

Le laboratoire de physique

Suggestions pour une autre approche

LABORATOIRE

2001

par **Liliane GUSMAN** et **Jacques WENDERICKX**
.....
'8 '8ydU ° V'



INFORSCIENCES
UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

FACULTÉ DES SCIENCES
Campus de la Plaine, CP260 - Boulevard du Triomphe - B-1050
Bruxelles
T 02 650 50 24 F 02 650 54 02 M inforSCIENCES@ulb.ac.be
W www.ulb.ac.be/inforSCIENCES



Les Cahiers du CeDoP
Centre de Documentation Pédagogique de l'ULB

ISBN 2-930089-64-4
Dépôt légal D/2001/6890/1

Préface

Il y a quelques années encore, les élèves qui choisissaient une option « sciences fortes » profitaient, en même temps, de séances de laboratoire de sciences. Malheureusement, il semble bien que la « pratique de laboratoire » ait aujourd'hui pratiquement disparu de la plupart des établissements d'enseignement secondaire, même dans les options à finalité scientifique, et cela dans chacune des trois sciences : physique, chimie et biologie. Ceci est regrettable du point de vue de l'enseignement des sciences expérimentales et naturelles mais c'est aussi un grand gâchis car la plupart de nos écoles sont équipées de salles de laboratoire bien conçues et le matériel coûteux et performant qui s'y trouve n'est plus employé par les élèves.

Nous pensons aussi que c'est une perte qui dépasse largement le cadre de l'enseignement des sciences. La « pratique de laboratoire » dans l'enseignement secondaire est une occasion de développer l'esprit critique de nos jeunes élèves et de mieux les préparer à aborder l'avalanche d'informations qu'ils seront amenés à analyser au cours de leur vie.

Nous espérons de plus que le désir d'introduire l'informatique à l'école relancera l'intérêt pour le laboratoire car l'ordinateur y trouve naturellement sa place en tant que

moyen moderne de traiter l'information. C'est ce que nous tenterons de montrer dans cette brochure.

Nous y présentons une expérience de physique en rapport avec une notion de base dans le domaine de l'électricité, la mesure de caractéristiques de composants purement résistifs. Nous avons choisi ce sujet pour des raisons techniques : *c'est un sujet élémentaire*. En effet il n'est pas imaginable de penser que l'on maîtrise la matière d'un cours d'électricité si l'on n'est pas capable de mesurer la caractéristique d'une résistance. *Ces mesures ne demandent pas un matériel coûteux* : un petit générateur de courant continu et deux multimètres de modèle courant comme on en trouve dans toutes les grandes surfaces. De surcroît, ces séances de laboratoire permettent aux élèves de se familiariser avec l'usage d'un multimètre, objet dont les applications pratiques, nous dirons ménagères, sont des plus nombreuses.

La finalité de la « pratique de laboratoire » est totalement différente de celle d'un cours ex cathedra. *Il s'agit d'une manipulation de physique et non d'une démonstration expérimentale faite au cours*. Bien sûr, l'élève doit connaître la matière qui s'y rapporte avant de faire des mesures au



laboratoire, de la même façon qu'une bonne connaissance préalable d'une langue est indispensable pour comprendre le contenu d'un article de journal, par exemple. Au laboratoire, l'élève est *confronté au monde réel* et nous cherchons à développer chez lui d'autres aptitudes : *l'observation et l'analyse critique de phénomènes*.

Le dépouillement des mesures conduit évidemment à la description mathématique des observations, c'est-à-dire à l'établissement d'un modèle tel que celui de la loi d'Ohm. Ce modèle, pour être utile, doit lui-même déboucher sur ce qui est l'objet principal des sciences, c'est-à-dire faire des prévisions. Le retour au laboratoire permet ensuite de voir si *les expériences confirment ou infirment la validité du modèle*.

Le sujet présenté ici a une valeur d'exemple. Il ne s'agit pas du tout de présenter des feuilles de laboratoire à suivre par les élèves, mais d'une suite de réflexions provenant de réactions d'enseignants et d'élèves qui ont effectivement participé à une séance de travaux pratiques proche de celle présentée ici. Cette brochure s'adresse aux enseignants pour leur montrer dans quel esprit un thème de physique peut être abordé au laboratoire. Mais l'attitude critique que nous avons adoptée ne s'applique pas qu'à la physique, elle convient tout aussi bien à la chimie et à la biologie. De plus, l'analyse statistique de toute donnée expérimentale fait appel à des mathématiques, élémentaires certes, mais dont la bonne compréhension est indispensable. Pourquoi quelques heures du cours de mathématique ne

seraient-elles pas consacrées à la statistique de base ? Les deux heures d'initiation aux études supérieures, si souvent attribuées au cours de mathématique, pourraient bien servir à développer ce type de compétences.

Nous croyons aussi qu'un enseignement expérimental de ce type doit déboucher sur le renforcement de compétences transversales en sciences en mettant l'accent sur ce qu'est vraiment l'attitude scientifique plutôt que sur des connaissances trop vite oubliées. Finalement, remarquons que les techniques utilisées dans cette brochure, notamment l'analyse statistique des données sont d'application dans de nombreux autres domaines, pensons à la médecine, la géographie... mais également aux sciences économiques, humaines, sociales... où les analyses graphiques de données sont courantes.

Je tiens à remercier Messieurs A. Bouchard (Physique Biomédicale) et P. Pirotte (Physique Statistique et Résonance Magnétique), tous deux spécialistes des mesures électriques. Leurs compétences dans ce domaine, ainsi que leurs expériences pédagogiques nous ont beaucoup aidé. Merci aussi à mes collègues F. Masin, avec qui j'ai eu l'occasion de discuter souvent du contenu de ce projet, et P. Broekaert, pour sa lecture critique et très attentive du texte. Leur expérience - ils sont tous deux physiciens expérimentateurs - a apporté la touche finale à ce projet.

G. Gusman



TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	2
CHAPITRE 1. REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DE QUELQUES FONCTIONS	
MATHÉMATIQUES.....	5
1.1 Graphique de la fonction linéaire homogène $y = 4x$	5
1.2. Graphique de la fonction linéaire homogène $y = 4x$ « bruitée »	6
1.3. Graphique à partir de points au hasard avec ajustement linéaire	8
1.4. Graphique à partir de points au hasard avec ajustement polynomial	9
CHAPITRE 2. CARACTÉRISTIQUE $I(U)$ D'UNE RÉSISTANCE OHMIQUE.....	11
2.1. Introduction	11
2.2. Caractéristique $I(U)$ d'une résistance ohmique	12
CHAPITRE 3. CARACTÉRISTIQUES DE RÉSISTANCES NON LINÉAIRES : UNE AMPOULE ET UN FUSIBLE.....	17
3.1. Caractéristique $U(I)$ d'une ampoule à filament de tungstène.....	17
3.2. Caractéristique $U(I)$ d'un fusible.....	19
CHAPITRE 4. CARACTÉRISTIQUES DE L'ASSOCIATION EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE D'UNE RÉSISTANCE OHMIQUE ET D'UNE AMPOULE	21
4.1. Caractéristiques respectives de la résistance ohmique et de l'ampoule	21
4.2. Caractéristique de l'association en série de la résistance ohmique et de l'ampoule	22
4.3. Caractéristique de l'association en parallèle de la résistance ohmique et de l'ampoule	23
CHAPITRE 5. CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS	24
ANNEXE. QUELQUES GRANDEURS STATISTIQUES UTILISÉES POUR TRAITER DES MESURES EXPÉRIMENTALES.....	26



Introduction

Il est agréable de communiquer aux jeunes l'excitation et l'enthousiasme que l'on peut ressentir lorsqu'on arrive à résoudre un problème et, dans ce but, de leur permettre de s'initier à quelques méthodes générales du travail scientifique.

Une place privilégiée doit être accordée aux séances de travaux pratiques où les jeunes pourront apprendre comment les sciences expérimentales permettent de comprendre le monde réel par une pratique du questionnement et de la modélisation. D'ailleurs, en sciences, la partie la plus importante du travail d'un chercheur est d'obtenir un modèle mathématique qui décrit correctement les traits principaux des phénomènes qu'il étudie.

Si les démonstrations expérimentales faites par le professeur sont un complément indispensable au cours de physique, c'est seulement lors d'un travail personnel au laboratoire que l'élève sera confronté avec la réalité. Il apprendra à observer de façon critique et devra faire preuve d'initiative pour résoudre les problèmes qui se présenteront à lui. Il réfléchira à la précision des mesures et découvrira la différence entre une donnée expérimentale et un résultat

mathématique. Pour tirer un maximum de renseignements de son travail, les données expérimentales seront introduites dans un tableur et feront l'objet d'une représentation graphique, ce qui en facilitera l'analyse.

Les manuels présentent trop souvent la physique dans le même style que les mathématiques. En effet, les objets d'étude y sont, par essence, bien définis, simples et facilement identifiables comme une droite, une circonférence, un triangle...

Dans les sciences expérimentales, et en particulier en physique, c'est au chercheur de distinguer parmi les paramètres qui interviennent dans le phénomène observé ceux qui sont importants de ceux qui sont secondaires voire négligeables.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser notamment à la résistance électrique d'un conducteur. Nous allons d'abord supposer que celle-ci a une valeur bien définie, c'est-à-dire indépendante de paramètres comme la différence de potentiel à ses bornes ou le courant qui la traverse, sa température... Nous allons effectivement constater que si le modèle de la résistance ohmique est une première approche valable parce que simple



du phénomène réel, son application est limitée à un domaine de validité, que les manuels négligent souvent de mentionner. Nos points expérimentaux, dans le cas d'une ampoule ou d'un fusible, n'obéiront plus à une caractéristique linéaire. Mais nous verrons par la suite que nous pouvons adapter le modèle initial en tenant compte du rayonnement du fil d'une ampoule ou de l'élévation de température du fil d'un fusible. À nouveau, notre description théorique sera en bon accord avec les mesures expérimentales jusqu'à rencontrer de nouvelles limitations produites par exemple par la fusion du fil du fusible ou de l'ampoule.

Le domaine d'utilisation des compétences acquises au laboratoire dépasse largement le cadre de la physique. L'utilisation de l'ordinateur lors de l'acquisition et du traitement des données expérimentales permet d'initier l'élève à la statistique. Cela lui permet d'acquérir une technique qu'il pourra utiliser pour comprendre comment on tente de répondre à des questionnements dans d'autres domaines, par exemple les prévisions du temps, de ventes, de récoltes, de performances sportives... Certaines prévisions sont plus probables que d'autres, grâce à une plus forte relation entre les variables. On peut, dans une certaine mesure, comparer la démarche scientifique à la résolution d'une énigme policière, où, à partir de renseignements et d'informations écrites et orales, on essaie de formuler plusieurs explications parmi lesquelles on tente de retenir la bonne. Parfois, éliminer

une possibilité est une meilleure stratégie que de chercher à prouver la validité d'une hypothèse ; on le constate notamment dans la pratique du jeu Mastermind®, où des propositions donnant lieu à des réponses négatives conduisent parfois très rapidement à la solution.

Comme nous le verrons par la suite, nous arrivons au laboratoire avec un objectif, celui de faire dialoguer la théorie et l'expérience. Nous y entrons avec la connaissance de *lois physiques* comme la loi d'Ohm, les lois de Kirchhoff... et l'intention de mesurer des *grandeurs physiques* telles que le courant électrique, la différence de potentiel aux bornes d'un élément... Le dialogue va pouvoir s'établir et nous allons voir si le phénomène observé accepte d'entrer dans le schéma que nous avons prévu, dans le cadre pour lequel nous avons élaboré un modèle explicatif. S'il s'y refuse et que les expériences montrent que notre modèle ne convient pas, il faudra revoir la théorie, rechercher une autre description raisonnable qui nous conduira à un nouveau modèle qui sera, lui aussi, confronté à nos mesures.

Dans cette brochure, nous n'avons pas insisté sur d'autres étapes importantes de la démarche scientifique comme l'utilisation de certaines méthodes d'observation, de mesure et de consignation, la conception et l'exécution d'expériences ou la rédaction d'un rapport ou protocole... objectifs qui, de façon générale, sont habituellement bien rencontrés dans nos enseignements.



Ces pages s'adressent aux enseignants et proposent une autre façon d'aborder le laboratoire de physique en rendant la participation de l'élève plus active en faisant appel à son esprit critique. Nous n'avons pas voulu nous substituer au professeur dans leur démarche pédagogique en rédigeant une sorte de « cahier de laboratoire ». On pourrait, par exemple, au début de la séance de laboratoire donner à chaque élève trois

résistances : une ohmique, une ampoule et un fusible en lui demandant de mesurer leurs caractéristiques $U(I)$. Il découvrira par lui-même que les points s'alignent au long d'une droite pour la résistance ohmique et pas du tout pour les deux autres. Il conclura que la loi d'Ohm est un bon modèle pour la première alors que d'autres modèles devront être imaginés pour rendre compte des deux autres caractéristiques.

Chapitre 1.

Représentations graphiques de quelques fonctions mathématiques

Afin de bien comprendre la signification du traitement des données expérimentales que nous utilisons au laboratoire, nous allons commencer par quelques exemples de représentation de fonctions purement mathématiques du type $y = f(x)$.

1.1 Graphique de la fonction linéaire homogène $y = 4x$

Pour dessiner cette fonction, nous construisons un tableau. Nous choisissons quelques valeurs pour la *variable indépendante*, x , celle que l'on fait varier, à côté desquelles nous trouvons les valeurs correspondantes prises par y , la *variable dépendante*.

Remarque : Nous avons volontairement pris plus de deux couples de valeurs bien que, dans cet exemple de fonction linéaire, ce ne soit pas indispensable.

x	y
0.00	0.00
1.00	4.00
2.00	8.00
3.00	12.00
4.00	16.00
5.00	20.00

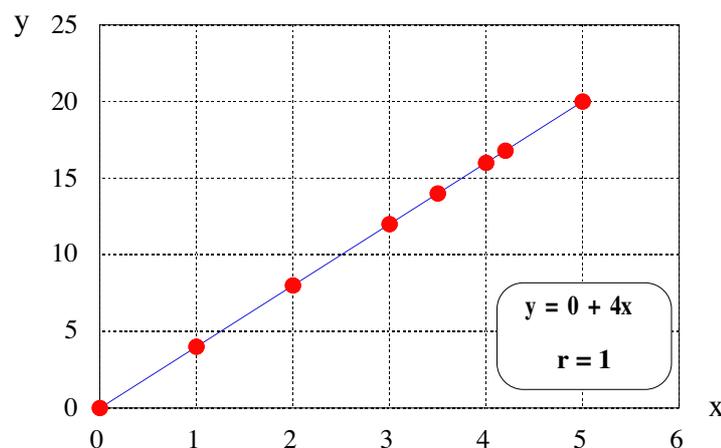


Figure 1. Graphique de la fonction $y = 0 + 4x$

À partir du tableau, nous construisons un graphique en affichant tout d'abord les nuages de points (scatter plot), puis, à l'aide d'un logiciel de traitement de données, nous demandons à l'ordinateur de faire passer la « meilleure » droite par ceux-ci. L'ajustement montre que la droite passe parfaitement par les points. En effet, le logiciel statistique lui attribue une évaluation qu'il appelle r et qui vaut ici 1. Nous verrons un peu plus loin la signification précise de r .

1.2. Graphique de la fonction linéaire homogène $y = 4x$ « bruitée »

Regardons ce qui se passe si l'on s'écarte de la situation idéale précédente en ajoutant du « bruit » à x et y . Pour cela, nous ajoutons à la « valeur mathématique » de x un nombre choisi aléatoirement entre $-0,2$ et $+0,2$ et à celle de y un nombre choisi aléatoirement entre $-0,5$ et $+0,5$. Comme ces nombres sont aléatoires, la somme des écarts à la vraie valeur tend vers zéro pour un grand nombre de points. L'ajout de bruit aux valeurs exactes de x et de y peut ne paraître qu'un jeu pour l'instant, mais il simule le bruit expérimental qui accompagne toute mesure. Même si les mesures ne sont pas entachées d'erreurs systématiques, elles sont sujettes à un bruit aléatoire, c'est-à-dire des fluctuations autour d'une valeur moyenne.

x	bruit sur x	x avec bruit	y	bruit sur y	y avec bruit
0.00	0.066352	0.066352	0.00	0.13535	0.13535
1.00	-0.19403	0.80597	4.00	-0.049978	3.9500
2.00	0.086257	2.0863	8.00	0.40496	8.4050
3.00	0.17310	3.1731	12.0	0.35203	12.352
3.50	-0.11648	3.3835	14.0	0.13971	14.140
4.00	0.13227	4.1323	16.0	-0.13561	15.864
4.20	-0.19599	4.0040	16.8	-0.27521	16.525
5.00	-0.042339	4.9577	20.0	0.25289	20.253

Le graphique de la figure 2a nous montre la meilleure droite qui passe par les points bruités et l'ajustement nous indique que :

- Le coefficient multiplicateur de x vaut toujours 4, à 3,75 % près.
- L'ajustement (fit en anglais) n'est plus parfait, ce que montre la valeur de r qui passe de 1 à 0,99733.

De plus, l'ajustement ne donne pas une droite qui passe par l'origine des axes puisqu'on a un terme constant de 0,19044. En effet, nous n'avons pas imposé au logiciel cette contrainte et il nous fournit simplement la meilleure droite, celle dont le coefficient de corrélation de Pearson, r , a la valeur la plus proche de 1. Ce coefficient de corrélation est défini à la fin de ce paragraphe.



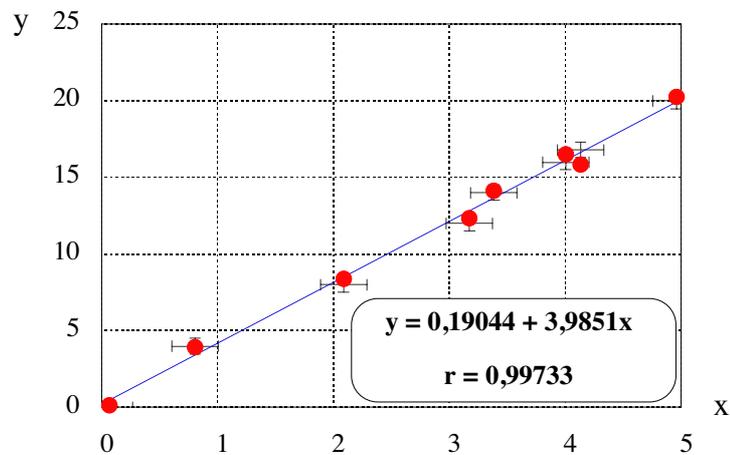


Figure 2a. Graphique de la fonction $y = 4x$ « bruitée » suivant x et y

Mais nous pouvons faire mieux. Comme dans cet exemple nous savons que la réponse correcte est « **la meilleure droite qui passe par l'origine** », nous pouvons l'imposer au logiciel. Avec les mêmes données que précédemment, il nous fournit le graphique suivant :

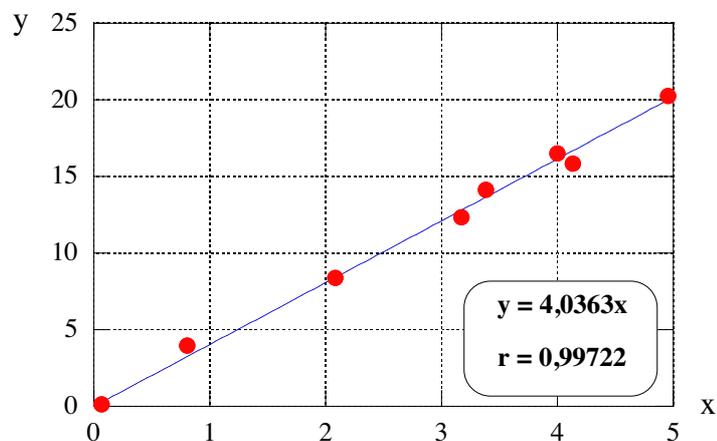


Figure 2b. Graphique de la fonction $y = 0 + 4x$ « bruitée » suivant x et y

Dans ce cas (fig. 2b), le terme constant a disparu et même si le coefficient r est un rien plus petit, l'ajustement est néanmoins plus satisfaisant. Nous ferons la même démarche plus tard lorsque nous rechercherons le meilleur ajustement de la caractéristique d'une résistance ohmique.



Nous sommes maintenant en mesure de bien comprendre la signification de r , le coefficient de corrélation d'échantillonnage de Pearson, dont la valeur varie entre -1 et $+1$ inclus.

Il est défini par l'expression suivante où n est le nombre de paires de valeurs :

$$r = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{\left[n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2 \right] \left[n(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2 \right]}}$$

Vérifiez que, si l'on remplace y_i par sa valeur $4 x_i$, on trouve que r est égal à 1.

En fait, il indique s'il y a de bonnes raisons de croire qu'il existe une corrélation linéaire entre deux ensembles de mesures.

Certains logiciels comme Kaleidagraph®, le logiciel employé ici, donnent la valeur absolue de r en même temps que l'équation de la droite qui passe le mieux par les points expérimentaux. De nombreux autres tableurs fournissent le même type de renseignements.

1.3. Graphique à partir de points au hasard avec ajustement linéaire

Pour terminer, prenons un ensemble de points choisis complètement au hasard, dans le même domaine de variation, c'est-à-dire pour x compris entre 0 et 5 et y compris entre 0 et 20.

x	0,57398	0,92825	1,5386	1,9972	3,17	3,2175	3,3087	4,0994	4,1924
y	12,322	14,384	7,1769	14,84	15,44	15,65	6,9493	5,4408	18,535

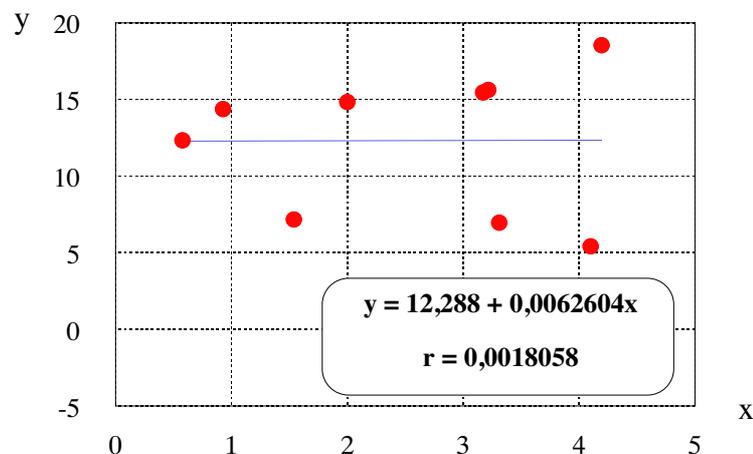


Figure 3a. Ajustement linéaire de points choisis au hasard



L'ajustement de la figure 3a montre qu'il est peu probable que y dépende linéairement de x ; ce qui se traduit par une valeur proche de zéro pour le coefficient de corrélation r .

En résumé, si, a priori, on a une raison de croire qu'il existe une dépendance linéaire entre la variable indépendante x et la variable dépendante y , **l'ajustement nous donne une information sur la validité de cette affirmation.**

- Une valeur de r proche de 1 **suggère** une forte relation linéaire entre ces deux variables.
- Si, par contre, la valeur de r est proche de zéro, ce qui est le cas ici, cela nous montre qu'il n'y a pas de dépendance linéaire ou qu'elle est extrêmement peu probable. Mais, une valeur de r proche de 0 n'implique pas qu'une relation non linéaire n'existe pas entre les deux séries de données.

1.4. Graphique à partir de points au hasard avec ajustement polynomial

Si nous voulons absolument obtenir un ajustement parfait des neuf points précédents, bien que cela n'ait aucun sens, les mathématiques nous disent qu'il est possible d'obtenir une courbe qui passera impeccablement par ces points : un polynôme de degré 8 par exemple, comme on le voit sur la figure 3b.

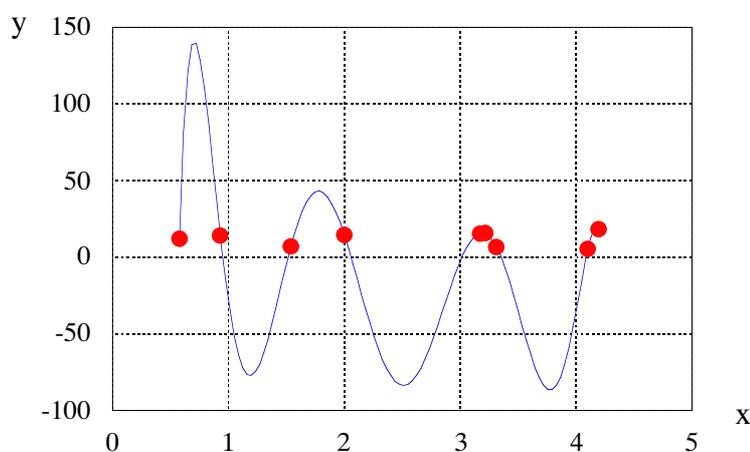


Figure 3b. Ajustement polynomial de degré 8 des mêmes points

On pourrait avoir l'impression d'avoir « découvert » un lien significatif entre y et x , ce qui, bien entendu, est faux. Cela montre l'importance d'avoir a priori un modèle raisonnable à ajuster.

Et, si l'on voulait être malhonnête, on pourrait même présenter l'ajustement de la figure 3a en modifiant sérieusement l'échelle des y pour donner l'impression qu'il y a une corrélation linéaire entre y et x ! Cette nouvelle présentation à autre échelle ne change évidemment rien à la valeur de r



qui est le paramètre important dont la valeur permet d'apprécier la qualité du modèle utilisé pour la description des mesures.

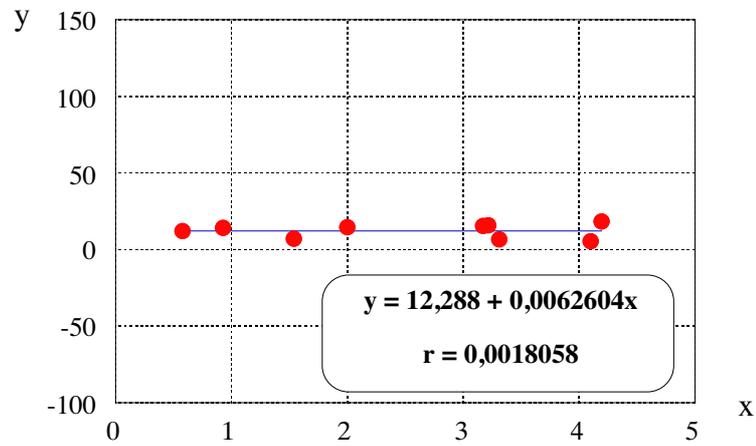


Figure 3c. Présentation fallacieuse et spécieuse des mêmes points

Chapitre 2.

Caractéristique $I(U)$ d'une résistance ohmique

2.1. Introduction

La *physique* est une science expérimentale. Elle diffère des *mathématiques* où l'on étudie par exemple des fonctions reliant deux variables y et x telle que $y = f(x)$. La fonction $f(x)$ est **connue** et les questions que l'on se pose sont du type suivant : quelle dépendance $f(x)$ décrit-elle ? Linéaire, quadratique, exponentielle ou autre ? La fonction $f(x)$ a-t-elle un maximum ou un minimum...

Par d'autres aspects, elle diffère aussi des *sciences naturelles*, la biologie, la médecine... où, le plus souvent, l'objet d'étude ne peut pas être isolé de son environnement dont les conditions sont imposées et ne peuvent être que difficilement contrôlées.

Au laboratoire de physique, l'expérience à réaliser est délimitée, et, en principe, tous les paramètres ont été sélectionnés. À titre d'exemple, cherchons à déterminer la caractéristique tension-courant d'un conducteur ohmique. Des paramètres

comme la forme, les dimensions, la nature du conducteur électrique (exemple : fil de cuivre cylindrique de 50 cm de long et 2 mm de diamètre) sont connus. On mesure le courant I qui traverse ce conducteur en fonction de la tension U continue qu'on lui applique. On précise aussi le domaine de variation de la différence de potentiel électrique appliquée aux bornes du conducteur. À la différence des mathématiques où l'on se donne des valeurs de x et où l'on obtient pour chacune d'elles **la valeur** de y correspondante (nous supposons que la fonction $f(x)$ est uniforme), au laboratoire, on impose une valeur de U qui est connue **par une mesure** et l'on déduit **d'une autre mesure** la valeur de I correspondante. Cela implique une précision limitée dans la connaissance de ces deux variables, liée notamment aux appareils dont nous disposons. Même si la loi qui relie U à I pour le conducteur étudié était parfaitement linéaire, le rapport U/I obtenu pour chaque mesure n'aurait pas toujours exactement la même valeur. Le graphique

représentant I en fonction de U est constitué d'un ensemble de points qui ne sont pas tout à fait colinéaires. En conclusion, nous cherchons la droite qui passe le mieux par les points expérimentaux parce que, a priori, nous voulons déterminer la résistance d'un conducteur ohmique qui obéit à la loi d'Ohm $I = U/R$. Ce n'est pas la loi physique que nous cherchons à découvrir, mais nous l'utilisons pour obtenir la valeur de la résistance R .

Un autre aspect du travail expérimental consiste à observer le domaine de validité d'une loi, dans l'exemple choisi, celui de la loi d'Ohm. Comme on le verra, si le conducteur chauffe, sa résistance R va varier. Faire passer une droite par les points expérimentaux, devient alors ridicule. Pour nos mesures expérimentales, nous avons utilisé un générateur de tension ; pour

chaque valeur de U choisie a priori, nous avons mesuré la valeur correspondante de I . U se présente comme la variable indépendante, celle que l'on impose, alors que I qui en résulte est la variable dépendante. Dans les graphiques de ce chapitre 2, nous avons mis I en ordonnée et U en abscisse, mais ceci est un choix arbitraire.

La distinction entre variable dépendante et indépendante n'est pas toujours évidente, surtout en sciences naturelles. Pensez, en botanique, à une recherche de corrélation entre la largeur et la longueur des feuilles dans l'espèce *Quercus robur* (une espèce de chêne), par exemple. En physique aussi, cette distinction n'est pas toujours justifiée. De plus, comme on le verra dans l'exemple du fusible, il peut être plus facile d'écrire une expression pour $U(I)$ que pour $I(U)$.

2.2. Caractéristique $I(U)$ d'une résistance ohmique

Au laboratoire, nous avons mesuré I , le courant traversant une résistance miniature, pour une série de valeurs de U , la tension à ses bornes fournie par un générateur de tension continue. Le calcul des valeurs de $R = U/I$ pour chaque couple de mesures montre que celles-ci fluctuent entre 65.36Ω et 68.55Ω . La première valeur s'écarte le plus de la valeur moyenne. Ceci n'est pas surprenant car l'erreur absolue étant constante, c'est pour les petites valeurs que l'erreur relative est la plus grande. Représentons la caractéristique $I(U)$ de cette résistance en imposant la condition $U = 0 \rightarrow I = 0$.

U en V	I en mA	R en Ω
0.0	0.0	–
1.0	15.3	65.36
2.0	29.5	67.80
3.0	44.7	67.11
4.0	58.9	67.91
5.0	73.3	68.21
6.0	88.5	67.80
7.0	103.1	67.90
8.0	116.7	68.55
9.0	131.4	68.50
10.0	146.3	68.35



Le logiciel a fourni pour la résistance la valeur de $68,232 \Omega$ avec un écart quadratique moyen de $0,01524 \Omega$ et un coefficient de corrélation égal à $0,99995$, ce qui montre que l'ajustement linéaire est excellent

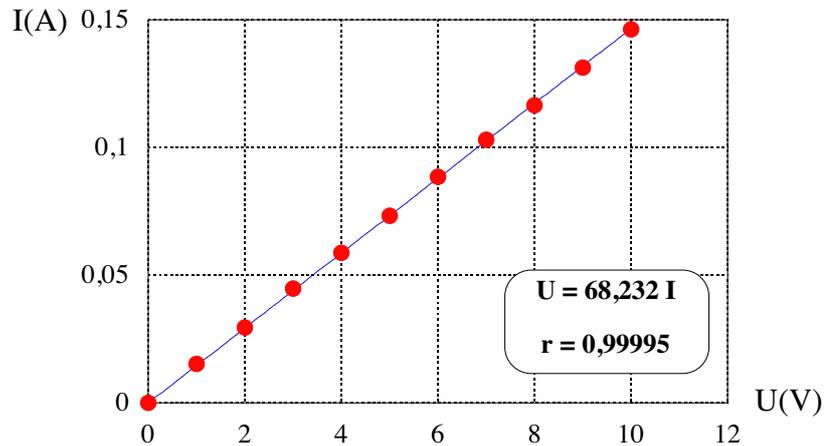


Figure 4. Caractéristique d'une résistance ohmique

Si, en l'absence de modèle a priori, on ne cherchait qu'à obtenir le meilleur ajustement possible, on aboutirait aussitôt à des absurdités comme on le constatera dans l'exemple suivant. Nous avons mesuré la caractéristique d'une résistance ohmique à trois reprises avec le même appareillage et dans les mêmes conditions. Chaque expérience 1, 2 et 3 comporte une série de 10 mesures indépendantes rapportées dans le tableau qui suit :

série 1		série 2		série 3	
U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)
0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
0.95	0.024	0.77	0.019	0.86	0.021
1.95	0.047	2.25	0.053	1.17	0.043
2.98	0.072	3.50	0.082	2.57	0.061
3.83	0.092	4.54	0.107	3.37	0.080
4.75	0.113	5.30	0.125	4.23	0.101
5.62	0.134	6.28	0.148	4.90	0.116
6.83	0.162	7.08	0.167	6.29	0.148
8.91	0.211	8.23	0.194	7.26	0.172
10.48	0.248	9.28	0.219	9.19	0.217

Chaque série de points a tout d'abord été ajustée par un polynôme d'ordre 9. L'ajustement est parfait du point de vue des mathématiques car il existe un et un seul polynôme d'ordre 9 qui passe par 10 points différents (fig. 5a, 5b et 5c).



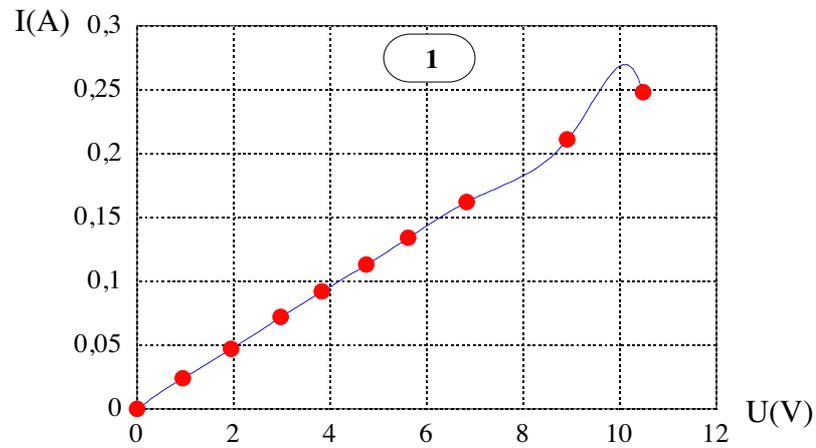


Figure 5a. Ajustement polynomial pour la série 1

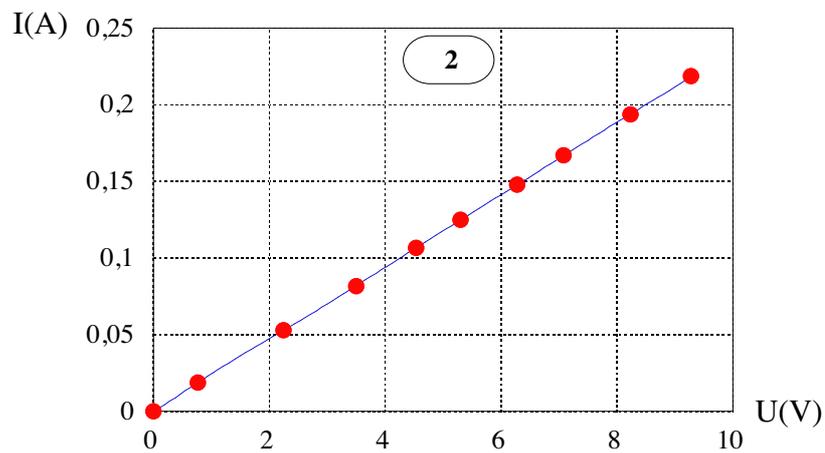


Figure 5b. Ajustement polynomial pour la série 2

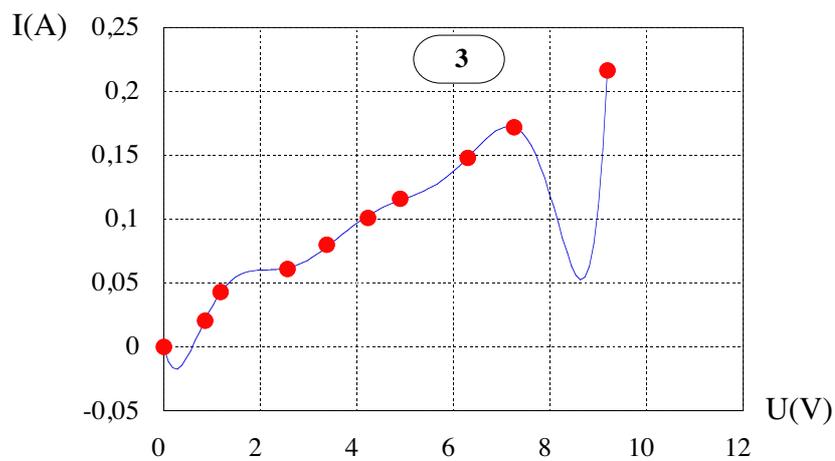


Figure 5c. Ajustement polynomial pour la série 3



Le résultat est néanmoins sans intérêt car il ne décrit pas correctement le phénomène physique. En effet, les figures précédentes montrent trois ajustements complètement différents alors que nous avons étudié trois fois le même objet. Il en résulte qu'une dépendance polynomiale d'ordre 9 de $I(U)$ n'est pas reproductible et que chaque expérience fournirait une « loi » différente.

Par contre, si nous avons de bonnes raisons de croire que cette résistance se comporte de façon ohmique, nous allons ajuster les **mêmes** points expérimentaux en cherchant la droite $I = U/R$ qui passe le mieux par ces points.

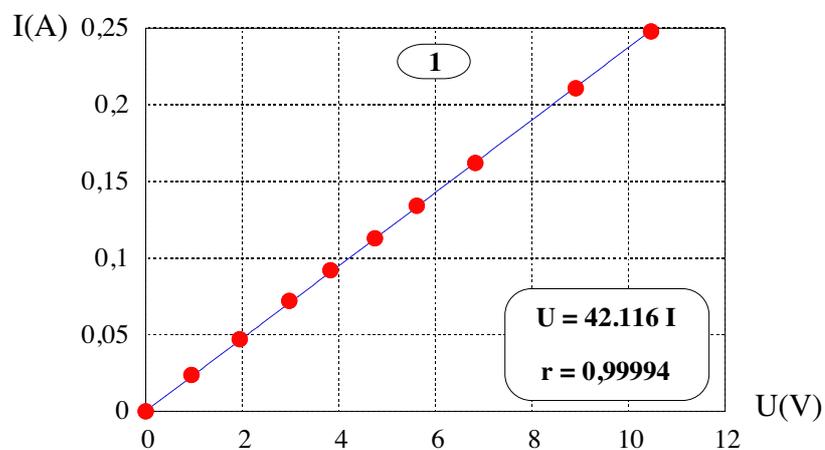


Figure 6a. Ajustement linéaire pour la série 1

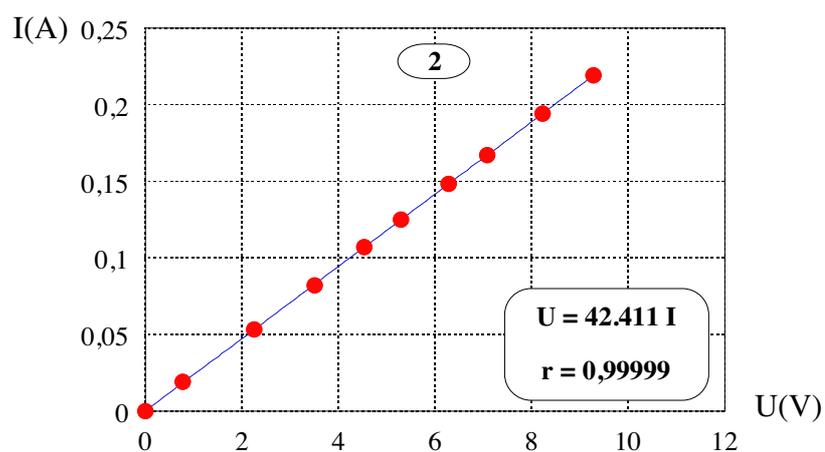


Figure 6b. Ajustement linéaire pour la série 2



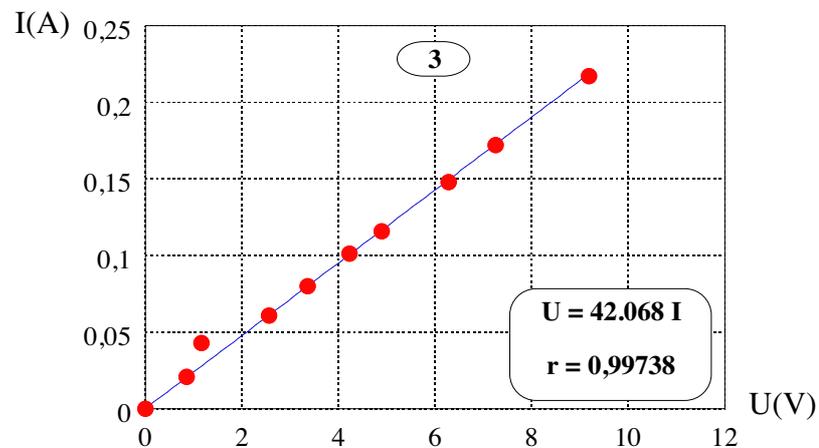


Figure 6c. Ajustement linéaire pour la série 3

Les ajustements sont excellents comme l'indique le coefficient de Pearson qui est, chaque fois, presque égal à 1. Sur la figure 6c, nous remarquons qu'un point s'éloigne fort de la droite. Comme cela ne se produit pas sur les figures 6a et 6b, nous pouvons en déduire que l'expérimentateur a peut-être eu un moment de distraction ou qu'il y a eu une fluctuation dans la tension fournie par le générateur, et que le mieux serait d'éliminer ce point. Néanmoins, pour être certain de ne pas passer à côté d'un phénomène réel, nous referons une nouvelle mesure de I pour la même valeur de U , afin de confirmer ou d'infirmer ce résultat curieux.

Les trois valeurs obtenues pour la même résistance, 42,116 Ω , 42,411 Ω et 42,068 Ω , sont extrêmement proches. Ceci illustre bien le fait que la physique est une science expérimentale : **chaque fois que l'on répète la même expérience, on obtient le même résultat à la précision de mesure près.**

Mais le modèle de la résistance ohmique où U dépend linéairement de I , n'est qu'une première approximation. Dans le chapitre suivant, nous allons constater que les vraies lois de la nature ne sont pas toujours aussi simples.



Chapitre 3.

Caractéristiques de résistances non linéaires : une ampoule et un fusible

3.1. Caractéristique $U(I)$ d'une ampoule à filament de tungstène

À partir des mesures suivantes de U , la tension aux bornes, et de I , le courant traversant une ampoule (12 V ; 100 mA) obtenus lorsque l'état stationnaire est atteint, nous avons calculé les valeurs de $R = U/I$ pour chaque couple de mesures. Nous voyons que ces valeurs de résistance, qui fluctuent entre 10,526 Ω et 117,65 Ω , sont croissantes. Les points expérimentaux (fig. 7a) sont loin d'être répartis sur une droite et l'ajustement linéaire ne convient pas ici. Il nous faut essayer d'établir un bon modèle, à partir de nos connaissances :

- Tout d'abord : $U = R I$
- Des mesures expérimentales montrent que la résistivité du tungstène augmente linéairement avec la température (pour l'ampoule en fonctionnement, la température du filament est d'environ 2500 K) :

$$R(T) = \beta R_0 T$$

- L'élévation de température du filament est liée à la puissance électrique dissipée dans l'ampoule :

$$P = U I$$

- À l'équilibre, la puissance électrique fournie est dissipée en rayonnement (l'ampoule brille) conformément à la loi de Stefan-Planck :

$$P = \alpha T^4$$

La loi de Stefan-Planck n'est pas au programme de l'enseignement secondaire, mais, comme elle est très simple, elle peut être aisément comprise et utilisée par l'élève.

U en V	I en mA	R en Ω
0.0	0.0	-
0.1	9.5	10.526
0.2	12.0	16.667
0.4	15.7	25.478
0.6	18.4	32.609
0.8	21.0	38.095
1.0	24.0	41.667
2.0	34.0	58.824
3.0	42.0	71.429
4.0	50.0	80.000
5.0	57.0	87.719
6.0	63.0	95.238
7.0	69.0	101.45
8.0	74.0	108.11
9.0	80.0	112.50
10.0	85.0	117.65



En combinant ces quatre équations, on obtient :

$$U \approx I^{5/3}$$

Ce modèle, comme on le constate sur la figure 7a, donne un excellent ajustement des points expérimentaux :

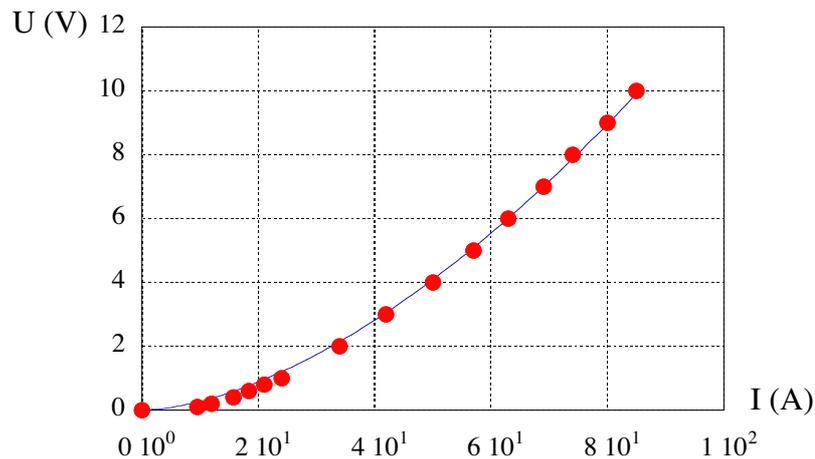


Figure 7a. Caractéristique $U(I)$ d'une ampoule

Comme $U = \text{constante} \cdot I^{5/3}$, il est très facile de visualiser une dépendance de ce type. En effet, il suffit de représenter U en fonction de $I^{5/3}$. C'est ce qui a été fait sur la figure 7b où l'on constate l'excellent alignement des points.

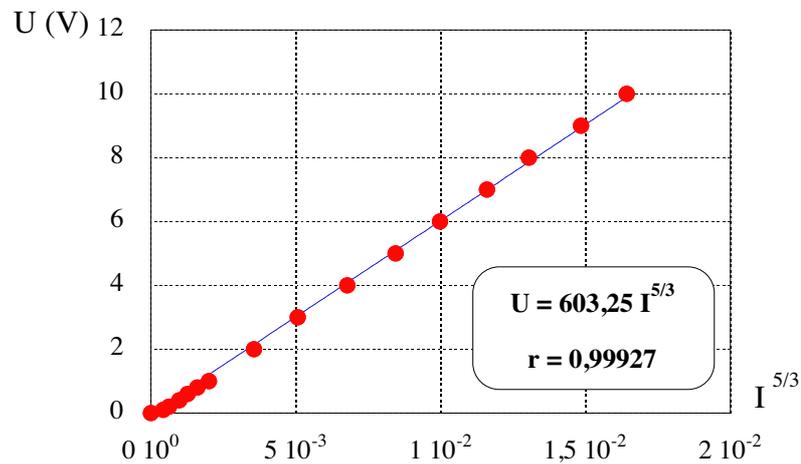


Figure 7b. Graphique $U(I^{5/3})$ pour la même ampoule

Regardons maintenant un fusible, autre composant résistif qui, a priori, n'a pas l'air d'être très différent de l'ampoule précédente.



3.2. Caractéristique $U(I)$ d'un fusible

Les données expérimentales montrent que la résistance du fusible croît avec l'intensité du courant et que les points correspondants ne sont pas alignés.

Au-delà de la valeur indiquée dans le tableau ci-contre, le fil du fusible a fondu et l'intensité du courant est alors redevenue nulle. Supposons d'abord que ce fusible se comporte comme l'ampoule précédente et essayons d'ajuster les points expérimentaux par une fonction du type $U \approx I^{5/3}$ ou, plus directement représentons U en fonction de $I^{5/3}$. Comme on le voit sur la figure 8a, les points ne se placent pas au long d'une droite.

U (V)	I (A)	R (Ω)
0.00	0.00	–
0.17	0.59	0.29
0.39	0.94	0.41
0.49	1.04	0.47
0.50	1.05	0.48
0.52	1.20	0.43
0.83	1.40	0.59
1.06	1.60	0.66
1.49	1.73	0.86
1.87	1.80	1.04

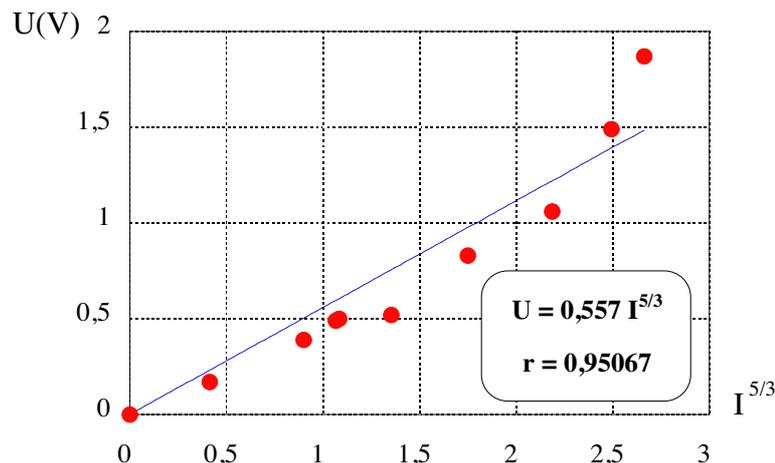


Figure 8a. Ajustement linéaire U en fonction de $I^{5/3}$ pour le fusible

Le mauvais ajustement des points nous montre que le modèle établi pour l'ampoule précédente ne convient pas pour le fusible, mais cette approche, même si elle se révèle non pertinente, nous fait progresser. En réfléchissant, l'inadéquation du modèle ne nous étonne pas car, contrairement à l'ampoule dont le filament est porté à une température très élevée, le fusible rayonne peu et l'énergie électrique fournie par le générateur est dissipée principalement par conductibilité thermique et non par rayonnement. Dans le fusible, la température du fil s'élève jusqu'au moment où elle se stabilise, ce qui se produit lorsque la puissance électrique entrante est compensée par la puissance perdue par diffusion thermique.

Notre nouvel ensemble d'équations est alors :

- $U = R I$
- $P = U I$



- $P = \alpha \Delta T$
- $R = R_0 (1 + \beta \Delta T)$

La température du fil du fusible est nettement plus basse que celle du filament de tungstène de l'ampoule et le terme 1 n'est pas négligeable devant $\beta \Delta T$.

Il en résulte :

$$U = R_0 (1 + \gamma U I) I \quad \text{où } \gamma = \beta/\alpha$$

$$U - \gamma R_0 U I^2 = R_0 I$$

Enfinement

$$U = \frac{R_0 I}{1 - \gamma R_0 I^2} = \frac{R_0 I}{1 - I^2 / I_c^2}$$

où :

$$I_c = \sqrt{1/\gamma R_0}$$

Cette expression donne une dépendance $U(I)$ tout à fait différente de celle de l'ampoule. Remarquons que lorsque I atteint la valeur critique I_c , le dénominateur s'annule, la tension augmente brusquement et le fil métallique fond, ce qui est le rôle d'un fusible. Exploitions maintenant nos mêmes données expérimentales en les ajustant par le modèle du fusible obtenu ci-dessus :

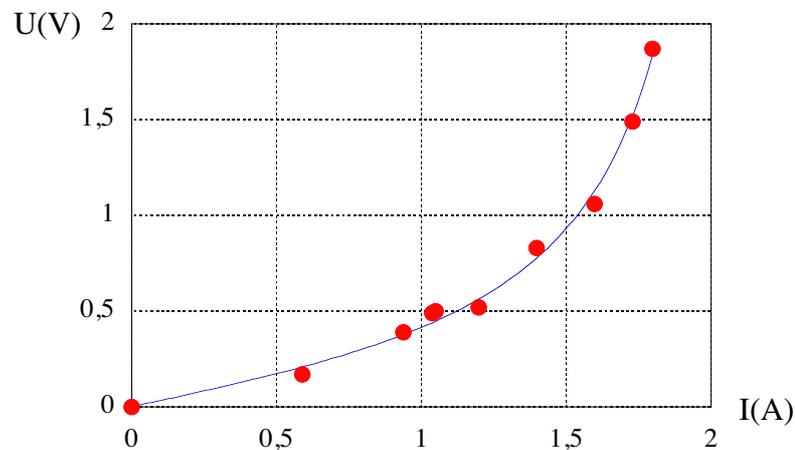


Figure 8b. Ajustement en fonction du modèle ci-dessus pour le fusible

L'excellent ajustement confirme la validité de notre modèle. Le comportement non linéaire de l'ampoule et du fusible serait apparu immédiatement si l'on avait tenté de mesurer leurs résistances à l'ohmmètre puisque les valeurs lues sur chaque échelle auraient été différentes. Demandons aux élèves d'expliquer l'origine de ces différences et faisons-leur aussi observer la dynamique de l'ohmmètre : le système passe par un régime transitoire avant d'atteindre un état stationnaire.



Chapitre 4. Caractéristiques de l'association en série et en parallèle d'une résistance ohmique et d'une ampoule

À partir des mesures des caractéristiques d'une résistance ohmique et d'une ampoule ainsi que des lois de Kirchhoff, on peut faire des prédictions intéressantes quant au comportement de deux de ces composants lorsqu'ils seront montés en série d'une part, et en parallèle d'autre part. Les caractéristiques prévues seront confrontées aux résultats expérimentaux obtenus pour ces associations.

4.1. Caractéristiques respectives de la résistance ohmique et de l'ampoule

La résistance ohmique utilisée correspond au graphique suivant :

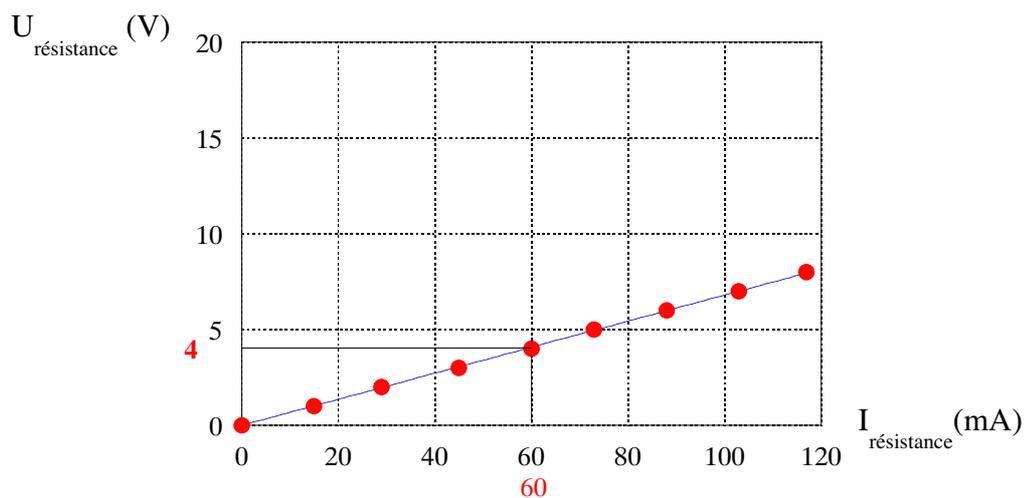


Figure 9. Caractéristique d'une résistance ohmique



L'ampoule utilisée est décrite par :

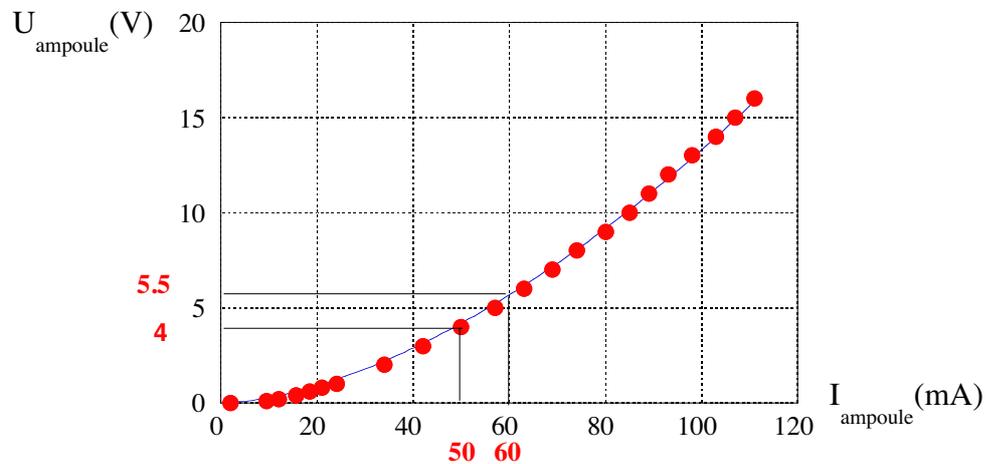


Figure 10. Caractéristique d'une ampoule

Les points ont été reliés par interpolation afin de faciliter la lecture et de permettre de prévoir les caractéristiques des associations de ces deux éléments.

4.2. Caractéristique de l'association en série de la résistance ohmique et de l'ampoule

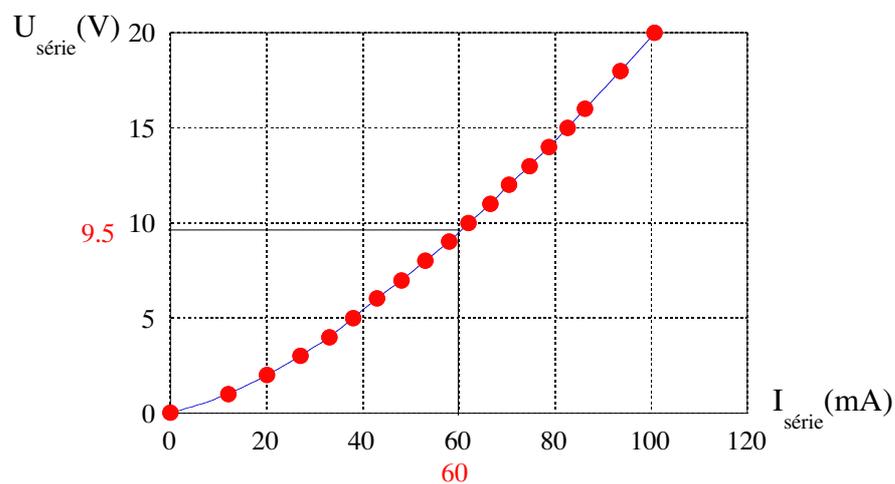


Figure 11. Caractéristique de l'association en série

Ici aussi, la courbe qui relie les points du dessin ci-dessus est obtenue par interpolation.

Nous connaissons la loi d'association en série d'éléments purement résistifs : deux composants connectés en série sont traversés par le même courant et les différences de potentiel s'additionnent.



Pour 60 mA par exemple, nous obtenons :

$$U_{\text{série}} = U_{\text{résistance}} + U_{\text{ampoule}}$$

$$9,5 \text{ V} = (4 + 5,5) \text{ V}$$

Visuellement, cette caractéristique rappelle celle de l'ampoule. Rien d'étonnant puisque, pour les grandes valeurs de U , l'ampoule a une résistance qui, pour chaque point de fonctionnement, est supérieure à celle de la résistance ohmique.

4.3. Caractéristique de l'association en parallèle de la résistance ohmique et de l'ampoule

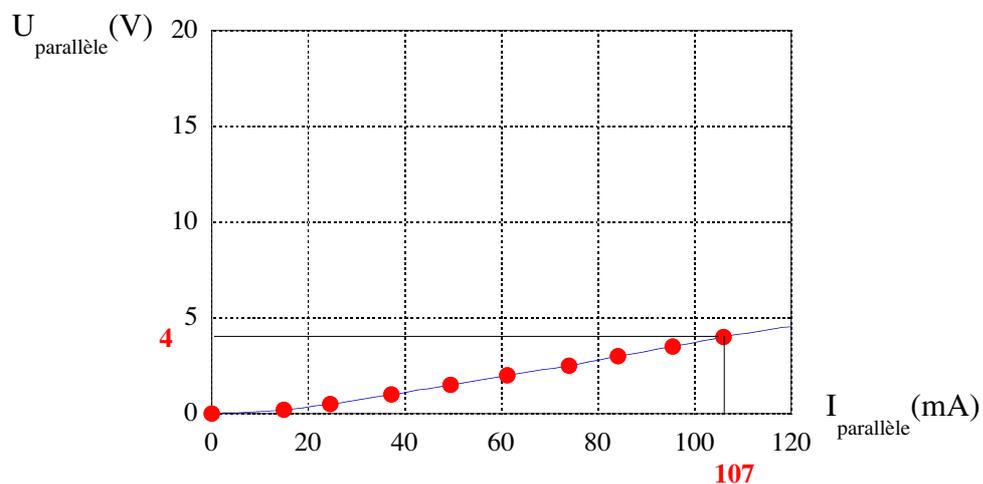


Figure 12. Caractéristique de l'association en parallèle

Dans ce cas-ci également, les points expérimentaux ont été joints par interpolation. Nous connaissons la loi d'association en parallèle : deux composants connectés en parallèle sont soumis à la même différence de potentiel U et les courants s'additionnent.

Pour 4 V, par exemple, nous obtenons :

$$I_{\text{résistance}} + I_{\text{ampoule}} = I_{\text{parallèle}}$$

$$60 \text{ mA} + 50 \text{ mA} \approx 107 \text{ mA}$$

Remarquons que l'on mesure 107 mA alors que l'on prévoit 110 mA. Un écart d'environ 3% qui n'a rien d'anormal ne signifie pas nécessairement que l'on a mal travaillé.

La caractéristique obtenue semble devenir linéaire à partir de 30 mA. Elle ne l'est certainement pas. Pourquoi a-t-on ici cette impression visuelle de linéarité qui pourrait nous amener à de fausses conclusions ?



Chapitre 5. Conclusions et suggestions

Nous avons volontairement choisi des systèmes simples dont la connaissance théorique est bien établie. Ceci nous a permis d'illustrer le fait qu'un dépouillement de résultats expérimentaux non précédé d'un modèle physique peut amener à des conclusions fausses, à des « découvertes » des plus fantaisistes.

L'expérience permet d'une part de confirmer la validité d'un modèle lorsque celui-ci décrit correctement les résultats expérimentaux, et d'autre part de rejeter un modèle incorrect.

Ce que nous avons essayé de montrer avec des résistances électriques peut s'étendre à d'autres domaines :

- Par exemple, la réfraction a d'abord été décrite par l'expression $i/r = \text{constante}$ où i est l'angle d'incidence et r l'angle de réfraction. Cette loi est effectivement vérifiée pour des rayons incidents peu inclinés par rapport à la normale à la surface de séparation des deux dioptries, c'est-à-dire lorsqu'on travaille dans les conditions de Gauss. Mais dès que les angles i et r ne sont

plus petits, l'expression précédente ne convient plus, comme le montre l'expérience. Il faut maintenant affiner ce modèle qui donne $\sin i/\sin r = \text{constante}$. Il est très simple, expérimentalement, de se rendre compte que, pour de petits angles i et r , les points se placent bien au long d'une droite. Mais dès que les angles sont tels que l'angle en radians et son sinus deviennent suffisamment différents, on voit que la loi des sinus convient mieux.

- Une deuxième suggestion serait d'étudier la dépendance entre la période d'un pendule simple, sa longueur l et l'amplitude angulaire α des oscillations. Nous pouvons facilement obtenir une expression $T(l)$ à partir d'une analyse dimensionnelle du problème.

On trouve :

$$T = f(\alpha) \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Pour des petites valeurs de α , les expériences nous montrent que $f = 2\pi$. Pour de plus grandes amplitudes, nous verrons que la période T dépend de l'amplitude.

- On pourrait aussi s'intéresser à la chute dans l'air de deux balles de même diamètre, l'une lourde en métal, l'autre légère comme un balle de ping-pong. On observera que la balle légère tombe avec une vitesse limite

proportionnelle à sa masse tandis que la balle lourde atteint elle aussi une vitesse limite mais qui dépend de la racine carrée de sa masse.

Annexe.

Quelques grandeurs statistiques utilisées pour traiter des mesures expérimentales

La notion de précision instrumentale est une donnée fondamentale de la démarche de l'expérimentateur. Tout appareil, quels que soient sa qualité et son prix, fournit sur les grandeurs mesurées des renseignements dont la précision est limitée. Même si nous avons éliminé des causes d'erreurs techniques comme l'utilisation d'un ampèremètre dont la résistance interne n'est pas négligeable devant celles du circuit que nous étudions, ou d'un voltmètre dont la résistance interne n'est pas nettement plus grande que celles du circuit... il restera toujours une limite supérieure à la précision de nos mesures, en opposition à la précision illimitée des calculs mathématiques.

Si, par exemple, nous devons utiliser la valeur numérique de π au cours d'un calcul, l'erreur commise sur π peut toujours être rendue aussi petite que l'on veut, en prenant un nombre suffisant de décimales. Au laboratoire par contre, si l'ampèremètre utilisé mesure le courant avec « trois digits », c'est-à-dire avec trois chiffres significatifs, une lecture par exemple de 1,35 A, signifie que la vraie valeur, pour autant que cette notion ait un sens à cause du bruit associé à la mesure, est comprise entre

$1,345 + \varepsilon$ et $1,355 - \varepsilon$, avec $\varepsilon \geq 0,001$. Il ne s'agit donc pas d'une erreur mais de la précision de la mesure en supposant que l'appareil soit la seule cause qui la limite. Si la « vraie valeur » est très proche de 1,345, on verra même souvent la valeur affichée fluctuer entre 1,34 et 1,35. Heureusement, avec un appareil de bonne qualité, l'affichage se fait aussi souvent par excès que par défaut. Dans ce cas, l'écart par rapport à la valeur idéale se répartit de façon aléatoire.

En conséquence, pour mesurer la valeur d'une résistance ohmique avec une bonne précision, nous ne nous contenterons pas d'une seule mesure.

Comme on le voit dans le tableau correspondant du § 2.2, chaque paire de mesures de I et de U fournit une valeur différente de la résistance. Nous ferons donc plusieurs mesures indépendantes et finalement leur moyenne. De cette façon, les écarts par excès et ceux par défaut vont se compenser exactement (dans la limite d'un très grand nombre de mesures).



La meilleure détermination d'une mesure de X est donnée par sa *moyenne* \bar{X} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$$

C'est la valeur que nous donne le logiciel d'ajustement, elle est notamment fournie par la pente de la droite qui passe le mieux par les points expérimentaux et par l'origine.

Les points expérimentaux ne se situent pas exactement sur cette droite, mais sont parfois au-dessus, parfois en dessous. L'importance de ces écarts peut s'évaluer par l'*écart quadratique moyen* ou *écart type* σ . En effet, la somme des écarts par rapport à la droite est nulle par construction de la droite elle-même et de la moyenne, puisqu'ils sont aléatoirement positifs ou négatifs. Par contre, la somme des carrés des écarts ne s'annule évidemment pas. Cette grandeur nous permettra d'apprécier la qualité des mesures et de voir éventuellement si un point qui s'écarte beaucoup est significatif ou est l'objet d'une erreur, d'un

accident ou d'une distraction lors de sa mesure. L'*écart type* est donné par :

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k^2 - \bar{x}^2)}$$

Finalement, lorsque les « erreurs » sont distribuées de façon aléatoire, l'erreur statistique sur la moyenne calculée est fournie par l'*écart sur la moyenne* qui s'écrit :

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Cet écart diminue comme la racine carrée du nombre de mesures effectuées. Ceci montre qu'il faut faire suffisamment de mesures pour obtenir un résultat satisfaisant mais qu'améliorer la précision d'un facteur 2, par exemple, demande 4 fois plus de mesures. L'écart sur la moyenne remplace « l'erreur absolue » sur une seule mesure.