puisque la section s est constante, un nombre proportionnel au niveau H lui-même.

III. CAPACITE ELECTRIQUE

Posons le problème de la quantité d'électricité emmagasinée par un corps en fonction de son potentiel.

Si, en 1895, **BRANLY** utilise une analogie thermique pour définir la capacité électrique ([6], p. 37*) : *A l'équation $Q = C\Theta$ en chaleur, où Θ désigne la température et C la valeur en eau du corps ou sa capacité calorifique, correspond en électricité $q = cv$, il utilise une analogie hydraulique pour comparer, transmission de liquide entre deux réservoirs et transmission électrique entre deux conducteurs par communication lointaine.*

Pour porter au même niveau H deux vases cylindriques de sections différentes, il faut des quantités de liquide proportionnelles aux sections des vases.

On a alors comparaison entre :

$q = cv$	<-->	$M = SH$
v potentiel	<-->	H niveau de l'eau
c capacité électrique	<-->	S section du cylindre

Cette même comparaison est reprise de façon presque identique en 1913 par **GANOT** et **MANEUVRIER** dans leur traité de physique élémentaire ([14], p. 940).

En 1898, **DRINCOURT** reprend ces deux analogies en mettant en correspondance ([4], p. 593) :

* Même quantité d'électricité ajoutée à des conducteurs différents	<-->	Même quantité de chaleur communiquée à des masses égales de plomb et de cuivre	<-->	Même quantité d'eau dans deux cylindres de sections différentes
* Elévation à des potentiels différents	<-->	Elévation de température du plomb différente de celle du cuivre	<-->	Niveau de l'eau plus élevé dans le vase étroit que dans le vase large
* Les deux conducteurs ont des capacités électriques différentes	<-->	Les deux métaux n'ont pas la même capacité calorifique	<-->	Les vases n'ont pas la même section

En 1900, pour **POIRE** : *deux corps de même poids et de nature différente, tous les deux à la même température, ne contiennent pas la même quantité de chaleur, ce que l'on exprime en disant qu'ils n'ont pas la même capacité calorifique. De même, en électricité, lorsque deux corps sont à un même potentiel, ils ne contiennent pas nécessairement la même quantité d'électricité ; ils peuvent avoir des capacités électriques différentes ([19], p. 205).*

En 1905, **MEYER** ayant mis au même potentiel deux sphères électrisées de rayons différents, mesure leur charge par le cylindre de **FARADAY** et conclut : *pour un même niveau électrique dans deux sphères, c'est la plus grande qui a le plus d'électrisation. Ce résultat est assez évident et la comparaison hydrostatique en rend compte. En prenant deux vases cylindriques, le vase ayant la plus grande base contient plus d'eau si le niveau est le même dans les deux. Le vase le plus large a une plus grande capacité ; on dit de même que la sphère de plus grand rayon a une plus grande capacité électrique. ([18], p. 291).*

L'analogie hydraulique sert donc ici à la fois à introduire la capacité électrique et à classer les capacités électriques en fonction de la taille des sphères électrisées.

*Le partage de l'électricité entre deux conducteurs en communication lointaine est évoqué en 1895 par **BRANLY** et en 1901 par **BASIN** à l'aide de l'analogie thermique et seulement en 1905 par **CHASSAGNY** à l'aide de l'analogie hydraulique.*

On trouve en 1895 ([6], p. 38*) : *prenons deux conducteurs électrisés assez distants pour ne pas exercer d'influence mutuelle, désignons leurs charges par q et q' , leurs capacités par c et c' et leurs potentiels par v et v' : les charges sont exprimées par $q=cv$, $q'=c'v'$.*

Si on les réunit par un fil long et fin, de capacité négligeable, l'égalité de potentiel s'établit entre les deux conducteurs et le fil qui ne forment plus qu'un seul conducteur, offrant une capacité $c+c'$ et ayant une charge $q+q'$; le potentiel prend une valeur v_1 intermédiaire entre v et v' .

L'équation qui donnera v_1 sera:

$$cv + c'v' = v_1(c+c')$$

$$\text{d'où } v_1 = \frac{cv + c'v'}{c + c'}$$

Cette équation exprime la constance de la charge, elle correspond à l'équation des échanges de chaleur dans le mélange de deux corps à des températures différentes.

En 1905, CHASSAGNY ([7], p. 644) imagine le dispositif schématisé ci-contre : H'' est le niveau final.

Avec les correspondances déjà évoquées ci-dessus et en ajoutant la conservation de la charge totale et celle de l'eau contenue dans les réservoirs on obtient les formules :

$$\begin{aligned} SH + S'H' &= (S + S')H'' \\ CV + C'V' &= (C + C')V'' \end{aligned}$$

totalelement semblables.

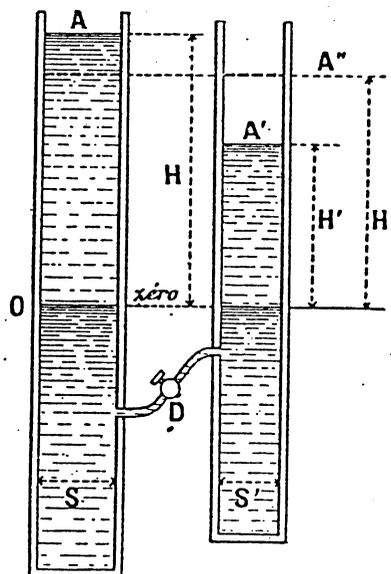


FIG. 425.
ÉQUILIBRE DE L'EAU
DANS DES CYLINDRES COMMUNICANTS.
L'eau s'établit au même niveau
dans tous les deux.

IV. INTENSITE

En 1898, DRINCOURT compare un courant d'électricité positive à une quantité de chaleur passant d'un corps chaud vers un corps moins chaud ([9], p. 592).

Mais , en 1901, BASIN, dans les "leçons de Physique, pour les aspirants au bac d'ordre scientifique" assimile courant à débit, *assimilation qui fait image et qui est d'une commodité telle qu'elle s'est immédiatement imposée : par intensité, il faut toujours entendre la quantité d'électricité qui passe en une seconde.* ([1], p. 418).

En 1903, BOUANT utilise cette même analogie hydraulique pour donner le sens d'un courant :

Le sens du courant ne dépend, en effet, ni de la forme des vases, ni de leurs dimensions, ni de la position du fond de chacun d'eux, ni des points auxquels aboutissent les deux extrémités du tuyau de communication. Il dépend uniquement des niveaux supérieurs. L'écoulement se fait toujours du niveau le plus élevé vers le niveau le moins élevé. Deux conducteurs électrisés qui ne sont pas au même potentiel sont comparables à deux vases dans lesquels le liquide n'est pas au même niveau : quand on les met en communication l'un avec l'autre par un fil fin, il se produit un courant qui va du corps au potentiel le plus élevé vers le corps au potentiel le moins élevé. ([4], p. 402).

V. FORCE ELECTROMOTRICE

Avec l'étude de la mise en mouvement de l'électricité, apparaissent la notion de force électromotrice et la loi d'Ohm.

Pour mettre en mouvement une charge électrique entre deux points, il faut qu'il existe une différence de niveaux électriques entre ces deux points, tout comme il faut une différence de niveaux pour qu'il y ait écoulement d'eau entre deux réservoirs.

Cette analogie se trouve, schéma à l'appui, dans le texte de MEYER de 1905. ([18], p. 287-289).

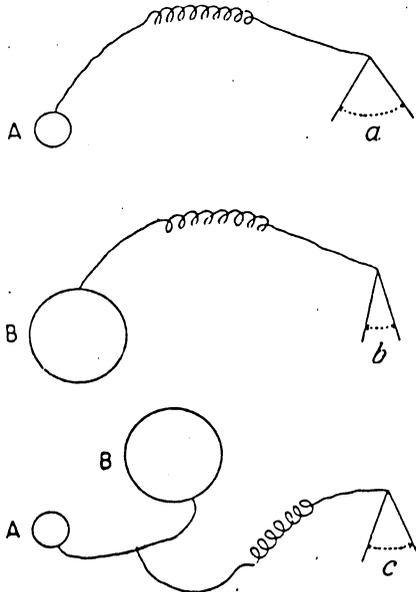


Fig. 240. — Force électromotrice. — 1° a marque le niveau électrique de A; 2° b marque le niveau électrique de B; 3° on met A et B en communication par un fil conducteur; l'électrisation passe de A vers B, et le potentiel final c est intermédiaire entre a et b.

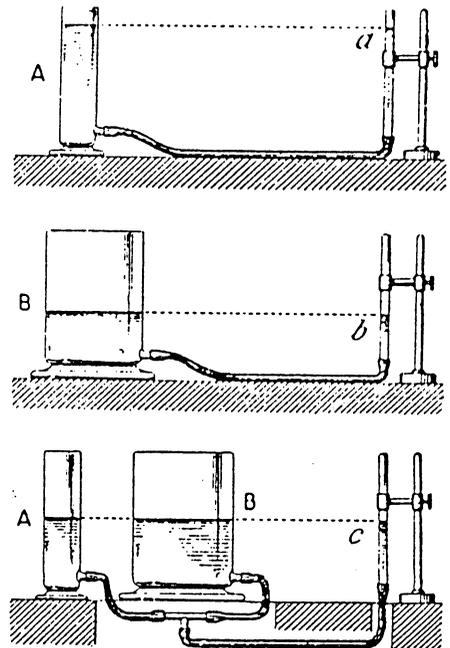


Fig. 241. — Comparaison hydrostatique. — Le niveau a dans A est supérieur au niveau b dans B. Si on met A et B en communication, le niveau c est intermédiaire, l'eau s'étant écoulée de A vers B.

A et B sont des conducteurs portant des électrisations positives. a - b - c représentent les feuilles d'un électroscope mesurant les potentiels de A, B et de A et B réunis par un fil conducteur.

"Il y a passage d'électrisation positive du corps au plus haut potentiel vers celui au potentiel le plus bas, jusqu'à ce que les potentiels soient égaux. La d.d.p. a donc déterminé un mouvement d'électrisation."

Apparaît ainsi la notion de force électromotrice : cette différence de potentiel est une cause capable de mouvoir l'électrisation : on dit que c'est une force électromotrice.

VI. PILE - ELECTROMOTEUR

L'analogie avec l'hydrostatique est toujours utilisée pour expliquer le rôle de l'électromoteur assimilé à une pompe.

Pour maintenir constant le débit de l'eau, il faut que la différence de niveaux entre les réservoirs ne varie pas. Cela peut se faire grâce à une pompe qui remonte le liquide du réservoir inférieur au réservoir supérieur.

1 Exemple extrait de GRANDMONTAGNE 1910 ([16], p. 244-245).

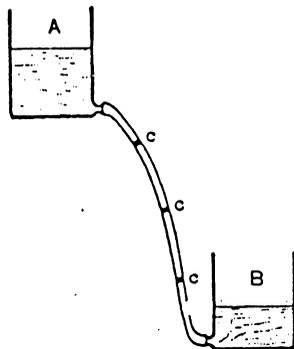


FIG. 299. — Le débit est le même en tous les points de la canalisation qui joint A et B.

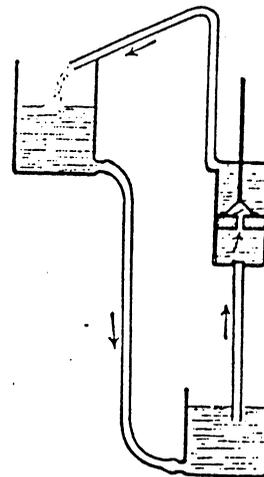


FIG. 300. — La pompe maintient constante la différence de niveau hydraulique; en électricité, l'action chimique maintient constante la différence de niveau électrique.

2- Cette analogie est reprise de façon plus approfondie dans le BILLARD - TOUREN-BILLARD (1914) ([3], p. 104-105).

Soit une pompe centrifuge P (fig.409), dont le tuyau d'aspiration A est relié au tuyau de refoulement. Le tout étant plein d'eau, si l'on fait tourner la pompe, il s'établit un courant d'eau continu dans le tuyau RCA. On peut considérer cela comme analogue au cas d'une pile ou d'un générateur quelconque de courant, produisant un courant électrique dans un fil conducteur réunissant ses pôles.

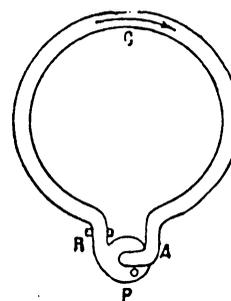


FIG. 409. — Courant d'eau produit par une pompe rotative, analogue au courant électrique.

Supposons maintenant que les tuyaux d'aspiration et de refoulement de la pompe P communiquent avec deux vases M et N contenant de l'eau (fig. 410).

Quand la pompe ne fonctionne pas, l'eau monte au même niveau $M_1 N_1$ dans les deux vases. Quand on la fait tourner avec une vitesse convenable, la pompe fait passer de l'eau de N en M, jusqu'à ce qu'il soit établi, entre ces deux vases, une différence de niveau, telle que la pression de l'eau qui en résulte fasse équilibre à la pression produite par la pompe.

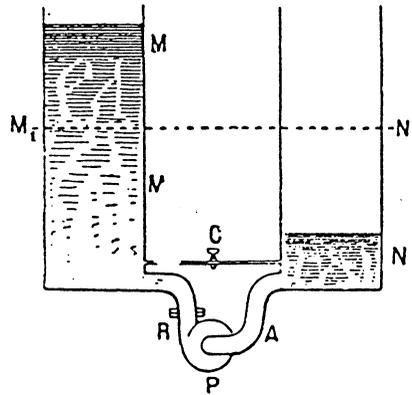


Fig. 410. — Différence de niveau entre deux vases contenant de l'eau, produite par une pompe rotative.

Dans le circuit électrique, c'est la pile qui joue le rôle de pompe.

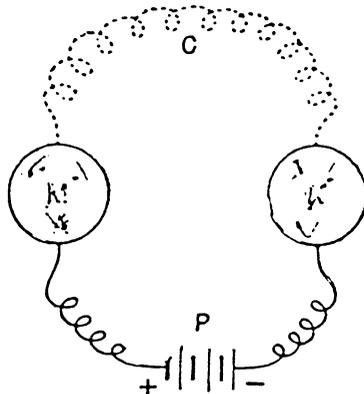


Fig. 411. — La pile P produit entre les conducteurs isolés MN une différence de niveau électrique ou différence de potentiel électrique.

VII. LOI D'OHM

Avec l'étude des circuits complets apparaît la loi d'Ohm.

* La notion de résistance est abordée de façon qualitative dans le **BASIN** (1903) avec l'analogie: Courant électrique \leftrightarrow Courant liquide ([2], p. 258).

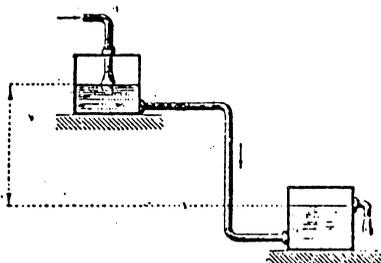


Fig. 214. — Comparaison d'un courant liquide avec un courant électrique.

Une pompe non représentée, fait remonter dans le réservoir supérieur l'eau qui sort du réservoir inférieur ; la différence entre les niveaux est constante.

On doit alors comparer la *production d'un courant constant dans le tuyau de communication* et le courant électrique en faisant le parallèle :

* <u>Courant électrique</u>	\leftrightarrow	<u>Courant d'eau</u>
caractérisé par :		caractérisé par :
- le débit (intensité)		- le débit
- la différence de potentiel entre les deux pôles de la source		- la différence des niveaux

* <u>Résistance du circuit</u>	\leftrightarrow	<u>Opposition du tuyau à l'écoulement</u>
--------------------------------	-------------------	---

Une expérience est décrite permettant de mesurer l'intensité du courant et mettant en évidence la chute de potentiel le long d'un fil parcouru par un courant.

L'expérience suivante permet de comparer les intensités de courants. On se sert d'une bouteille de Leyde, d'un long fil de coton et d'un électroscope de Gaugain. Cet électroscope ne porte qu'une seule feuille d'or (fig. 215) en regard de laquelle se trouve une boule de laiton b fixée à une tige métallique traversant une paroi de la cage.

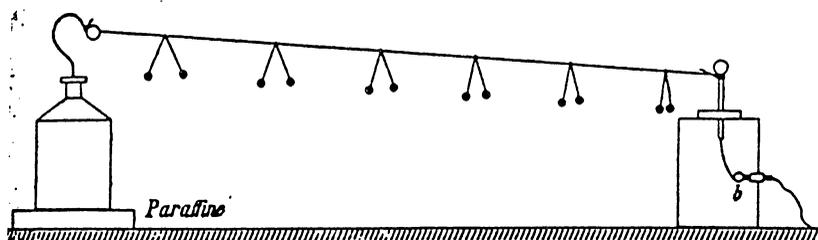


Fig. 215. — Expérience permettant de comparer les intensités de courants.

La bouteille de Leyde étant placée sur un gâteau isolant, on relie le bouton avec celui de l'électroscope par le fil de coton, puis on met au sol le bouton b, et on dispose à cheval des doubles pendules le long du fil. Cela fait, on électrise la bouteille en touchant son bouton avec celui d'une seconde bouteille électrisée ; les doubles pendules s'écartent, et leur divergence diminue régulièrement depuis la bouteille jusqu'à l'électroscope, ce qui indique une diminution régulière de potentiel. On remarque de plus que la feuille d'or vient toucher la boule b à intervalles réguliers, se déchargeant à chaque contact. Le rapport des nombres de ces contacts pendant le même temps mesure les rapports des intensités des courants dans deux expériences différentes.

D'une série d'expériences de ce genre, il conclut que *l'intensité du courant dépend, dans un conducteur donné, de la différence de potentiel qui existe entre les deux extrémités du conducteur et pour une source d'électricité donnée, de la nature du conducteur et de ses dimensions.* ([2], p. 259)

On trouve dans le MEYER de 1905, l'analyse hydraulique d'une expérience voisine.

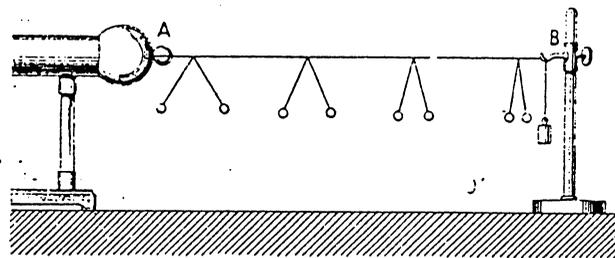


Fig. 249. — *Courant électrique.* — L'électrisation s'écoule de A en B. Les niveaux électriques marqués par des doubles pendules vont en décroissant le long du fil.

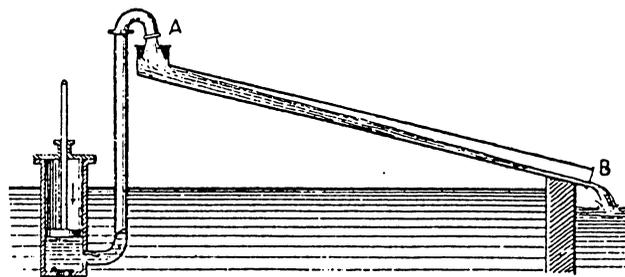


Fig. 250. — *Comparaison hydrostatique.* — La pompe élève l'eau au niveau A. L'eau s'écoule jusqu'au niveau B.

Les niveaux électriques décroissent comme le niveau de l'eau. ([18], p. 298-299)

La relation traduisant la loi d'Ohm est elle-même obtenue par analogie dans le **POIRE-TANQUEREY** de 1909. ([20], p. 223-224) :

Prenons encore comme exemple un courant liquide.

Si on maintient constant le niveau de la surface libre de l'eau, la pression qui détermine le mouvement est évaluée par h cm d'eau; soit v le volume d'eau recueilli en t secondes : le débit du siphon est $v : t$.

Pour faire varier la résistance qui s'oppose à l'écoulement, il suffit de remplacer C par un tube de caoutchouc de même longueur, mais de section différente, ou simplement de faire en quelques points de C des ligatures avec du fil ordinaire, de manière à produire des étranglements. On constate alors que, la pression étant restée constante, le débit diminue à mesure que la résistance augmente : on démontre d'ailleurs qu'elle lui est inversement proportionnelle.

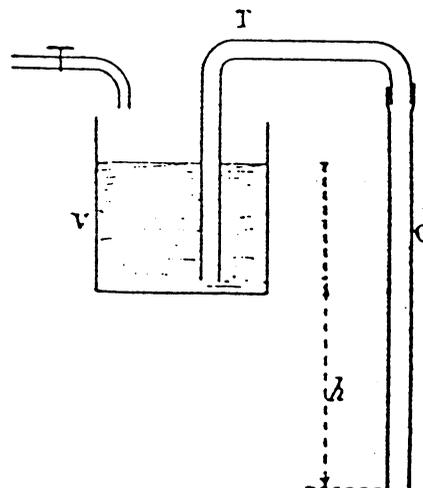


Fig. 99.

Enlevons les ligatures et allongeons le tube C à l'aide d'un tube de verre de même diamètre et de longueur h ; la pression qui détermine l'écoulement a doublé et l'on constate qu'il en est sensiblement de même du débit du siphon. Le débit varie donc en raison directe de cette pression.

L'intensité d'un courant électrique est soumise aux mêmes lois. Réunissons les deux bornes d'un électromoteur par un fil métallique ; la différence de potentiel aux bornes étant U volts, il passe un courant de I ampères. Remplaçons le fil interpolaire par un fil de même nature et de même section, mais de longueur double : la résistance qui s'oppose à l'écoulement du fluide étant doublée, l'intensité du courant n'est plus que $I/2$. Par un moyen quelconque, doublons la différence de potentiel qui existe aux bornes : l'intensité du courant est aussi doublée et reprend la valeur I .

Entre deux points d'un conducteur, l'intensité du courant varie donc en raison directe de la différence de potentiel qui existe entre ces points et en raison inverse de la résistance de la portion de conducteur considérée.

Dans le BILLARD de 1914, l'analogie hydraulique, portant sur un circuit complet, permet d'étudier la chute de tension le long d'un conducteur et d'aboutir à la loi d'Ohm. ([3], p. 109-110).

Chute de potentiel le long d'un conducteur parcouru par un courant. Loi d'Ohm.

1°) Analogie Hydraulique

Entre deux vases M N, communiquant par l'intermédiaire d'une pompe P (fig. 414), on établit un tube C sur lequel sont branchés des tubes verticaux m1, m2, m3. On voit que l'eau monte dans ces tubes à des hauteurs qui décroissent régulièrement de a à b. La pression de l'eau baisse donc régulièrement de a à b.

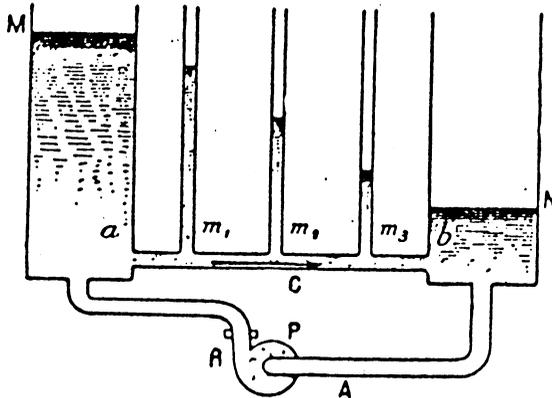


Fig. 414. — Diminution de la pression le long d'un tuyau ab parcouru par un courant d'eau.

2°) Expérience Electrique

Les extrémités a et b d'un conducteur sont réunies aux pôles d'une pile P (fig. 415) ; a est relié à l'une des bornes d'un voltmètre, à l'autre borne est attaché un fil, dont l'autre extrémité peut être déplacée sur ab. Lorsqu'on la déplace de a vers b, ce qui augmente la résistance de la portion du fil comprise entre a et b, on voit augmenter la différence de potentiel indiquée par le voltmètre. Donc :

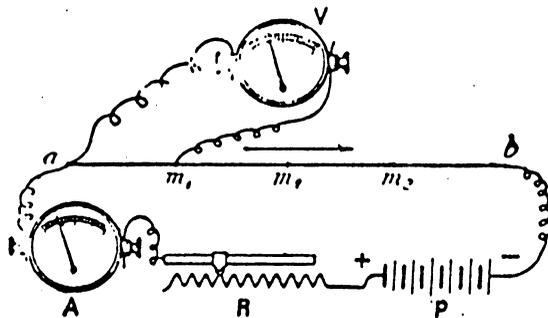


Fig. 415. — Étude de la chute de potentiel le long d'un fil ab parcouru par un courant électrique.

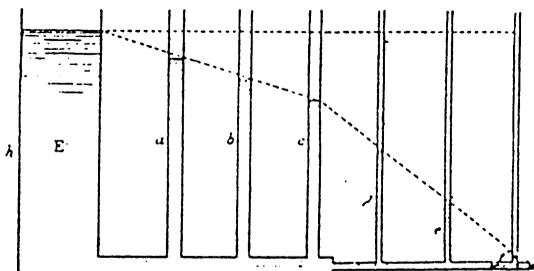
Le potentiel électrique des points d'un conducteur parcouru par un courant décroît lorsqu'on suit le sens du courant.

Si, avec un rhéostat, on fait varier l'intensité du courant mesurée par un ampèremètre A, on constate que :

La différence de potentiel entre deux points d'un fil parcouru par un courant augmente avec l'intensité du courant.

LOI D'OHM - On démontre que la différence de potentiel V entre deux points d'un conducteur parcouru par un courant est égale au produit de la résistance r de la portion du conducteur comprise entre ces deux points par l'intensité i du courant.

Parfois ce n'est pas le niveau de l'eau qui est considéré mais sa pression. Déjà, en 1895, on trouve dans le **BRANLY** que *la chute progressive de potentiel le long d'un circuit est tout à fait comparable à la diminution de pression le long d'un tuyau de conduite entre deux réservoirs à des niveaux différents.* ([6], p. 144).



Parallélisme que l'on retrouve dans le **POIRE-TANQUEREY** de 1909.

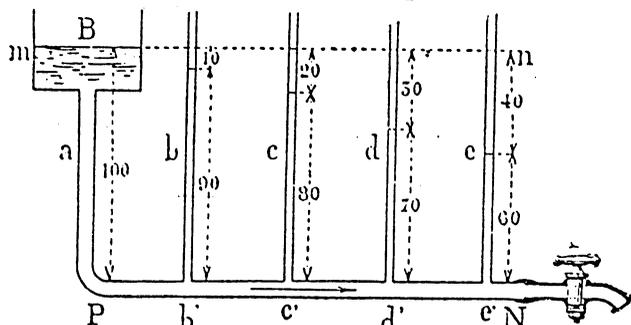


Fig. 100. — Perte de charge dans une conduite liquide.

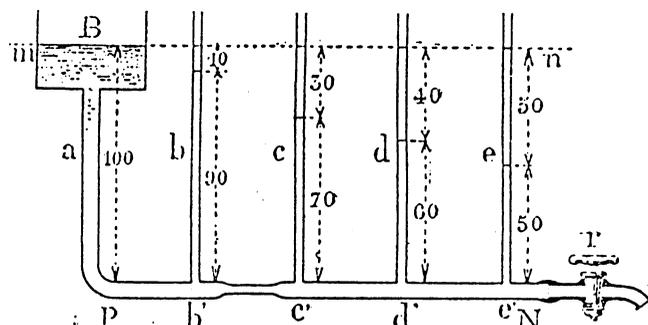


Fig. 101. — Perte de charge dans une conduite liquide.

Il y a donc une perte de pression ou une perte de charge sur toute la longueur de la conduite. Elle représente la pression nécessaire pour vaincre les résistances dues au frottement. ([20], p. 226).

La perte de charge augmente avec le débit et la résistance qui s'oppose à l'écoulement.

La même analogie se retrouve pour des circuits fermés dans le **MARTEL-HENRY** de 1913.

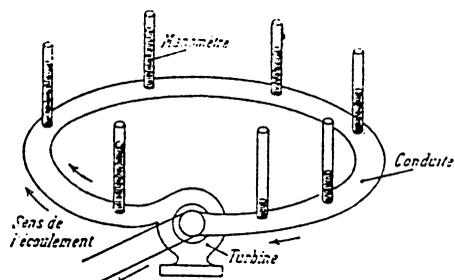


FIG. 66. — Analogies d'un circuit électrique et hydraulique.

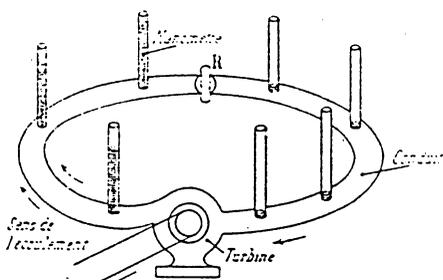


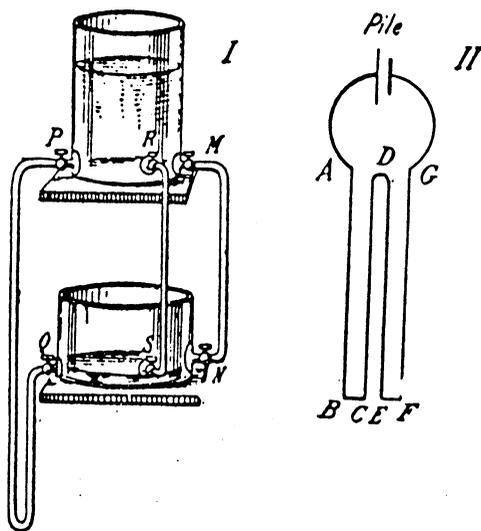
FIG. 67. — Analogies d'un circuit électrique et hydraulique.

Les tubes manométriques indiquent la pression sur la conduite. Si on met la pompe en mouvement, les tubes manométriques indiquent une pression qui va en décroissant dans le sens du courant. Lorsqu'on ferme la conduite à l'aide d'un robinet, le courant cesse et les manomètres placés à côté de l'arrivée de l'eau, indiquent partout la même pression égale, à la force motrice de la pompe. ([17], p. 76).

VIII. ETUDE DES RESISTANCES

L'analogie hydraulique est utilisée aussi pour faire comprendre que la résistance d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section par GAUTHIER et PERSEIL en 1912. ([15], p. 258).

Reprenons notre exemple des 2 vases A et B situés à des niveaux différents. Relions ces vases par deux tubes MN et PQ tels que PQ soit deux fois plus long que MN (fig.189).



Lorsque l'eau circule à travers ces tubes, elle éprouve une certaine résistance due aux frottements contre les parois, aussi conçoit-on aisément que la résistance offerte par le tube PQ soit plus grande que celle du tube MN.

Il en sera de même pour un tube RS plus étroit que le tube MN bien qu'il ait la même longueur. En général, la résistance offerte à l'écoulement du liquide par le tube de communication est d'autant plus grande que ce tube est plus long et plus étroit.

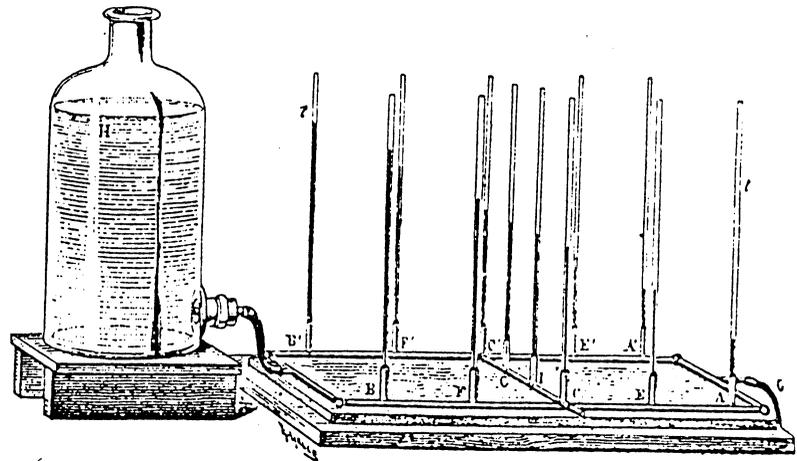
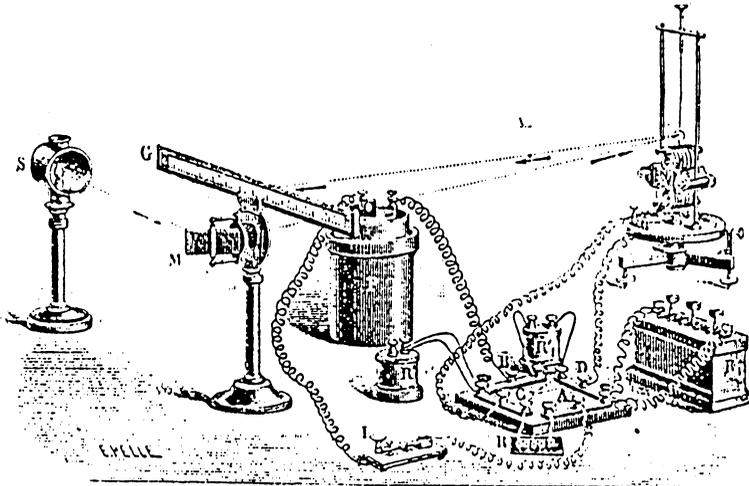
D'une manière analogue, les corps conducteurs opposent une résistance au courant électrique.

Des expériences précises, dont la description ne saurait entrer dans le cadre de cet ouvrage, ont montré que la résistance d'un conducteur est :

- 1°) Proportionnelle à sa longueur ;
- 2°) Inversement proportionnelle à sa section ;
- 3°) Proportionnelle à un coefficient particulier à chaque conducteur qu'on appelle sa résistance spécifique.

FIG. 189. — I. Les tubes PQ et RS opposent au liquide une résistance plus grande que le tube MN ; — II. Dans le conducteur ADG, les portions CDE et GF opposent au courant électrique une résistance plus grande que le tronçon AB.

Elle se poursuit jusque dans l'exposé de la méthode de mesure des résistances grâce au Pont de Wheaston par BRANLY en 1895. ([6], p. 158).



La correspondance indiquée par l'auteur entre électricité et hydraulique est la suivante.

* Pile	<-->	Réservoir contenant de l'eau au niveau H.
* 4 branches (4 résistances)	<-->	4 tuyaux portant des tubes indicateurs de niveau.
* Pont	<-->	Tuyau transversal.
Lorsque le pont est équilibré :		
* Aucun courant ne circule	<-->	Le tuyau transversal relie deux points où le niveau dans les tubes est le même. Entre C et C' les tubes sont au même niveau : il n'y a pas de courant d'eau.

IX. OSCILLATIONS ELECTRIQUES

Nous avons aussi trouvé (une seule fois dans le GAUTHIER-PERSEIL de 1912 ([15], p. 360) un parallélisme entre oscillations électriques lors de la charge et la décharge d'un condensateur dans une bobine et le mouvement oscillatoire d'un liquide lorsqu'on réunit deux récipients contenant du liquide à des niveaux différents : ceci illustré par les schémas suivants :

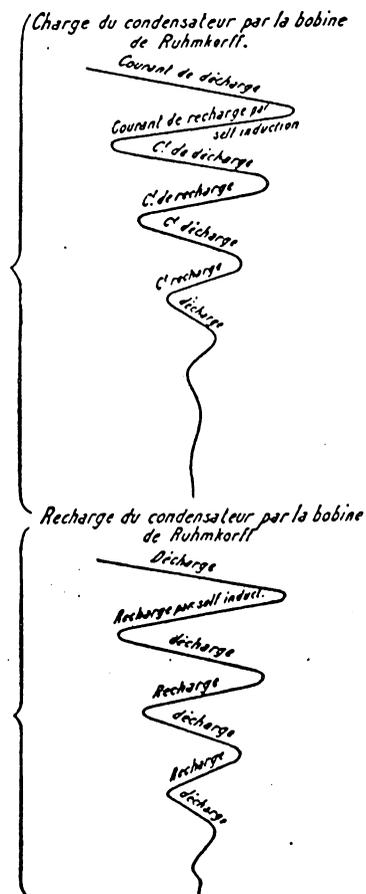


FIG. 236. — Représentation graphique des oscillations électriques. Leur amplitude décroît rapidement.

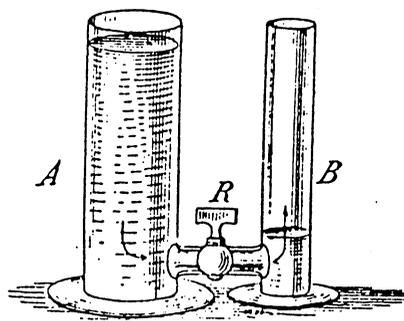


FIG. 237. — Mouvement oscillatoire d'un liquide. — Quand on ouvre brusquement le robinet R, le liquide du vase A passe par B ou, par suite de la vitesse acquise, il s'élève à un niveau supérieur. Il remonte alors dans A, puis dans B, effectuant ainsi une série d'oscillations autour de sa position d'équilibre.

On remarque que dans ce cas une analogie entre courant électrique et courant d'eau est faite bien que bobine et condensateur ne soient pas de même nature, alors que les deux vases le sont.

X. ENERGETIQUE

Au niveau énergétique, on peut trouver des analogies électricité - pesanteur.

Dans le **BRANLY** (1895), la définition de l'énergie potentielle électrique est immédiatement suivie d'un parallélisme avec l'énergie potentielle de pesanteur.

Un conducteur électrisé produit en se déchargeant une dépense d'énergie... Il possède donc quand il est électrisé, une énergie potentielle qui disparaît dans la décharge... De même qu'un corps pesant produit un travail en descendant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, de même l'électricité positive effectue un travail en passant, d'une région à potentiel plus élevé à une région de potentiel moins élevé. ([6], p. 42).

L'analogie avec les phénomènes hydrauliques permet d'évaluer cette énergie potentielle.

Sont mis en parallèle :

1° Une quantité d'électricité M au potentiel V qui passe au niveau du sol :	<-->	Une masse P à la hauteur H qui revient au niveau 0
Travail fourni : $W = MV$	<-->	Travail fourni : $W = PgH$
Energie potentielle : MV	<-->	Energie potentielle : PgH
2° Conducteur ayant une charge limitée M et un potentiel V qui revient au potentiel 0 :	<-->	Réservoir cylindrique contenant un liquide de hauteur H qui se vide :
Travail produit : $1/2 MV$	<-->	Travail produit : $1/2 PgH$

Cette correspondance se retrouve aussi dans le **CHASSAGNY** de 1902 ([7], p. 755) et le **DRINCOURT** de 1906 ([10], p. 545-546), en partant des surfaces équipotentiels analogues des surfaces de niveau.

Ligne ou surface équipotentielle :

Ligne de force

<-->

Travail électrique :

<-->

- nul le long d'une même équipotentielle
- d'autant plus grand que l'électricité positive s'éloigne davantage d'un conducteur électrisé positivement.

Ligne ou surface de niveau (d'égale altitude) :

Ligne de plus grande pente

Travail de la pesanteur :

- nul en restant sur une même courbe de niveau
- d'autant plus grand que le corps parvient à un plan horizontal plus éloigné du haut de la colline.

En ce qui concerne les échanges énergétiques dans un circuit fermé, on trouve une analogie avec l'hydraulique dans, par exemple, le GAUTHIER-PERSEIL de 1912 ([15], p. 266-267).

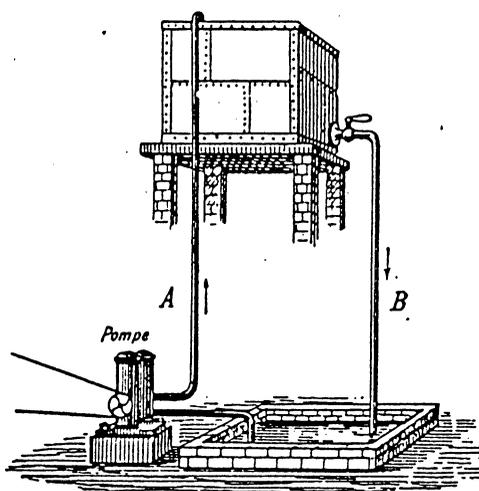


FIG. 193. — Le liquide parcourt un circuit fermé. Il dépense en B l'énergie qui lui a été fournie en A par la pompe.

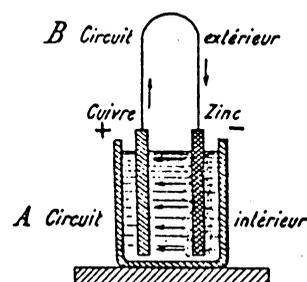


FIG. 193 bis. — De même lorsque les pôles d'une pile sont réunis, le courant électrique parcourt un circuit fermé : il dépense en B l'énergie qui lui a été fournie en A par l'action chimique de l'eau acidulée sur le zinc.

CONCLUSION

Ainsi durant cette période 1883 - 1914, l'utilisation de l'analogie est très fréquente et très variée puisqu'elle permet d'aborder tous les points envisagés dans un cours actuel.

On constate également qu'il y a très peu de formules dans les manuels élémentaires. En 1900, pour **Paul POIRE** par exemple (cours pour les 2ème et 3ème année d'Ecole Primaire Supérieure, aussi utilisé dans les Ecoles Normales d'Instituteurs) il convient que l'esprit des élèves se familiarise de bonne heure avec l'idée de potentiel électrique. Il insiste donc sur les expériences et les rapprochements qui décriront les phénomènes électriques et permettront leur compréhension.

"L'enseignement de la physique ne peut demeurer étranger (aux idées nouvelles) sous peine de rester en arrière du mouvement qui s'est produit, et de laisser les élèves dépourvus d'idées qui sont devenues nécessaires dans la pratique industrielle." ([19], p. 200)

Qu'en est-il aujourd'hui ?

Si nous feuilletons les manuels d'électricité que nous donnons à nos élèves du secondaire, nous n'avons pas trouvé trace de l'analogie thermique, mais quelques analogies hydrauliques ont survécu qui se limitent à :

débit d'eau	<-->	intensité du courant
différence de niveau d'eau	<-->	différence de potentiel
pompe	<-->	générateur.

Les deux premières servent d'introduction aux chapitres intensité, tension ; la dernière est utilisée pour relier le sens du courant au signe de la tension aux bornes d'un dipôle.

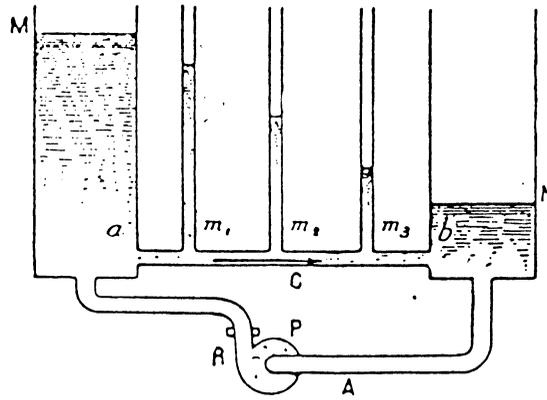
Par contre l'analogie entre circuits oscillants et pendule élastique figure dans les instructions des programmes 1989 de terminales.

Faut-il y voir un début de réhabilitation de l'analogie dans l'enseignement secondaire ? Cela permettrait peut-être de contrebalancer le formalisme omniprésent de nos cours de physique, trop abstrait pour beaucoup de nos élèves.

BIBLIOGRAPHIE

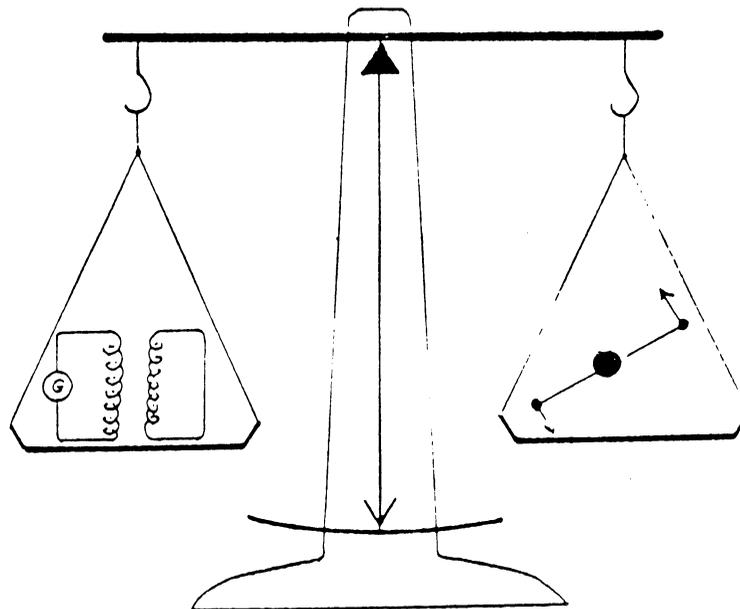
- [1] **BASIN** : Leçon de physique tome III : compléments à l'usage des élèves de 1ères sciences, des aspirants au baccalauréat d'ordre scientifique et des candidats aux écoles du gouvernement. chez Nony 1901.
- [2] **BASIN** : Physique 1ère C et D programme de 1902. Vuibert et Nony.
- [3] **A. BILLARD - C. TOUREN - M. BILLARD** : Physique et chimie 3ème années Ecoles Primaires Supérieures. Hatier 1914.
- [4] **BOUANT** : La physique des Ecoles Normales d'Instituteurs et du brevet supérieur. Delalaire Frères Editeurs 1903
- [5] **BOUANT ET PARISELLE** : Cours de Physique - Classe de 1ère C et D. Félix Aleau Editeur 1913.
- [6] **BRANLY** : Traité élémentaire de Physique. Bac ès sciences (Classiques et modernes). Libraire Ch. Poussielgue 1895.
- [7] **CHASSAGNY** : Cours élémentaire de Physique, à l'usage des classes de philosophie et mathématiques des candidats à la 2^o partie du baccalauréat et aux écoles du gouvernement, programme de 1902. Hachette.
- [8] **CHASSAGNY** : Précis de physique 2ème fascicule, 1ère A, B, C, D programme de 1902. Hachette 1905.
- [9] **DRINCOURT** : Traité de Physique, classe de philosophie, programme de 1890.
- [10] **E. DRINCOURT** : Traité élémentaire de physique. Colin 1906.

- [11] **DRION - FERNET** : Traité de physique élémentaire.
Masson 1883
- [12] **DRION - FERNET** : Traité de physique élémentaire.
Masson 1893.
- [13] **FAIVRE - DUPAIGNE - CARINIEY** :
Nouveau cours de physique élémentaire.
1er C, D.
Masson 1905.
- [14] **GANOT - MANEUVRIER** :
Traité élémentaire de physique.
Hachette 1913, 25ème édition.
- [15] **GAUTHIER ET PERSEIL** :
Leçons de physique, Brevet Supérieur
EN d'instituteurs, Ecoles Primaires
Supérieures de jeunes filles.
Nathan vers 1912.
- [16] **MR et Mme H. GRANDMONTAGNE** :
Cours expérimental de physique,
Candidats aux brevets et aux écoles
normales.
Larousse vers 1910.
- [17] **V. MARTEL et E. HENRY** :
Cours de Physique 3ème année Ecoles
Primaires Supérieures, Programme de
1909.
Garnier Frères 1913.
- [18] **F. MEYER** : Physique élémentaire.
2ème volume : acoustique, optique,
électricité. 1er cycle, classe de 3ème B.
Delalaire Frères éditeurs 1905.
- [19] **P. POIRE** : Physique 2ème et 3ème années
Ecoles Primaires Supérieures.
Delagrave 1900.
- [20] **POIRE et A. TANQUEREY** :
Leçons de physique 2ème et 3ème année
à l'usage des Ecoles Normales
d'Instituteurs. Programme de 1905.
Delagrave 1909.



Diminution de la pression le long d'un tuyau ab parcouru par un courant d'eau.

L'ANALOGIE : OUTIL PEDAGOGIQUE CONTEMPORAIN



PHENOMENES VIBRATOIRES ENTRETENUS

C. Etasse

C'est en interprétant les phénomènes de diffraction et d'interférences que Fresnel puis Maxwell, admirèrent que la lumière était un phénomène vibratoire se propageant.

La propagation d'un signal mécanique ou lumineux s'étudie expérimentalement dans les manuels scolaires de première S de manière analogique.

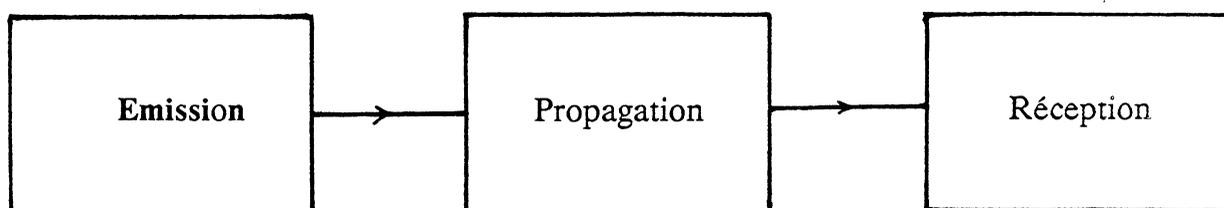
La grandeur physique associée à un phénomène périodique est la grandeur mesurable dont on peut observer les variations en fonction du temps.

Pour un phénomène périodique de nature mécanique, la grandeur physique associée peut être une variable de position : abscisse linéaire, curviligne, angulaire.

Dans le domaine des ondes radioélectriques, lumineuses, l'une des grandeurs physiques associées est le vecteur champ électrique \vec{E} .

La propagation d'un signal n'est jamais instantanée.

On a toujours la séquence dans le temps:



I. PROPAGATION

SIGNAL MECANIQUE

Unidimensionnel	Bidimensionnel	Tridimensionnel
<ul style="list-style-type: none"> * Ebranlement transversal (corde). * Ebranlement longitudinal (ressort). * Ebranlement de torsion (échelle de perroquet). * On définit la longueur d'onde : distance séparant deux points consécutifs vibrant en phase. 	<ul style="list-style-type: none"> * Ebranlement transversal (surface de l'eau). * On définit une ligne d'onde : ensemble des points atteints au même instant par une perturbation émise par la source. 	<ul style="list-style-type: none"> * Ebranlement longitudinal (son) * On définit une surface d'onde : ensemble des points atteints au même instant par une perturbation émise par la source.

La propagation d'un signal mécanique exige l'existence d'un milieu matériel élastique.

Il n'y a pas transport de matière mais transport d'énergie mécanique.

A la distance d de la source, le décalage horaire est $\theta = d/c$.

La propagation d'un phénomène vibratoire entretenu est caractérisé par la double périodicité.

- ° temporelle T : chaque point du milieu, comme le point source, effectue un mouvement vibratoire de période T.
- ° spatiale : distance dont l'onde a progressé pendant la durée d'une oscillation du point source telle que : $\lambda = c T$

La célérité est constante en tous points d'un milieu homogène. Elle dépend des caractéristiques du milieu de propagation.

° Pour une corde $c = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$

° Pour un gaz, c dépend de la nature du gaz, de la température mais pas de la pression.

On a : $c = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}$

Tout point du milieu de propagation est dans le même état vibratoire à des instants séparés par kT .

A tout instant, des points du milieu de propagation, distants de $k\lambda$ sont dans le même état vibratoire.

ONDES ELECTROMAGNETIQUES

Ces ondes présentent des différences avec les ondes mécaniques.

- * Contrairement aux ondes élastiques, elles peuvent se propager dans le vide.
- * Toutes les ondes électromagnétiques (hertziennes, infra-rouges, lumineuses, ultra-violettes) se propagent à la même célérité $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

II. REFLEXION

Elle se fait sans changement de la fréquence ni de la longueur d'onde.

Dans un milieu unidimensionnel, la réflexion s'effectue :

- * Avec un changement de sens de l'élongation lorsque l'extrémité est fixe.
- * Sans changement de sens de l'élongation lorsque l'extrémité est libre.

Une onde incidente rectiligne donne par réflexion sur un obstacle plan, une onde réfléchie rectiligne.

L'angle de réflexion \hat{r} est égal à l'angle d'incidence \hat{i} .

III. TRANSMISSION OU REFRACTION

Quand un signal incident arrive à la frontière de deux milieux de propagation, il y a simultanément transmission et réflexion.

Le changement de direction que subit l'onde est dû à un changement de célérité.

L'onde progressive transmise a la même fréquence que l'onde progressive incidente.

La longueur d'onde est modifiée.

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

Les rayons arrivant perpendiculairement à la frontière ne sont pas déviés.

On définit un angle d'incidence i_1 et un angle de réfraction i_2 par rapport à la normale.

Loi de la réfraction:

$$\frac{\sin i_1}{c_1} = \frac{\sin i_2}{c_2}$$

<====>

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

Pour les ondes lumineuses, on caractérise chaque milieu traversé par son indice de réfraction, désigné par n , tel que :

$$n_1 = \frac{c}{c_1}$$

où c = célérité de la lumière dans le vide

et c_1 = célérité de la lumière dans le milieu 1

On obtient alors la loi de Descartes :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

<====>

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$

IV. DIFFRACTION

Soit une onde progressive devant franchir une ouverture

* si l'ouverture a des dimensions \gg à la longueur d'onde :

l'onde progressive se propage normalement.

* si l'ouverture a des dimensions $<$ à la longueur d'onde :

Le faisceau de sortie est constitué de rayons diffractés qui partent de

l'ouverture.

Si l'onde reste dans le même milieu de propagation, sa période spatiale n'est pas modifiée :

un son diffracté garde la même hauteur que le son initial; une lumière diffractée garde la même couleur que la lumière initiale.

V. INTERFERENCES

On obtient un phénomène d'interférences en utilisant deux sources vibratoires de même nature, même amplitude, synchrones, en phase.

On obtient:

* des points qui vibrent avec une amplitude $2a$, à la même fréquence que les sources, tels que : $d_2 - d_1 = k \lambda$

* des points immobiles tels que: $d_2 - d_1 = (2k + 1) \lambda / 2$

Ainsi :

En mécanique	En acoustique	En lumière
Vibration + vibration = mouvement	Son + son = son	Lumière + lumière = lumière
Vibration + vibration = immobilité	Son + son = silence	Lumière + lumière = obscurité
A la surface de l'eau on obtient des demi-hyperboles symétriques par rapport à la médiatrice de S_1S_2 qui est une frange à amplitude maximale (frange brillante).		Pour les ondes lumineuses, les hyperboles sont remplacées dans l'espace par des hyperboloïdes. * Les franges brillantes sont analogues des lignes d'amplitude maximale à la surface de l'eau * Les franges noires sont analogues des lignes immobiles à la surface de l'eau.

Les phénomènes de diffraction et d'interférences montrent les analogies de comportement des ondes mécaniques entretenues et de la lumière.

Ainsi se trouve justifié le caractère ondulatoire de la lumière.

* * *

Sources : Manuels de première S :

- Delagrave, Magnard, Colin, Belin, Bordas

A C I D E / B A S E

C O M P L E X E / A C C E P T E U R

O X Y D A N T / R E D U C T E U R

J. Hauchemaille

Une étude analogique des couples acide / base , complexe / accepteur ou oxydant / réducteur est possible et suggérée dans le manuel de chimie générale de R. Didier.

On mettra en évidence les points communs mais aussi les différences entre ces différents couples dans l'étude qui suit.

Le symbole \longleftrightarrow sera utilisé pour désigner les grandeurs à mettre en parallèle dans l'analogie.

Couple AH/A⁻ (acide - base)

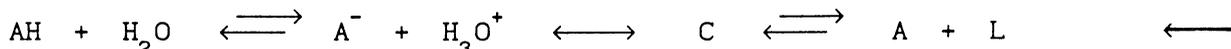
Couple C/A (complexe - accepteur)

AH est dans l'étude qui suit, un acide faible.

I. DEFINITIONS

AH	:	donneur de proton	↔	C	:	donneur de ligand	←
A ⁻	:	accepteur de proton	↔	A	:	accepteur de ligand	←
H ₃ O ⁺	:	ion hydronium	↔	L	:	ligand	←

L'équilibre de dissociation entre les deux formes du couple prenant la même



II. CONSTANTE DE DISSOCIATION ET DOMAINES DE PREDOMINANCE

La loi générale d'action de masse appliquée aux équilibres de définition ci-dessus, donne les constantes de dissociation :

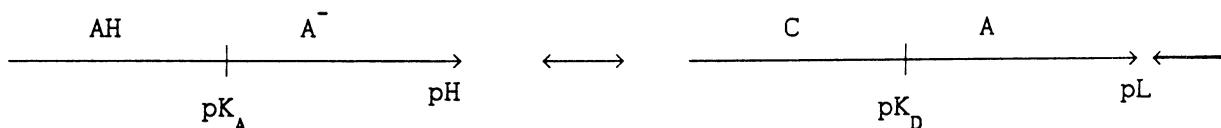
$$K_A = \frac{[H_3O^+].[A^-]}{[AH]} \rightleftharpoons K_D = \frac{[A].[L]}{[C]}$$

$$\text{d'où } [H_3O^+] = \frac{K_A.[AH]}{[A^-]} \rightleftharpoons \text{d'où } [L] = \frac{K_D.[C]}{[A]}$$

En utilisant la notation $p = -\log$, on obtient :

$$pH = pK_A + \log \frac{[A^-]}{[AH]} \rightleftharpoons pL = pK_D + \log \frac{[A]}{[C]} \leftarrow$$

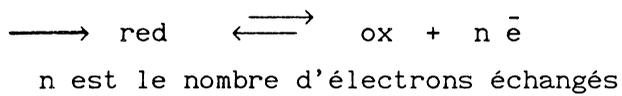
Dans les trois cas, on pourra parler de zones de prédominance :



Couple redox (réducteur - oxydant)

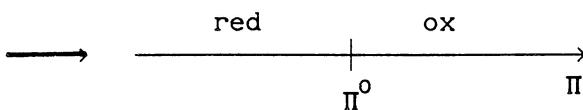
- red : donneur d'électron
- ox : accepteur d'électron
- e^- : électron

forme dans les 3 cas :



Pour un couple ox/red, on ne définit pas d'équilibre de dissociation.
 Cependant, le potentiel redox, donné par la formule de Nerst, à T = 298 K,
 prend une forme analogue.
 Π^0 est le potentiel standard.

→ $\Pi = \Pi^0 + \frac{0,06}{n} \log \frac{[ox]}{[red]}$

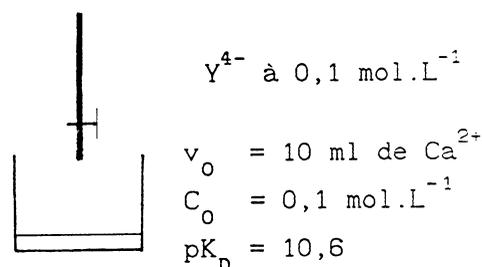
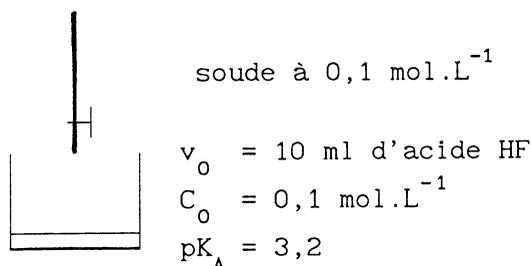
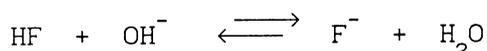


III. COURBES DE TITRAGE

Un rapprochement sera fait entre :

le titrage d'un acide faible HF par une base forte telle que la soude. \longleftrightarrow le titrage d'un cation métallique Ca^{2+} par l'ion éthylène diamine tétracétate : l'EDTA dont la formule sera notée Y^{4-}

La réaction du dosage est alors :



1. Equivalence de la réaction :

Elle est obtenue lorsque le nombre de moles de soude ajoutée est égal au nombre de moles de HF soit, V_e étant le volume de soude alors versé

$$0,1.V_e = 0,1.10 \text{ et } V_e = 10 \text{ ml}$$

2. Etude de pH = f(x)

Dans les trois cas, la variable $x = \frac{V}{V_e}$ désignera le rapport du volume de de x respectivement l'évolution de pH, de pL (ici pY) ou de Π .

$$\text{On aura : } C = C_0 \cdot \text{facteur de dilution} = \frac{1}{10} \cdot \frac{10}{10 + V} = \frac{1}{10 + V}$$

La concentration du réactif ajouté, dans le mélange, sera :

$$[\text{soude}] = [\text{Y}^{4-}] = C_0 \cdot \frac{V}{10 + V} = C_0 \cdot \frac{10}{10 + V} \cdot \frac{V}{V_e} = C \cdot x$$

→ le titrage des ions fer II Fe^{2+} par les ions permanganate MnO_4^- .



MnO_4^- à $0,02 \text{ mol.L}^{-1}$

$v_0 = 10 \text{ ml}$ d'ions $\text{Fe}^{2+} + \text{H}^+$

$C_0 = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$

Elle est obtenue lorsque le nombre de moles d'ions MnO_4^- ajoutés est égal

→ au $1/5$ du nombre de moles d'ions Fe^{2+} soit,

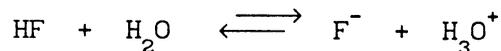
V_e étant le volume de MnO_4^- alors versé

$$0,02 \cdot V_e = \frac{1}{5} \cdot 0,1 \cdot 10 \text{ et } V_e = 10 \text{ ml}$$

2. Etude de $\Pi = f(x)$

solution versé au volume correspondant à l'équivalence; on suivra en fonction

$x = 0$: on a l'acide faible pur, la réaction est alors :



de constante
$$K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{F}^-]}{[\text{HF}]}$$

On aura donc formation de F^- et H_3O^+

$$[\text{F}^-] = [\text{H}_3\text{O}^+] \text{ et } C_0 = [\text{HF}] + [\text{F}^-] \cong [\text{HF}]$$

car l'acide est faible.

$$K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]^2}{C_0}$$

d'où
$$\text{pH} = \frac{1}{2} (\text{p}K_A + \text{p}C_0)$$

$x < 1$: la réaction du dosage prédomine la constante vaut :

$$K = \frac{[\text{F}^-]}{[\text{HF}] \cdot [\text{OH}^-]} = 10^{14} K_A = 10^{10,8}$$

Cette réaction est totale : la soude ajoutée réagit avec HF; on a :

$$\begin{aligned} [\text{F}^-] &= C x \\ [\text{HF}] &= C (1 - x) \end{aligned}$$

Le pH est celui du couple HF/ F^- :

$$\text{pH} = \text{p}K_A + \log \frac{[\text{F}^-]}{[\text{HF}]}$$

d'où
$$\text{pH} = 3,2 + \log \frac{x}{1 - x}$$

$x = 0$: la valeur de pY n'est pas définie, aucune goutte d'EDTA n'a été versée.

$x < 1$: la réaction prépondérante est la réaction de complexation, de constante $K_F = 10^{10,6}$. Elle est donc totale, tous les ions Y^{4-} ajoutés sont complexés par Ca^{2+} .

$$\begin{aligned} [\text{CaY}^{2-}] &= C x \\ [\text{Ca}^{2+}] &= C (1 - x) \end{aligned}$$

On a donc le couple $\text{CaY}^{2-}/\text{Ca}^{2+}$

$$\text{pY} = \text{p}K_D + \log \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{[\text{CaY}^{2-}]}$$

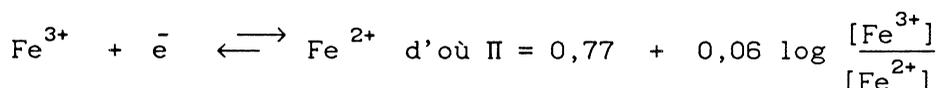
d'où
$$\text{pY} = 10,6 + \log \frac{1 - x}{x}$$

$x = 0$, une électrode de platine plonge dans la solution : son potentiel Π varie. Associée avec une électrode au calomel saturé, elle forme une pile dont la fem : $E = \Pi - \Pi_{\text{ECS}} = (\Pi - 0,25)$ reproduit les variations de Π .

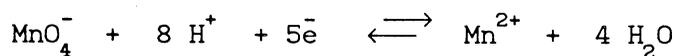
Pour $x = 0$, la réaction n'a pas commencé, Π n'est pas défini.

On verse quelques gouttes de MnO_4^- qui réagissent avec Fe^{2+} . L'électrode de platine indique le potentiel des couples redox présents dans la solution.

Pour $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$, on a :



Pour $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$, on a :



$$\text{d'où } \Pi = 1,51 + \frac{0,06}{5} \log \frac{[\text{MnO}_4^-] \cdot [\text{H}^+]^8}{[\text{Mn}^{2+}]}$$

Expression que nous simplifierons en supposant que $\text{pH} = 0$.

$x < 1$: MnO_4^- ajouté réagit totalement

avec les ions Fe^{2+} .

On a donc en solution, un mélange d'ions

Fe^{3+} formés et d'ions Fe^{2+} n'ayant pas réagi,

tels que :

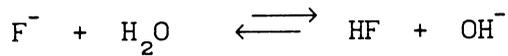
$$[\text{Fe}^{3+}] = C x$$

$$[\text{Fe}^{2+}] = C (1 - x)$$

L'électrode indique le potentiel du couple $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$:

$$\Pi = 0,77 + 0,06 \log \frac{x}{1 - x}$$

$x = 1$: nous sommes au point équivalent
L'acide HF a été transformé en sa base
conjuguée F^- . La réaction prédominante
est celle d'ionisation de F^- :



de constante

$$K' = \frac{[HF].[OH^-]}{[F^-]} = \frac{10^{-14}}{K_A}$$

On a : $[HF] = [OH^-]$ et
 $C = [HF] + [F^-] \cong [F^-]$

$$\text{donc } [OH^-]^2 = \frac{C \cdot 10^{-14}}{K_A}$$

$$\text{et } [H_3O^+]^2 = \frac{K_A \cdot 10^{-14}}{C}$$

d'où
$$\boxed{pH = 7 + \frac{1}{2} (pK_A - pC)}$$

Or $C = 1/20$ donc $pH \cong 8,0$

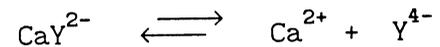
$x > 1$: on a un excès de soude, base
plus forte que F^- , qui détermine le pH.

$$[OH^-] = C (x - 1)$$

$$\text{donc } [H_3O^+] = \frac{10^{-14}}{C (x - 1)}$$

d'où
$$\boxed{pH = 14 - pC + \log (x - 1)}$$

$x = 1$: nous sommes au point équiva-
lent, le complexe CaY^{2-} est totale-
ment formé. Ca^{2+} et Y^{4-} en solution
proviennent de sa décomposition :



de constante de dissociation

$$K_D = \frac{[Ca^{2+}].[Y^{4-}]}{[CaY^{2-}]}$$

On a : $[Ca^{2+}] = [Y^{4-}]$ et
 $C \cong [CaY^{2-}]$

$$\text{d'où } [Y^{4-}]^2 = C \cdot K_D$$

et
$$\boxed{pY = \frac{1}{2} (pK_D + pC)}$$

Or $C = 1/20$ donc $pY \cong 6,0$

$x > 1$: on a un excès de Y^{4-} qui res-
te libre :

$$[Y^{4-}] = C (x - 1)$$

d'où
$$\boxed{pY = pC - \log (x - 1)}$$

$x = 1$: nous sommes au point équivalent

La relation entre les nombres de moles d'ions Fe^{2+} et MnO_4^- se traduit en concentration par :

$$\frac{[\text{MnO}_4^-]}{1} = \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{5} \quad \text{et} \quad \frac{[\text{Mn}^{2+}]}{1} = \frac{[\text{Fe}^{3+}]}{5}$$

Les 2 couples coexistent : l'électrode indique la valeur commune de leur potentiel redox Π_e tel que :

$$\Pi_e = 0,77 + 0,06 \log \frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} \quad \textcircled{1} \quad \text{et} \quad \Pi_e = 1,51 + \frac{0,06}{5} \log \frac{[\text{MnO}_4^-]}{[\text{Mn}^{2+}]} \quad \textcircled{2}$$

Multiplions $\textcircled{1}$ par 1 et $\textcircled{2}$ par 5 et faisons la somme :

$$6 \Pi_e = 0,77 + 5 \cdot 1,51 + 0,06 \log \frac{[\text{Fe}^{3+}] \cdot [\text{MnO}_4^-]}{[\text{Fe}^{2+}] \cdot [\text{Mn}^{2+}]}$$

Les relations entre concentrations annulent le terme en log et $\Pi_e = \underline{\underline{1,39 \text{ V}}}$

$x > 1$: on a un excès d'ions MnO_4^- .

Tout Fe^{2+} a disparu; les ions Fe^{3+} et Mn^{2+} ne se forment plus.

$$[\text{Mn}^{2+}] = \frac{0,02 \cdot V_e}{10 + V} = \frac{0,02 \cdot 10}{10 + V} = 0,02 \cdot \text{facteur de dilution} = C'$$

$$[\text{MnO}_4^-] = \frac{0,02 \cdot V - 0,02 \cdot 10}{10 + V} = C' \cdot (x - 1)$$

L'électrode indique le potentiel du couple $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$

$$\text{d'où} \quad \Pi = 1,51 + \frac{0,06}{5} \log (x - 1)$$

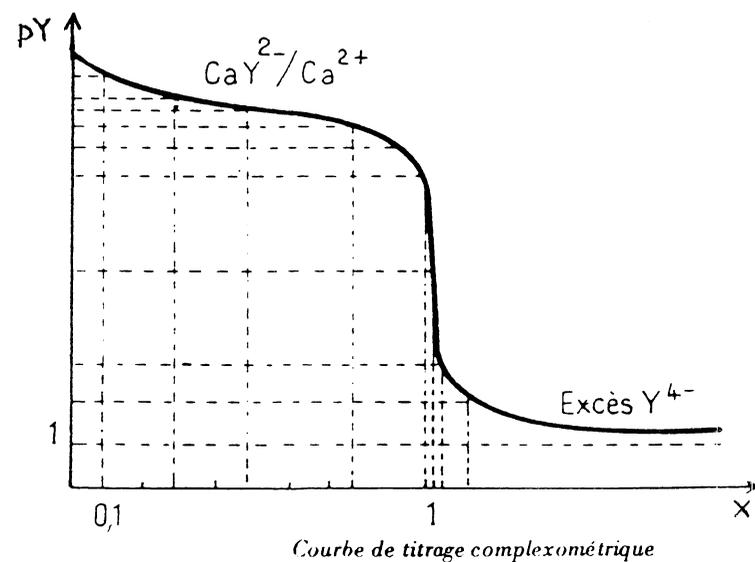
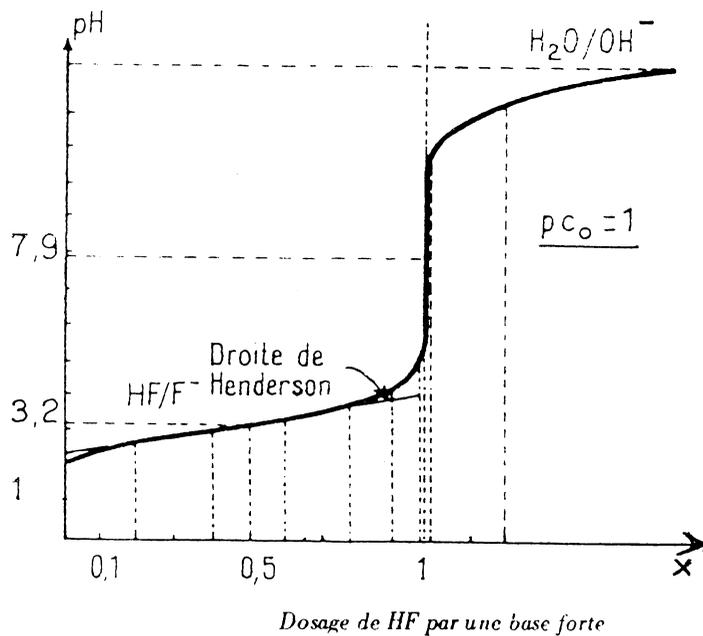
3. TRACE DES GRAPHES

1) Tableau de valeurs

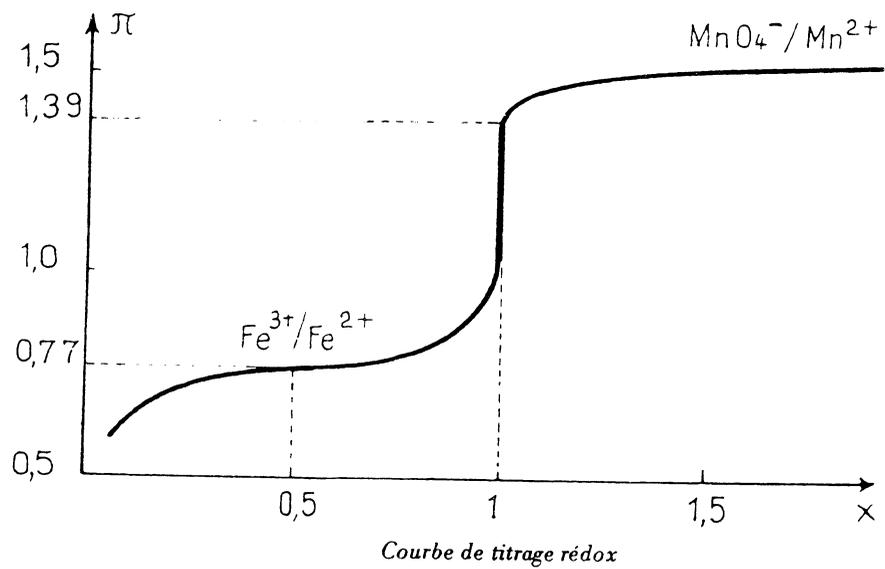
x	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
pH	2,1	2,6	3,0	3,2	3,4	3,8
x	0,9	0,99	1,0	1,01	1,2	
pH	4,2	5,2	7,9	10,7	12,0	

x	0,1	0,3	0,5	0,8	0,9
pY	11,6	11,0	10,6	10,0	9,6
x	0,99	1	1,01	1,1	
pY	8,6	6,0	3,3	2,3	

2) Courbes



x	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
Π	0,73	0,76	0,77	0,78	0,81
x	0,9	0,99	1,0	1,01	1,2
Π	0,83	0,89	1,39	1,49	1,50



La comparaison de ces courbes amène quelques remarques.

- | | |
|--|---|
| <p>* Pour $x = 0,5$, la courbe admet un point d'inflexion. Autour de cette valeur de x, le pH varie peu : on a une solution tampon dont le $\text{pH} = \text{pK}_A = 3,2$</p> <p>* Autour de $x = 1$, on observe une brutale variation de pH qui sert à déterminer le point équivalent. La valeur de pH_e dépend de c_0</p> | <p>* Pour $x = 0,5$, la courbe admet un point d'inflexion. Autour de cette valeur de x, le pY varie peu : on a une "solution tampon" dont le $\text{pY} = \text{pK}_D = 10,6$</p> <p>* Autour de $x = 1$, on observe une brutale variation de pY qui sert à déterminer le point équivalent. La valeur de pY_e dépend de c_0</p> |
|--|---|

4. Conclusion

On constate après cette étude des réactions de titrage, une parfaite similitude dans le mode de calcul de pH et de pY.

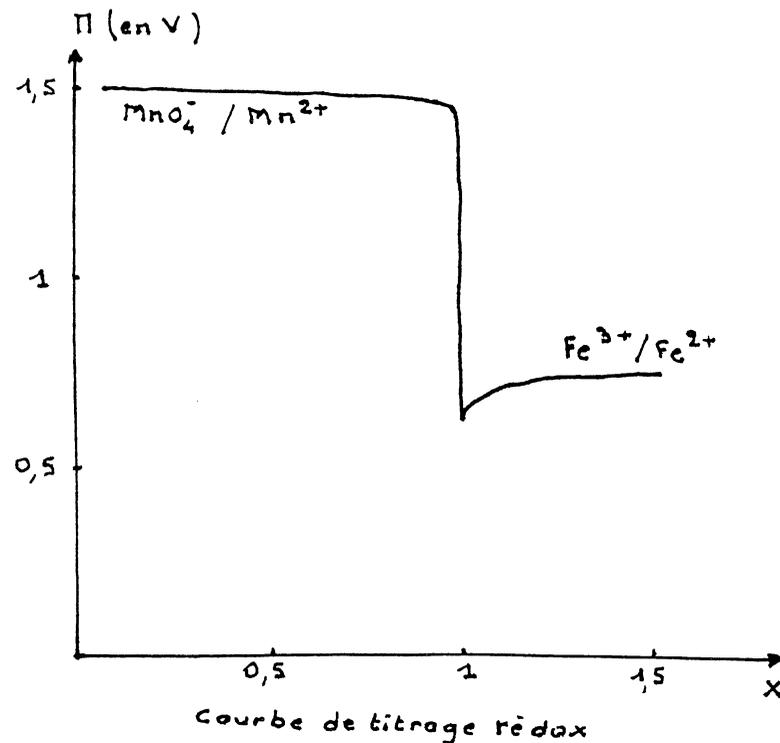
On aurait obtenu une formulation identique de pH et de pY en considérant le dosage d'une base faible par un acide fort puisque l'accepteur de ligand Ca^{2+} est analogue à la base faible F^- et que le complexe CaY^{2-} est analogue à l'acide faible HF. Dans ce cas, les courbes auraient eu la même forme avec des valeurs différentes en ordonnées de pH et de pY.

Nous avons néanmoins choisi de parler du dosage acide faible / base forte parce qu'il met en évidence les points communs des réactions acide / base et des réactions d'oxydo-réduction, mais il en montre aussi les différences.

Dans tout calcul concernant une réaction d'oxydo-réduction, deux couples redox interviennent à poids égal, alors que seul un couple acide / base (HF/F^- ou $\text{H}_2\text{O} / \text{OH}^-$ selon le domaine de pH) ou un couple complexe / accepteur est pris en compte.

De plus les deux couples redox n'interviennent pas symétriquement. Reprenons le dosage précédent en versant la solution d'ions Fe^{2+} dans la solution d'ions MnO_4^- . Avec les mêmes concentrations et les mêmes inconnues, les calculs précédents sont valables en permutant les couples $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ et $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$. On obtient le graphe suivant qui n'est plus que partiellement (pour $x \leq 1$) comparable aux précédents.

- * Pour $x = 0,5$, la courbe admet un point d'inflexion. Autour de cette valeur de x , Π varie peu : on a une "solution tampon redox" dont le Π est égal au Π^0 du couple $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$.
 - * Autour de $x = 1$, on observe une brutale variation de Π qui sert à déterminer le point équivalent.
- La valeur de Π_e ne dépend pas de c_0 mais uniquement des couples en présence.



Par contre, tous les couples acides / bases ou complexes / accepteurs jouent un rôle symétrique ainsi que nous pouvons le constater dans l'exemple suivant.

IV. REACTION ENTRE DEUX COUPLES

Acide / base

↔

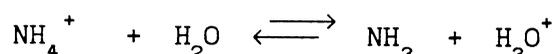
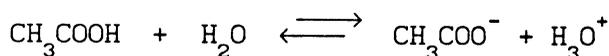
Complexe / accepteur

1. Soient les couples acide / base

$\text{CH}_3\text{COOH} / \text{CH}_3\text{COO}^-$ ($\text{pK}_1 = 4,8$) et

$\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3$ ($\text{pK}_2 = 9,2$)

Les réactions d'ionisation de ces couples sont :



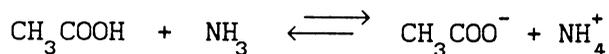
avec les constantes de dissociation :

$$K_1 = \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} \quad \text{et}$$

$$K_2 = \frac{[\text{NH}_3] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{NH}_4^+]}$$

2. Si on mélange CH_3COOH et NH_3 on

obtient la réaction :



Au point équivalent, on aura :

$$[\text{CH}_3\text{COOH}] = [\text{NH}_3] \quad \text{et} \quad [\text{CH}_3\text{COO}^-] = [\text{NH}_4^+]$$

La relation :

1. Les ions Ca^{2+} et Ba^{2+} donnent

avec l'EDTA Y^{4-} les complexes

CaY^{2-} ($\text{pK}_1 = 10,6$) et BaY^{2-}

($\text{pK}_2 = 7,8$) correspondant aux équilibres de formation :



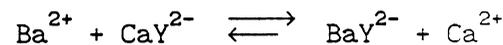
avec les constantes :

$$K_1 = \frac{[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{Y}^{4-}]}{[\text{CaY}^{2-}]} \quad \text{et}$$

$$K_2 = \frac{[\text{Ba}^{2+}] \cdot [\text{Y}^{4-}]}{[\text{BaY}^{2-}]}$$

2. Si on mélange CaY^{2-} et Ba^{2+}

on obtient la réaction :



Au point équivalent, on aura :

$$[\text{CaY}^{2-}] = [\text{Ba}^{2+}] \quad \text{et}$$

$$[\text{BaY}^{2-}] = [\text{Ca}^{2+}]; \quad \text{la relation :}$$

$$K_1 K_2 = \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-] \cdot [\text{NH}_3] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]^2}{[\text{CH}_3\text{COOH}] \cdot [\text{NH}_4^+]}$$

devient $K_1 K_2 = [\text{H}_3\text{O}^+]^2$, donc pour ce mélange :

$$\boxed{\text{pH} = \frac{1}{2} (\text{p}K_1 + \text{p}K_2)}$$

et pH = 7

$$K_1 K_2 = \frac{[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{Ba}^{2+}] \cdot [\text{Y}^{4-}]^2}{[\text{CaY}^{2-}] \cdot [\text{BaY}^{2-}]}$$

devient $K_1 K_2 = [\text{Y}^{4-}]^2$, donc pour ce mélange :

$$\boxed{\text{pY} = \frac{1}{2} (\text{p}K_1 + \text{p}K_2)}$$

et pY = 9,2

3. Conclusion

On retrouve donc ici pour les deux sortes de couples acide / base ou complexe / accepteur, le même comportement. Le pH ou le pY du mélange obtenu s'obtient par la même formule faisant intervenir les pK de chaque couple.

Il faut remarquer que, à l'équivalence de la réaction de dosage de Fe^{2+} par MnO_4^- , on se trouve dans une situation analogue à celles évoquées dans ce paragraphe.

La valeur du potentiel d'oxydo-réduction d'une telle solution calculée plus haut est :

$$\Pi = \frac{1}{6} (\Pi_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}}^0 + 5 \Pi_{\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}}^0) = \frac{1}{6} (0,77 + 5 \cdot 1,51)$$

Ce n'est pas la même formule que dans les deux cas évoqués ici, mais elle fait néanmoins apparaître une combinaison linéaire des Π^0 des couples redox concernés, Π^0 étant analogue des pK.

* * *

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

R. DIDIER : Chimie générale
Classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques;
Premier cycle universitaire; I U T.
J.B Baillièrre 1984

* * *

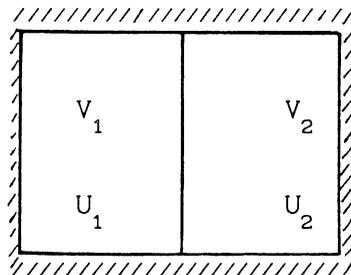
ANALOGIES ARTICULEES
AUTOUR DES LOIS DE CONSERVATION

B. Maheu

Ces analogies permettent d'éclairer les principes de conservation et d'évolution de systèmes physiques au moyen des lois de conservation et d'évolution issues de la thermodynamique.

La référence [1] contient de plus amples développements des questions exposées dans ce chapitre.

L'exemple thermodynamique est celui d'un système isolé, constitué de deux sous-systèmes pouvant échanger de l'énergie.
(Récipients de volumes invariables, contenant des fluides)



Les deux systèmes peuvent être caractérisés :

par des variables extensives (volumes V_1 et V_2)
par leurs températures T_1 et T_2 et
par leurs énergies U_1 et U_2 .

La température est, par définition, liée à l'entropie et à l'énergie interne par la relation :

$$\frac{1}{T} = \left[\frac{\partial S}{\partial U} \right]_v$$

Le système énergétiquement isolé, vérifie la conservation de l'énergie :

$$d U_1 + d U_2 = 0$$

Par ailleurs, son évolution vers l'équilibre est régie par le second principe pour un système isolé :

$$d S > 0$$

Et, à l'équilibre, $d S = 0$ (entropie maximale)

Dans l'exemple simple des deux récipients de volume invariable, on a :

$$d S = d S_1 + d S_2 = \left[\frac{\partial S_1}{\partial U_1} \right]_{V_1} \cdot d U_1 + \left[\frac{\partial S_2}{\partial U_2} \right]_{V_2} \cdot d U_2$$

Cette différentielle de l'entropie, combinée à la conservation de l'énergie et à la définition de la température devient :

$$d S = \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \cdot d U_1$$

On en déduit l'égalité des températures à l'équilibre ($d S = 0$) ainsi que le transfert d'énergie du volume chaud vers le volume froid pendant l'évolution vers l'équilibre.

$$(d S > 0 \iff d U_1 \text{ du signe de } (T_2 - T_1))$$

Si, en plus de l'énergie, les deux sous-systèmes peuvent échanger du travail de manière quasi statique (en supposant lentement mobile la paroi séparant V_1 et V_2), les relations pour l'énergie totale et l'entropie totale deviennent :

$$* \quad d U_1 + d U_2 = 0$$

$$* \quad d S = d S_1 + d S_2 =$$

$$\left[\frac{\partial S_1}{\partial U_1} \right]_{V_1} \cdot d U_1 + \left[\frac{\partial S_2}{\partial U_2} \right]_{V_2} \cdot d U_2 + \left[\frac{\partial S_1}{\partial V_1} \right]_{U_1} \cdot d V_1 + \left[\frac{\partial S_2}{\partial V_2} \right]_{U_2} \cdot d V_2$$

* $d V_1 + d V_2 = 0$

et, par conséquent :

$$d S = \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \cdot d U_1 + \left[\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right] \cdot d V_1$$

A l'équilibre ($d S = 0$), on en déduit :

$$T_1 = T_2 \quad \text{et} \quad P_1 = P_2$$

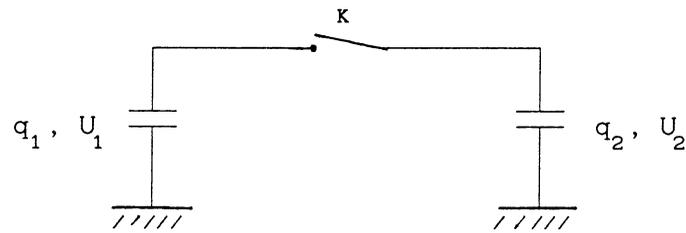
L'évolution vers l'équilibre ($d S > 0$) dépend, quant à elle, des conditions imposées à T ou V (transfert de chaleur du volume chaud vers le volume froid si V est fixé; variation de volume du signe de $(P_1 - P_2)$ si on impose $T_1 = T_2$ à chaque instant)

En résumé, la conservation de l'énergie et le second principe permettent de prévoir le sens d'évolution vers l'équilibre ainsi que l'état d'équilibre du système caractérisé par les variables extensives V_1 et V_2 .

Deux exemples simples tirés respectivement de l'électricité et de la mécanique peuvent être traités par analogie avec l'évolution du système thermodynamique :

- * évolution d'un système de deux condensateurs.
- * évolution d'un système de deux ressorts.

Le système électrique est celui de deux armatures de condensateurs reliées l'une à l'autre. Les deux condensateurs peuvent échanger des charges et de l'énergie mais l'ensemble est supposé électriquement et énergétiquement isolé.



Chaque sous-système est caractérisé par une variable extensive (sa charge), sa température et son énergie.

Les lois de conservation de l'énergie et de la charge totales s'écrivent :

$$* \quad d U_1 + d U_2 = 0$$

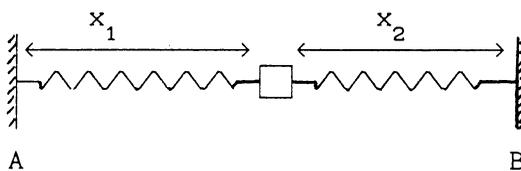
$$* \quad d q_1 + d q_2 = 0$$

La différentielle de l'entropie du système est :

$$* \quad d S = d S_1 + d S_2 =$$

$$\left[\frac{\partial S_1}{\partial U_1} \right]_{q_1} \cdot d U_1 + \left[\frac{\partial S_2}{\partial U_2} \right]_{q_2} \cdot d U_2 + \left[\frac{\partial S_1}{\partial q_1} \right]_{U_1} \cdot d q_1 + \left[\frac{\partial S_2}{\partial q_2} \right]_{U_2} \cdot d q_2$$

De même, un système de deux ressorts, ayant chacun une extrémité fixe, les deux autres extrémités étant reliées, peut être considéré comme énergétiquement isolé et de longueur fixe (AB). Les deux ressorts peuvent échanger de l'énergie et de l'allongement.



Chaque ressort est un sous-système caractérisé par une variable extensive (sa longueur), sa température et son énergie.

Les relations de conservation de l'énergie et de la longueur totales s'écrivent à nouveau :

$$* \quad d U_1 + d U_2 = 0$$

$$* \quad d x_1 + d x_2 = 0$$

et l'entropie :

$$* \quad d S = d S_1 + d S_2 =$$

$$\left[\frac{\partial S_1}{\partial U_1} \right]_{x_1} d U_1 + \left[\frac{\partial S_2}{\partial U_2} \right]_{x_2} d U_2 + \left[\frac{\partial S_1}{\partial x_1} \right]_{U_1} d x_1 + \left[\frac{\partial S_2}{\partial x_2} \right]_{U_2} d x_2$$

L'analogie entre les trois situations peut être résumée par un tableau :

	Thermodynamique	Condensateurs	ressorts
Variable extensive y	V_1, V_2	q_1, q_2	x_1, x_2
$\left[\frac{\partial S}{\partial U} \right]_y$	$\frac{1}{T}$	$\frac{1}{T}$	$\frac{1}{T}$
$\left[\frac{\partial S}{\partial y} \right]_U$	$+\frac{P}{T}$	$-\frac{e}{T}$	$-\frac{F}{T}$
Variable intensive	Pression	Potentiel armature supérieure	Tension (positive si extension, négative si compression)
Equilibre $d S = 0$	$T_1 = T_2$ $P_1 = P_2$	$T_1 = T_2$ $e_1 = e_2$	$T_1 = T_2$ $F_1 = F_2$
Vers l'équilibre ($d S > 0$) en imposant $T_1 = T_2$ à chaque instant	$d V_1$ du signe de $(P_1 - P_2)$	$d q_1$ du signe de $(e_2 - e_1)$	$d x_1$ du signe de $(F_2 - F_1)$

L'analogie conduit aux résultats - connus - que , à températures maintenues égales, l'équilibre est atteint par transfert de charge à partir de l'armature au potentiel le plus élevé ou bien par étirement du ressort le moins fortement étiré.

Le point de départ de l'analogie consiste à déterminer les variables intensives. Celles-ci peuvent être "devinées" en cherchant comment s'exprime, au moyen de la variable extensive, un apport d'énergie élémentaire autre qu'un transfert de chaleur : respectivement

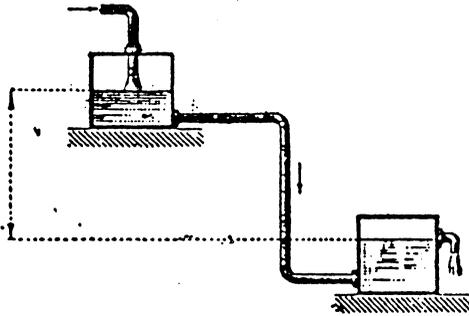
($- P dV$) , ($e dq$) , et ($F dx$) dans les trois cas considérés.

* * *

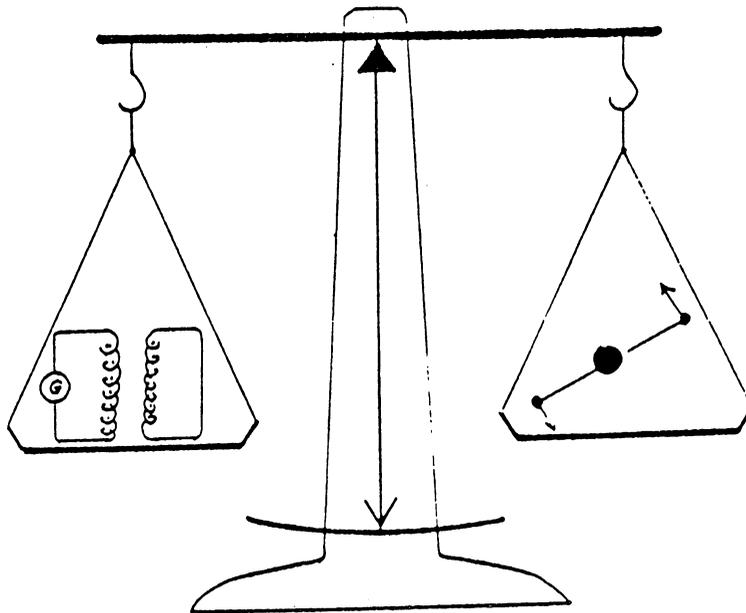
REFERENCES

- [1] P. JEAN : " A la recherche du temps perdu"
B.U.P 642 , p 625 - 652 (1982)

* * *



APPLICATIONS ACTUELLES :
ELEMENTS DE CALCULATEUR ANALOGIQUE

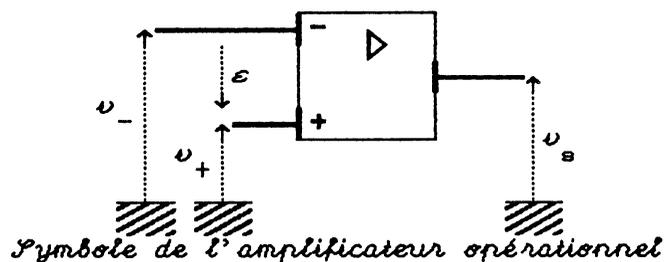


CALCUL ANALOGIQUE ET AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

Il n'est pas question ici de donner une vue exhaustive du calcul dit analogique, c'est-à-dire de la technique consistant à simuler l'état ou l'évolution d'un système physique à l'aide d'un autre système physique en correspondance analogique avec le premier : le sujet est trop vaste et nécessiterait une étude dépassant largement le cadre de cet article¹. En revanche on trouvera ci-après de multiples applications analogiques de l'amplificateur à circuit linéaire intégré plus connu sous l'appellation d'amplificateur opérationnel ou de l'abréviation d'ampli.op..

I/ RAPPELS SUCCINTS SUR L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL IDEAL

Un amplificateur opérationnel est avant tout un amplificateur différentiel (c'est-à-dire ayant pour fonction d'amplifier une différence de tensions) dont la représentation symbolique est la suivante :



¹ Pour avoir une idée des méthodes et de l'utilisation du calcul analogique, on pourra se reporter à l'ouvrage de Jean-Jacques Gleitz (voir bibliographie), bien que cet ouvrage commence à dater un peu : l'emprise du calcul numérique, c'est-à-dire effectué à l'aide d'ordinateurs et de programmes codés en binaire, s'est en effet étendue à bien des domaines qui étaient alors réservés au calcul analogique. On trouvera en bibliographie de cet article d'autres ouvrages traitant du calcul analogique.

Dans la suite, on supposera systématiquement que l'amplificateur fonctionne en régime linéaire, et plus précisément que la tension de sortie v_s est à tout instant directement proportionnelle à la tension différentielle ε , soit² :

$$v_s(t) = \mathcal{A} \cdot \varepsilon(t) = \mathcal{A} \left[v_+(t) - v_-(t) \right] \text{ avec } \mathcal{A} = \text{cte}$$

Dans la pratique \mathcal{A} peut atteindre des valeurs allant de 10^4 à 10^6 , voire plus : l'amplificateur devant être polarisé par une source de tension extérieure, on comprend pourquoi cet amplificateur se sature lorsque $|\varepsilon|$ dépasse un certain seuil de valeurs : l'amplificateur saturé a alors un fonctionnement non-linéaire. On supposera par ailleurs, pour simplifier, que l'amplificateur opérationnel est idéal, c'est-à-dire que :

- le coefficient d'amplification en tension \mathcal{A} est infini (on rappellera cette condition en mettant à côté du symbole \triangleright le signe ∞) ;
- les impédances d'entrée en mode commun sur les bornes "+" et "-" sont infinies ;
- l'impédance d'entrée différentielle Z_o mesurée entre les bornes "+" et "-" en régime harmonique est infinie ;
- l'impédance de sortie Z_s est nulle³.

Ces quatre conditions (dont on s'écarte assez peu dans la

² Plus généralement, un fonctionnement linéaire signifie que tension de sortie et tension d'entrée sont mise en relation à l'aide d'équations différentielles linéaires.

³ Les écarts à l'idéalité des amplificateurs réels sont les suivants : \mathcal{A} est de l'ordre de 10^4 à 10^6 comme nous l'avons vu, les impédances d'entrée varient du mégohm au térohms, l'impédance de sortie n'excède pas quelques dizaines d'ohms. A cela s'ajoutent les imperfections résultant des asymétries intrinsèques et des nécessités de la polarisation (existence de courants de polarisation de l'ordre de quelques dizaines de nanoampères, d'une tension d'offset de quelques millivolts), les problèmes de dérive thermique et structurelle, l'existence d'une bande passante... On se contentera de savoir qu'il est possible d'"habiller" l'ampli. op. de diverses manières pour limiter ces défauts.

pratique) ont pour conséquences immédiates que :

- pour une tension de sortie v_s observée, la tension différentielle ϵ doit être considérée comme quasiment nulle et donc que v_+ est pratiquement égal à v_- ($v_+ \simeq v_-$) ;
- les courants d'entrée i_+ et i_- sont pratiquement nuls ($i_+ = i_- = 0$).
- la tension de sortie ne varie pas lorsque l'on charge l'amplificateur (absence de chute de tension en charge).

Le schéma équivalent d'un amplificateur opérationnel idéal en régime linéaire est donc le suivant :

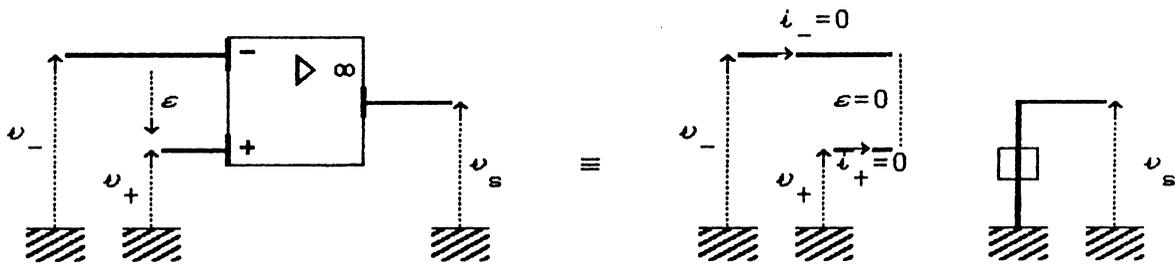


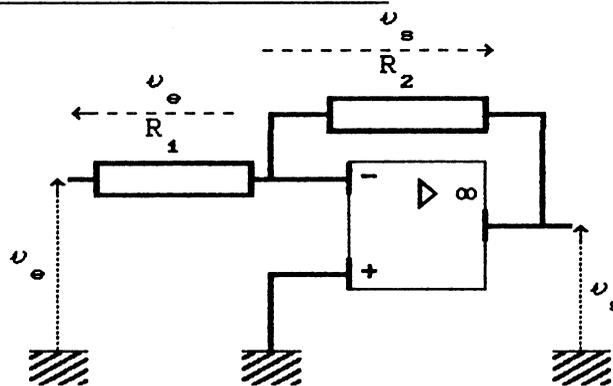
Schéma équivalent d'un amplificateur idéal en régime linéaire

II/ DE L'AMPLIFICATEUR A L'OPERATION

Les propriétés de l'amplificateur idéal lui permettent d'être utilisé, en régime linéaire, pour de multiples fonctions (filtres, déphaseurs, oscillateurs,...). La fonction principale, d'où il tire son qualificatif, reste toutefois celle de réaliser des opérations, c'est-à-dire de lier algébriquement des grandeurs de sortie aux grandeurs d'entrée. Nous nous proposons dans ce paragraphe de rappeler les opérations de base que l'on peut réaliser avec un amplificateur opérationnel.

II.1) Multiplication par une constante

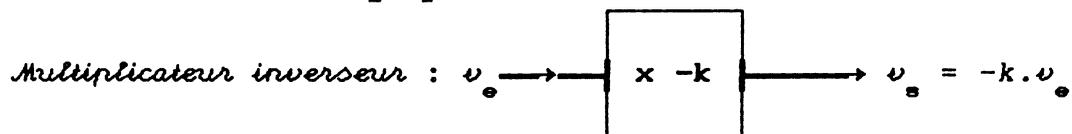
II.1.a) Multiplicateur inverseur



En exprimant le fait que $v_- \approx 0$ et que R_1 et R_2 sont traversées par la même intensité, on obtient ainsi :

$$v_s = -\frac{R_2}{R_1} v_e = -k \cdot v_e$$

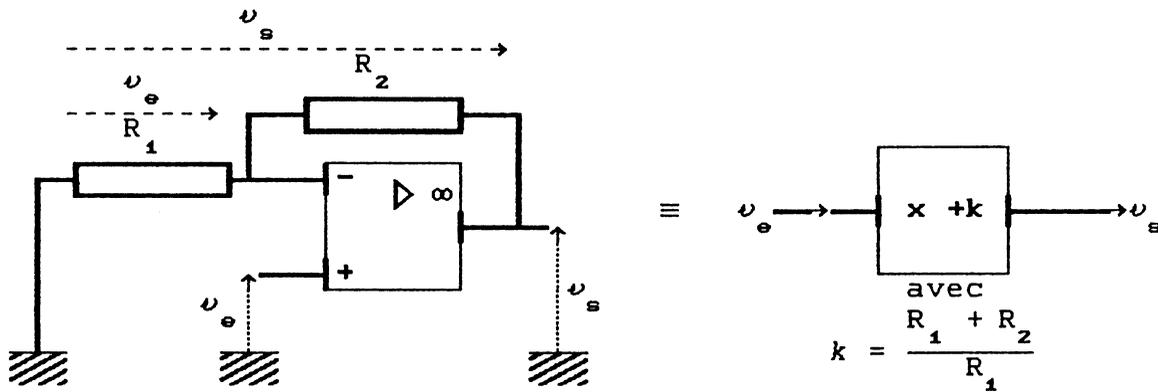
On constate donc que la tension de sortie est égale à la tension d'entrée multipliée par un nombre négatif. On peut donc représenter la fonction réalisée par ce circuit à l'aide du schéma bloc suivant (avec $k = R_2/R_1$) :



En faisant varier R_2 , on peut alors faire varier le facteur multiplicateur.

II.1.b) Multiplicateur non-inverseur

Pour multiplier une grandeur par un nombre positif, on pourrait faire suivre un multiplicateur inverseur d'un multiplicateur par "-1" ; une solution plus élégante consiste à réaliser le montage suivant :



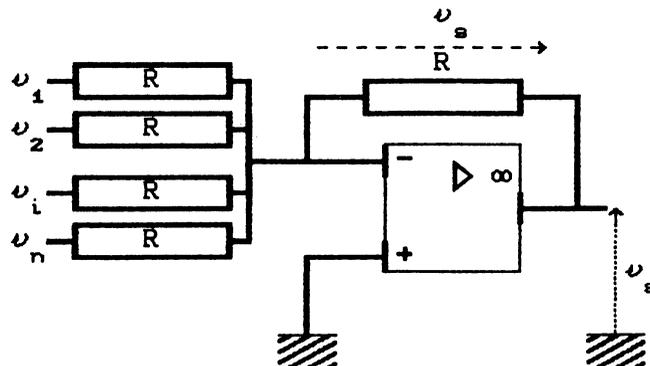
Multiplicateur non inverseur

Si R_1 est infinie, on constate que $k = 1$: on réalise ainsi un montage suiveur ou encore la fonction identité (permettant de réaliser une adaptation en tension entre deux étages en utilisant le fait que l'impédance de sortie de l'amplificateur opérationnel est nulle et donc qu'il n'y a pas de chute de tension lorsqu'on charge celui-ci).

II.2) Sommateur-Différentiateur

II.2.a) Sommateur

Les montages sommateurs-inverseurs ont la structure suivante :

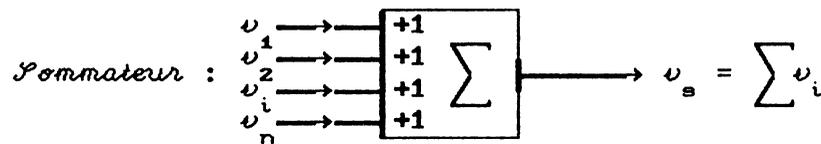


En utilisant la loi des noeuds sur la borne "-", on montre

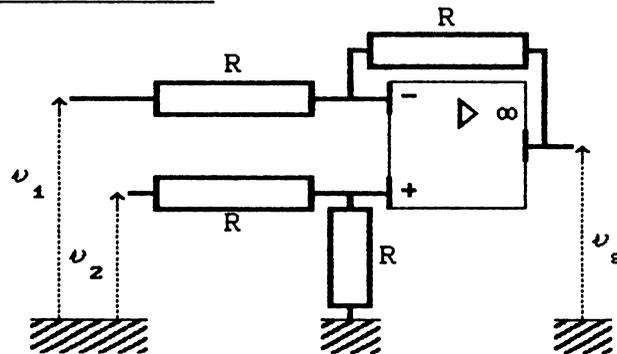
aisément que :

$$v_s = - \sum_{i=1}^n v_i$$

Si l'on ne veut pas qu'il y ait inversion, on peut faire suivre le bloc précédent par un multiplicateur "-1" ou encore attaquer l'amplificateur sur la borne "+" avec un jeu de résistances convenable. On représentera alors cette fonction par le schéma bloc suivant :



II.2.b) Différentiateur

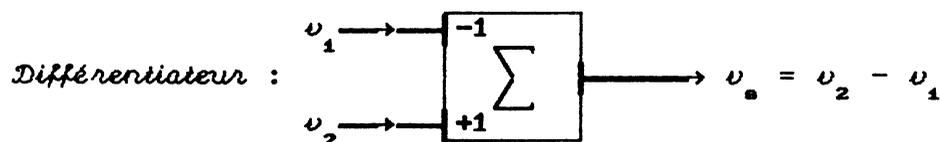


Différentiateur

En exprimant l'égalité entre la tension v_+ et la tension v_- , on montre aisément que :

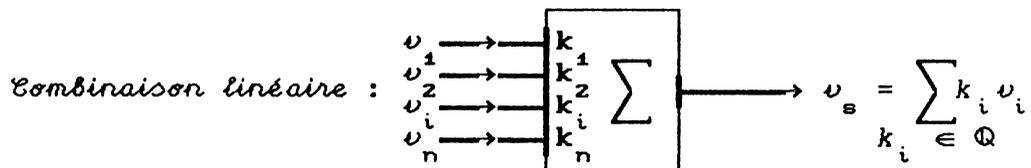
$$v_s = v_2 - v_1$$

et donc que l'on a réalisé une différence entre les tensions d'entrée. On représentera un tel montage grâce au schéma-bloc suivant :



II.2.c) Combinaison linéaire

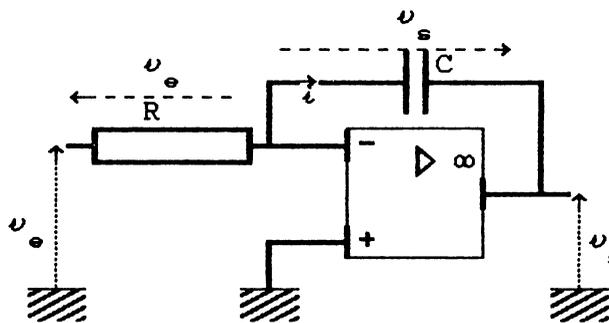
On conçoit que si l'on fait varier les résistances attaquées par les tensions d'entrée dans un sommateur cela revient à pondérer ces tensions d'entrée par un facteur positif ; par ailleurs, si l'on combine sommateur et différentiateur, on pourra ainsi réaliser une combinaison linéaire des tensions d'entrée, combinaison linéaire que l'on représentera sous la forme :



II.3) Intégrateur-Dérivateur

II.3.a) Intégrateur

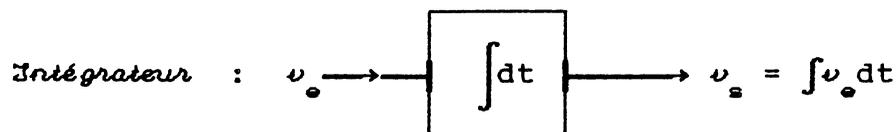
La structure élémentaire d'un intégrateur est la suivante :



Sachant $v_e = R.i$ et que $i = -\dot{q} = -C.\dot{v}_s$ (dérivée temporelle en notation de Newton), on en déduit que :

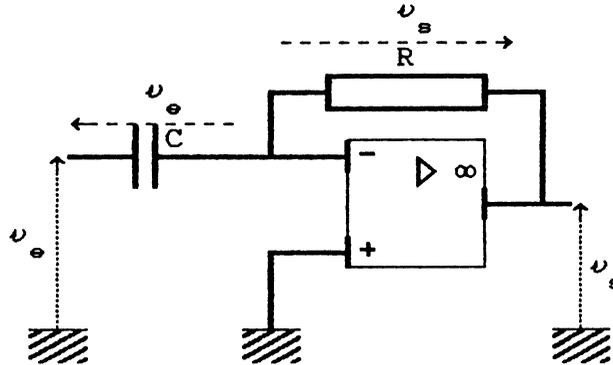
$$v_s = -\left[\frac{1}{R.C}\right] \int_0^t v_e(\theta) d\theta$$

Un tel montage permet donc d'obtenir à un facteur multiplicatif près l'intégrale de la tension d'entrée. En faisant suivre ce montage d'un multiplicateur inverseur, on pourra ainsi réaliser l'intégrale pure et simple de la tension v_e et on représentera cette opération par le schéma bloc suivant :



II.3.b) Dérivateur

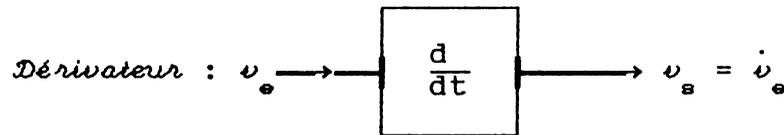
Un dérivateur a la structure élémentaire suivante :



Comme précédemment on démontre que :

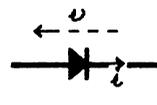
$$v_s = -(RC) \dot{v}_e$$

et, en faisant suivre ce montage par un multiplicateur inverseur, on peut ainsi réaliser la fonction dérivation :



II.4) Logarithme-Exponentielle

On peut obtenir le logarithme ou l'exponentielle de la tension d'entrée grâce à un montage utilisant une jonction semi-conductrice⁴. On sait en effet que l'intensité traversant une telle jonction est liée à la tension entre ses bornes de la façon suivante (loi de Shockley) :

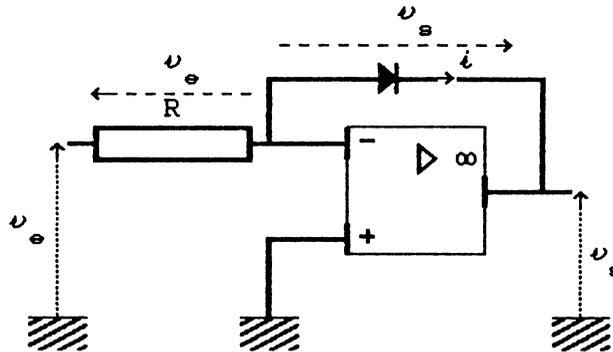


$$i = I_s \left[\exp \left(\frac{e \cdot v}{k \cdot T} \right) - 1 \right]$$

où I_s est l'intensité dite de saturation, e la charge de l'électron, k la constante de Boltzmann et T la température

⁴ On pourrait utiliser une diode, mais dans la pratique on utilise plutôt un transistor pris entre son collecteur et son émetteur avec sa base à la masse, ce qui permet d'étendre la plage de fonctionnement. Compte tenu de la loi qui les régit, de tels amplificateurs devront être stabilisés en température.

absolue. On obtient ainsi l'amplificateur logarithmique :

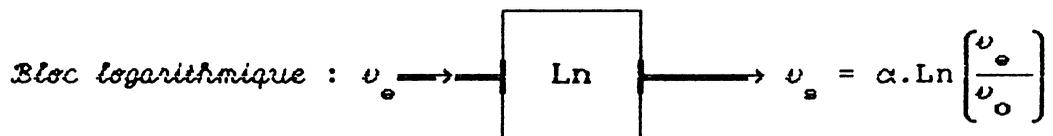


Amplificateur logarithmique

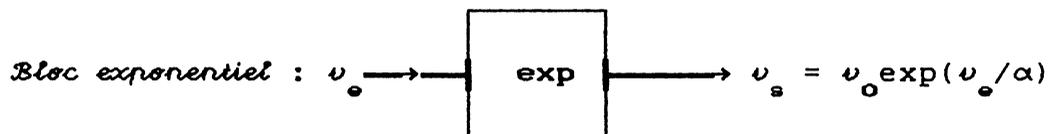
On a en effet, en posant $\alpha = kT/e$ et $v_0 = R.I_s$:

$$v_e = R.i = v_0 \left[\exp(-v_s/\alpha) - 1 \right] \Rightarrow v_s = -\alpha \cdot \text{Ln} \left[\frac{v_e}{v_0} + 1 \right]$$

Pratiquement on fera en sorte que le rapport des tensions v_e/v_0 soit grand devant 1 et on pourra effectuer une inversion à la suite de l'amplificateur logarithmique de façon à obtenir le bloc suivant :



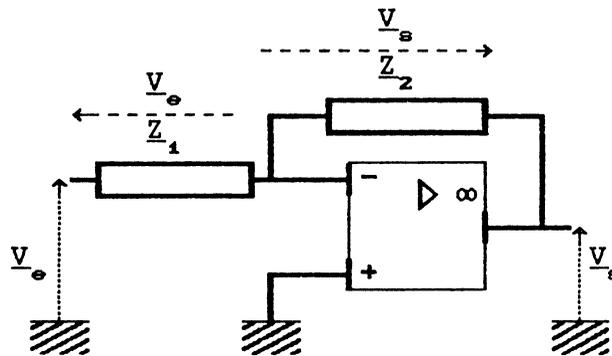
En permutant diode et résistance et lorsque v_e est très supérieur à α , on obtient l'amplificateur exponentiel de schéma bloc :



II.5) Représentation harmonique

Tant que le fonctionnement des dispositifs reste linéaire, on sait que l'utilisation de la transformation de Fourier permet de privilégier l'étude de la réponse harmonique des dispositifs, c'est-à-dire l'étude de la grandeur de sortie de ces dispositifs

lorsque l'entrée est sinusoïdale. Ainsi, à titre d'exemple, étudions le montage suivant :



On montre aisément que le coefficient d'amplification en tension complexe du dispositif a pour expression :

$$\underline{A}_v = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

On retrouve alors la relation différentielle entre v_s et v_e en effectuant les correspondances opérationnelles suivantes :

$$\begin{aligned} j \cdot \omega \cdot \underline{V} &\longleftrightarrow \dot{v} \\ -\omega^2 \underline{V} &\longleftrightarrow \ddot{v} \\ \frac{1}{j\omega} \underline{V} &\longleftrightarrow \int v \cdot dt \\ &\text{etc...} \end{aligned}$$

Par exemple si Z_1 est une résistance R et Z_2 une capacité C , on aura :

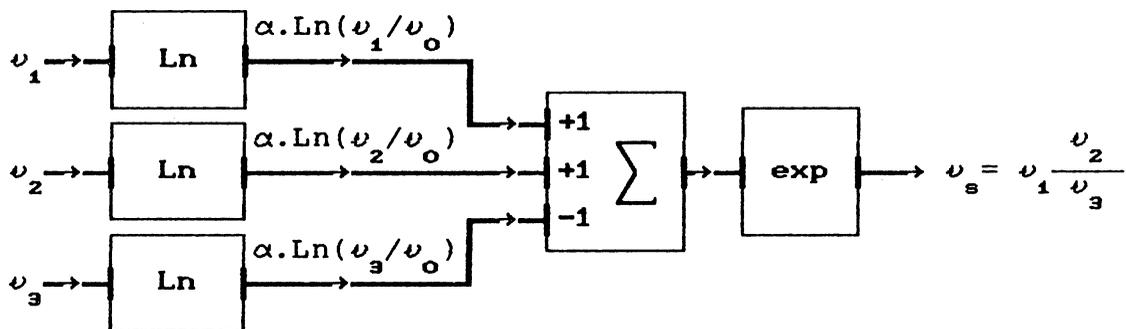
$$\underline{A}_v = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{1}{RC \cdot j\omega} \rightarrow V_s = -\frac{1}{RC \cdot j\omega} \cdot V_e \rightarrow v_s = -\frac{1}{R \cdot C} \int v_e \cdot dt$$

Cette méthode permet de trouver assez rapidement la fonction que réalise tel ou tel circuit (qui est ici un intégrateur).

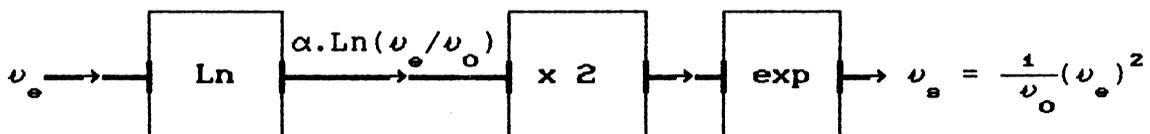
III / APPLICATIONS ANALOGIQUES

III.1) Multiplication algébrique de grandeurs

Supposons que l'on ait à réaliser l'opération "règle de trois" $v = v_1 \frac{v_2}{v_3}$ à l'aide des tensions images v_1 , v_2 et v_3 . On peut réaliser une telle opération à l'aide d'amplificateurs logarithmiques, d'un amplificateur exponentiel et d'une combinaison linéaire intervenant dans le schéma-bloc suivant :



On réalisera de même le carré d'une grandeur de la manière suivante :



On généralise ainsi aisément à la simulation de puissances algébriques quelconques de grandeurs physiques.

III.2) Equation différentielle linéaire du premier ordre

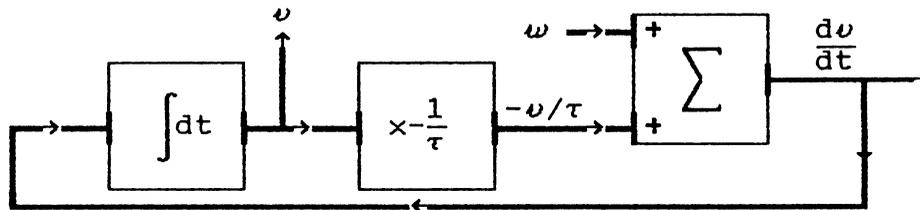
Supposons que l'on ait à simuler l'évolution d'un système régi par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = w(t),$$

où τ est une constante de temps et $w(t)$ une excitation quelconque.

Soit v l'image de $v(t)$ et ω celle de $w(t)$. Sachant que v est l'intégrale de $\frac{dv}{dt}$ et que l'on peut écrire $\frac{dv}{dt} = -\frac{v}{\tau} + w(t)$, on

peut simuler l'équation précédente à l'aide des schémas blocs suivants :



Simulation d'un système du premier ordre

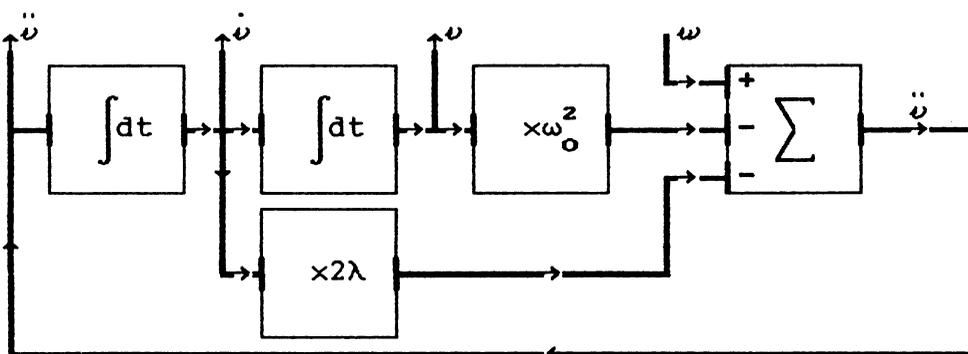
On aura ainsi accès simultanément à la grandeur v et à sa vitesse.

III.3) Equation différentielle linéaire du second ordre

Soit de même un système régi par une équation différentielle du type :

$$\ddot{v} + 2\lambda \dot{v} + \omega_0^2 v = w(t)$$

Sur le même principe que précédemment, on pourra simuler cette évolution grâce au système suivant :

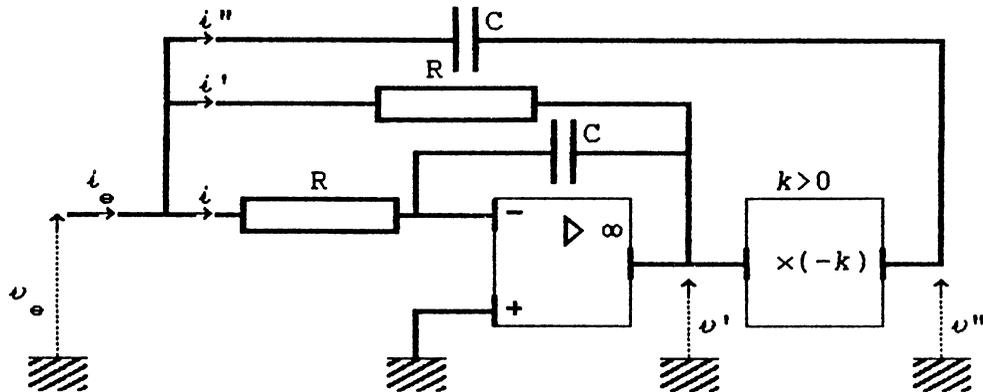


Simulation d'un système du second ordre

On obtient ainsi simultanément la grandeur v , sa vitesse et son accélération.

III.4) Circuit R-L-C... sans L

Soit le circuit suivant :



Ce circuit permet de simuler un circuit $\{R,L,C\}$ sans élément inductif : cet aspect est intéressant car ce dernier composant est en général assez difficile à mettre en oeuvre et possède un facteur de fiabilité relativement modeste. Comme on le voit dans le schéma de principe, le montage proposé ne met en oeuvre que des résistances, des capacités et évidemment des amplificateurs opérationnels.

Le système d'équations régissant ce montage est le suivant :

$$\begin{aligned} - v'' &= -k.v' & ; & \quad i_0 = i + i' + i'' \\ - i &= -C.\frac{dv'}{dt} & ; & \quad i' = \frac{v_0 - v'}{R} & ; & \quad i'' = C.\frac{d}{dt}(v_0 - v'') \\ - v_0 &= R.i \end{aligned}$$

En exprimant toutes les tensions en fonction de v_0 , on obtient alors :

$$i_0 = \frac{v_0}{R} + \frac{v_0 + (RC)^{-1} \int v_0 dt}{R} + C.\frac{d}{dt} \left[v_0 - k(RC)^{-1} \int v_0 dt \right]$$

soit
$$i_0 = (2-k)\frac{v_0}{R} + C.\dot{v}_0 + (R^2C)^{-1} \int v_0 dt$$

On constate que le montage proposé est équivalent à :



Ainsi, grâce à un tel circuit et en faisant varier k , on peut passer continûment d'une résistance positive à une résistance négative, soit un passage continu du fonctionnement en résonateur à celui en oscillateur.

POUR ALLER PLUS LOIN

Bien sûr, dans l'étude qui précède, nous n'avons pas tenu compte des imperfections de l'amplificateur, imperfections qu'il faut impérativement limiter si l'on ne veut pas que le montage ait un fonctionnement aberrant : par exemple, une tension d'offset en tête d'intégrateur donnera une "rampe" en sortie et conduira donc nécessairement l'amplificateur à un état de saturation au bout d'un certain temps.

Par ailleurs, nous n'avons pas abordé la question incontournable en calcul analogique de la mise à l'échelle, à savoir :

— mise à l'échelle en amplitude : chaque amplificateur présente une tension de saturation ; il faut donc faire en sorte que la réponse de chacun de ces amplificateurs ait une amplitude inférieure à cette tension de saturation, sinon l'amplificateur aura un fonctionnement non linéaire. Pour cela, on peut être amené à pondérer les grandeurs à l'aide de multiplicateurs par une constante.

— mise à l'échelle en temps : on peut vouloir obtenir la représentation simulée d'un processus physique sur une table traçante ; or une telle table est limitée dans ses temps de réponse et le processus physique réel peut être ou très rapide ou très lent. Il faudra donc faire une homothétie sur le temps pour que le calculateur analogique puisse répondre correctement en temps aux stimuli. Il faudra aussi tenir compte des temps de réponse des différents blocs, temps de

réponse qui n'apparaissent pas, a priori, sur les schéma de principe.

Ces problèmes de mise à l'échelle ne sont pas toujours très simples à résoudre et il faut parfois avoir recours au tâtonnement pour obtenir un fonctionnement exploitable d'un calculeur analogique. C'est d'ailleurs souvent cet aspect de la question qui fait que l'on préfère avoir recours, quand c'est possible, au calcul numérique.

* * *

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

J.BOUTIGNY, Circuits électroniques et amplificateur opérationnel, Vuibert, Paris, 1985

R.DAMAYE, L'amplificateur opérationnel, principes et applications, Editions Radio, Paris, 1974

J.J. GLEITZ, Le calcul analogique, Que sais-je ? Presses Universitaires de France, Paris, 1968

C.GROSSETETE, Electronique : opérateurs analogiques et amplificateur opérationnel réel, Ed. Ellipses, Paris, 1987

B.JECH, Simulation analogique d'un circuit d'électronique de puissance, rapport de D.E.A., Orsay, 1977

C.MASSELOT, M.GIRARD, Electronique non linéaire (2 tomes), Masson, Paris, 1975

F.MILSANT, Cours d'électronique : amplification, circuits intégrés, Eyrolles, Paris, 1974

Notice d'utilisation du calculateur ANALAC 110 (à courant porteur)

* * *

TITRE : L'ANALOGIE EN PHYSIQUE

Tome 2 : Aspect interdisciplinaire et pédagogique

AUTEURS : N. CHAUMAT
C. ETASSE
J. HAUCHEMAILLE
B. JECH
M. LOBRY
B. MAHEU

PUBLIC CONCERNE : Enseignants en Sciences Physiques
Historiens des Sciences

RESUME :

L'utilisation pédagogique de l'analogie a d'abord été abordée dans ses aspects généraux (pédagogie, linguistique, logique ...) et ensuite étudiée dans les manuels de physique de l'enseignement secondaire de 1883 à 1914, dans le domaine de l'électricité.

Aujourd'hui, en quoi l'analogie est-elle un outil pédagogique et quelles sont les applications actuelles ?

MOTS CLES : Analogie
Histoire de la physique
Dosages
Propagation des ondes
Thermodynamique
Calculateur analogique

DATE : Juin 1992 ; FORMAT : A4, 115 pages

PRIX : 45 F

N° ISBN : 2-86239-041-0 ; dépôt légal : 3ème trimestre 1992.

PUBLICATION :

I.R.E.M. de ROUEN - Université de Haute Normandie

1 Rue Thomas Becket
BP 153
76130 Mont Saint Aignan

Bon de commande

M. , Mme, Mlle :

Adresse :

Libellé

Prix

Quantité

Total

L'ANALOGIE EN PHYSIQUE II 45.00 F

Frais d'envoi : 10 F pour le 1^{er} livre et 5 F par livre supplémentaire (France)

Frais réels pour l'étranger

SOMME DUE :

Les chèques de règlement seront libellés à l'ordre de :

L'AGENT COMPTABLE DE L'UNIVERSITE DE ROUEN

Et adressés directement à l'I.R.E.M. - B.P. 153 - 76135 MONT SAINT AIGNAN

Pour tout renseignement complémentaire Tél. : 35.14.61.41.

RIB : TP ROUEN TG 10071 76000 00044004056 81
