

La mesure en terminale scientifique¹

par R. JOURNEAUX et M.-G. SÉRÉ
Didasco - Université Paris XI - 91405 Orsay
et J. WINTHER
Lycée Raspail - 75014 Paris

1. L'IMPORTANCE DE LA MESURE

Historiquement la mesure a été la base du progrès scientifique et son statut est directement lié au passage de l'esprit préscientifique à la science constituée que nous connaissons.

S'il n'est pas question de faire d'un élève un chercheur, il faut lui proposer **des activités où la mesure à un sens, où les questions de précision ou d'exactitude participent à la réponse au problème posé.**

Plusieurs objectifs peuvent être proposés pour l'introduction de la mesure dans les travaux pratiques de physique et de chimie :

- **La confrontation théorie-expérience**

C'est la méthode que l'on rencontre le plus fréquemment dans l'enseignement secondaire.

Souvent un phénomène est introduit de manière qualitative par des expériences de cours. L'aspect quantitatif est plus développé en travaux pratiques.

Le test d'un modèle est l'activité la plus souvent proposée. Il s'agit de «vérifier» une loi vue en cours et l'élève sait ce qu'il faut trouver... et le trouve. Mais toute critique de la méthode utilisée, ses limites éventuelles, la confiance qu'on peut accorder à cette vérification sont réduites à quelques remarques si les résultats ne sont pas suffisamment bons pour que la conclusion soit considérée comme évidente.

1. Un texte reprenant des extraits de cet article a été publié dans le document d'accompagnement du programme de physique-chimie de la classe de terminale scientifique (enseignement obligatoire) - Physique p. 53-63 - janvier 1995.

- **L'élaboration d'un modèle**

Il n'y a pas de sciences sans modélisation. La conséquence de ce constat est que si l'on veut pouvoir qualifier de scientifique l'enseignement de sciences physiques dispensé dans les lycées, il est nécessaire que les élèves pratiquent des activités de modélisation.

La décennie qui vient de s'écouler a été marquée par une formidable extension des moyens de traitement de l'information. L'informatique en particulier a modifié la plupart des activités des sociétés civile, scientifique, commerciale et industrielle. Dans les laboratoires, tous ces moyens sont utilisés quotidiennement pour aider les scientifiques à traiter les données obtenues à partir des observations, des expériences et des mesurages afin d'élaborer les modèles de compréhension des phénomènes. Elle a pénétré dans le système éducatif sous la forme de calculettes, de micro-poches et de micro-ordinateurs, mettant à la disposition des élèves des possibilités de calculs et de traitements des données d'une puissance chaque jour plus importante.

Le nombre élevé des données recueillies, leur traitement mathématique rapide, leur visualisation graphique sont autant de facilités offertes à l'élève. Mais dans le même temps il faut se donner le temps de critiquer les résultats obtenus en fonctions du système utilisé et la précision des données recueillies.

- **La mise en évidence des limites d'un modèle** est par contre très peu utilisée.

- De même **la comparaison de deux modèles** éventuellement concurrents.

Ces deux activités sont pourtant essentielles du point de vue méthodologique et pourraient donner à l'élève la possibilité d'exercer son sens critique sur des critères scientifiques.

- **La métrologie**

La préoccupation du métrologue n'est pas de remettre en cause ou de vérifier une théorie mais de donner à ses mesures le maximum de qualité au niveau de la précision et de l'exactitude. C'est donc le dispositif expérimental qui va retenir toute son attention, en particulier par le recensement et la correction des erreurs systématiques et l'évaluation des incertitudes aléatoires, l'objectif étant de définir un meilleur ou un nouvel étalon.

Ce type d'activité est peu proposée dans l'enseignement mais il pourrait l'être sous une forme moins évoluée. Il aurait l'intérêt de faire

connaître un aspect non négligeable de la physique. On pourrait relier cette activité à la prise de décision.

- **La prise de décision**

La mesure est souvent le moyen de prendre une décision en particulier dans les applications techniques et industrielles.

En terminale scientifique il n'est pas question de développer une méthodologie systématique sur ce sujet mais on peut attirer l'attention des élèves sur ce problème au moment où l'on effectue une série de mesures. Par exemple quand on mesure la résistance d'un conducteur ohmique du commerce on peut comparer les valeurs trouvées et la valeur indiquée par le constructeur, confronter les incertitudes et prendre la décision de placer ou non ce conducteur ohmique dans un circuit électronique en fonction de la fonction recherchée.

- **La communication des résultats**

Il y a là un exercice formateur pour les élèves.

Recenser quels types d'informations doit contenir un compte-rendu d'expériences ayant donné lieu à des mesures est une activité qui permet de mieux comprendre ce qui était demandé, ce qui a été obtenu et les conclusions que l'on peut en tirer.

Comme application il serait instructif que l'élève fournisse deux compte-rendus pour le même travail en changeant le type d'enjeu des mesures.

2. LES ÉTUDIANTS ET LES MESURES

2.1. Quelques résultats de recherche

Il n'existe pas à notre connaissance de nombreux travaux sur la mesure en sciences physiques dans l'enseignement secondaire [1]. Mais une étude a été faite sur ce sujet en première année de DEUG [2, 3] et les résultats permettent d'élaborer une stratégie de remédiation pour la classe de terminale scientifique dans la mesure où les élèves de DEUG sortent pour la plupart de terminale C ou D et bientôt de TS.

Pour les étudiants, **les statistiques sont un outil mathématique qui s'appliquent à un très grand nombre de mesures.** Or **les séries de mesures sont parfois seulement de dix** et le rôle du hasard dans une opération de mesurage est rarement reconnu par les étudiants. La qualité d'une mesure est une idée rudimentaire chez les étudiants. **Une**

mesure est bonne si elle emporte l'accord de l'enseignant, car il détient une valeur de référence. Pour la trouver, un moyen : le soin. C'est qu'en effet les étudiants se sentent personnellement responsables des écarts à la «bonne valeur», écart qu'ils dénomment «erreur» avec une connotation nettement péjorative.

Spontanément, les étudiants rejettent l'idée de dispersion et **n'aiment pas recommencer une mesure.** S'ils le font, c'est rarement pour obtenir plus d'information sur le résultat cherché, mais plutôt pour **vérifier une première mesure.** On retrouve ici l'idée qu'une mesure doit être jugée, qu'elle est à garder ou à éliminer.

Les étudiants considèrent que la troisième mesure sert à trancher entre les deux premières et espèrent pour la suite des mesures une certaine convergence de la série. Ils considèrent alors inutile de continuer à répéter les mesures.

2.2. Les conceptions sur la mesure à faire acquérir à un élève de terminale scientifique

Un des objectifs d'un enseignement de sciences physiques est de faire évoluer les idées des élèves vers la conception qu'un résultat doit avoir deux qualités : **précis et exact**, et que les moyens pour atteindre ces qualités sont de natures différentes.

Ce que nous voulons faire comprendre aux élèves est :

- que si l'on recommence N fois la mesure d'une même grandeur, c'est que **chaque terme de la série apporte de l'information sur la population dont elle est extraite** et dont on peut raisonnablement espérer qu'elle est gaussienne (ou normale),
- l'idée que **le nombre N de mesures est l'objet d'un choix raisonné**, s'appuyant sur l'expression mathématique donnant l'intervalle de confiance associé à un taux de confiance donné. Il serait vain de rechercher un intervalle de confiance à 95 % (par exemple) qui serait inférieur à l'inexactitude qu'il est impossible de réduire et qui est en général inconnue. C'est donc une analyse physique du phénomène qui peut guider ce choix.

3. ÉLÉMENTS DE STATISTIQUES POUR TRAITER UNE SÉRIE DE MESURES

En terminale scientifique on traitera uniquement le cas d'une **série de mesures directes et indépendantes d'une même grandeur**. Deux mesures sont indépendantes si l'incertitude sur l'une n'influence pas l'incertitude sur l'autre.

Nous supposerons qu'on a obtenu une série de mesures directes d'une même grandeur, et que cette série présente une **dispersion**. En d'autres termes, la précision de l'instrument de mesure est telle qu'il y a une dispersion. On peut en effet imaginer qu'avec un appareil moins précis, on trouve toujours la même chose, autrement dit, il n'y a pas de dispersion.

C'est ainsi que la longueur d'une tige, suivant qu'elle est mesurée avec un double décimètre ou un palmer, peut donner lieu ou non à une dispersion.

Dans cet exemple, comme très souvent, c'est en fait les sens de l'expérimentateur qui introduisent la dispersion. Le contre-exemple typique se présente dans les comptages en physique nucléaire où le phénomène lui-même est aléatoire.

Une dispersion due aux appareils intervient dans une acquisition par ordinateur. Par exemple dans la mesure d'une durée de chute, il peut y avoir dispersion à cause du passage des données dans l'interface (échantillonnage).

Quand on fait une seule mesure, on lui associe toujours une **«incertitude»**. C'est la **borne supérieure de l'erreur que l'on pense ne pas pouvoir éviter**. Cette évaluation repose souvent sur des appréciations plus ou moins objectives (indication du constructeur, nature d'une graduation...) et la tendance est d'ajouter toutes ces incertitudes pour trouver finalement un intervalle de «certitude» souvent exagéré.

Quand on fait plusieurs mesures, on dispose d'un autre moyen pour obtenir cette information sur l'incertitude. On se sert de la **dispersion des mesures**. Il devient alors inutile d'associer à chaque mesure un intervalle dans lequel on pense être sûr que se trouve la valeur cherchée. C'est la dispersion elle-même qui est porteuse d'information pour

évaluer la **confiance** que l'on peut accorder au résultat que l'on va calculer à partir de toutes les valeurs.

Nous allons d'abord essayer de faire sentir intuitivement que toutes les valeurs, si elles ont été obtenues de la même façon, sont porteuses d'information, puis que ce sont bien les statistiques qui peuvent tirer un résultat des mesures.

3.1. Le hasard et l'aléatoire² dans les mesures

Quand on fait une mesure, on peut imaginer facilement qu'une quantité d'événements font qu'elle s'écarte de la valeur cherchée. On peut classer ces causes d'écarts de différentes façons, par exemple :

- les maladresses de l'expérimentateur,
- les imperfections de l'appareil (mauvais étalonnage, épaisseur des traits d'une graduation, etc.),
- la difficulté à définir la grandeur elle-même à mesurer. C'est souvent une grandeur qui est définie à propos d'un modèle qui peut rendre imparfaitement compte de la réalité.

Toutes ces causes d'écarts jouent sur la mesure, **dans un sens ou dans un autre**, et le résultat obtenu est alors entaché d'une erreur qui est dite **aléatoire**. En effet l'addition de ces petits écarts produit un écart global imprévisible. Le phénomène est assimilable au hasard, qui résulte d'un manque d'information sur les conditions expérimentales.

Chaque mesure porte en statistiques le nom d'expérience aléatoire, et son résultat le nom de variable aléatoire. C'est bien l'objet des statistiques de traiter des variables aléatoires, que l'on dispose ou non d'un grand nombre d'expériences aléatoires.

3.2. Si on pouvait faire une infinité de mesures...

Une expérience historique classique permet de faire une analogie avec ce qui se passe si on fait un grand nombre de mesures : c'est l'appareil de Galton. Il consiste en une planche verticale sur laquelle sont plantés de nombreux clous. Des billes tombent en heurtant les clous, ce qui a pour conséquence une dispersion de la case d'arrivée qui serait unique à la verticale du départ si les obstacles n'existaient

2. Aléatoire est un mot qui a le sens de «dû au hasard», de même que le mot «fortuit».

pas. Cette case est l'analogue du résultat cherché (la «valeur vraie» ou de «référence»), les autres cases représentent les résultats réels d'une mesure, les causes d'erreur ou de dispersion étant les chocs sur les clous.

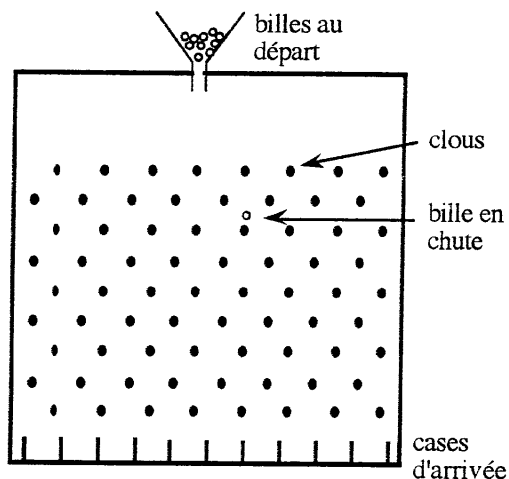


Figure 1 : Schéma de l'appareil de Galton.

L'appareil de Galton permet de visualiser le processus d'addition de nombreux petits écarts. Il montre par analogie, que plus une mesure est éloignée de la valeur cherchée, moins elle est probable, mais de toutes les façons elle constitue un résultat comme un autre. Il faut tenir compte de l'ensemble des mesures pour évaluer la confiance que l'on peut avoir dans le résultat qu'on donne finalement à partir d'une série de mesures.

L'appareil de Galton montre que si on envoie beaucoup de billes leur répartition tend vers une courbe symétrique, qui est toujours la même, qui ressemble à une «courbe en cloche».

Cette constatation suggère qu'il existe un phénomène semblable pour un grand nombre de mesures. Si l'on pouvait tracer l'**histogramme** de séries de dix puis cent, puis mille... mesures, on constaterait en effet que la forme de l'histogramme, d'abord assez irrégulière devient de plus en plus régulière, symétrique, en forme de cloche.

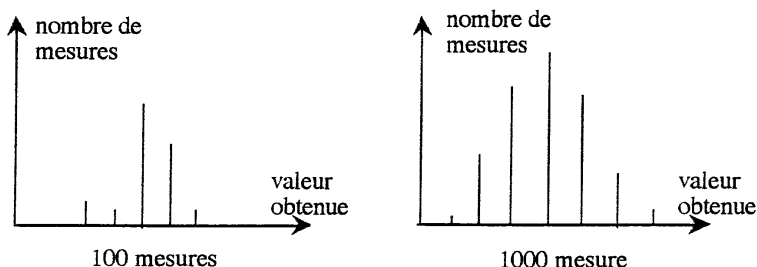


Figure 2 : Évolution de l'histogramme en fonction du nombre de mesures.

3.3. La répartition de Gauss

On admet que si on fait tendre le nombre de mesures vers l'infini, la forme de l'histogramme tend vers une répartition appelée **répartition de Gauss**. Cela revient à dire que c'est l'addition de nombreux petits écarts de part et d'autre d'une valeur centrale (celle qu'on cherche) qui conduit à une répartition de Gauss. On l'appelle aussi répartition normale, tant ce phénomène est répandu dans la nature. Peut-on conclure sur un mode humoristique qu'il est «normal» de faire des erreurs quand on cherche à obtenir une valeur !!

Le problème est de donner un résultat à partir de l'ensemble des mesures. La solution s'aide de théorèmes qu'établissent les statistiques, et en particulier des propriétés de la courbe de Gauss.

La courbe de Gauss est en général représentée de façon que l'aire comprise entre elle et l'axe des abscisses soit normée à un. On désigne son centre par μ . Sa largeur est caractérisée par la grandeur σ , qui est la valeur de la fonction légèrement au-dessus de la mi-hauteur de la courbe (voir la figure 3).

On peut traduire ces résultats de la façon suivante :

1 - quatre-vingt-quinze mesures sur cent sont comprises entre $\mu - 2\sigma$ et $\mu + 2\sigma^3$

– Il y a 95 % de chances pour qu'une mesure «tombe» entre $\mu - 2\sigma$ et $\mu + 2\sigma$.

3. En réalité la valeur exacte est 1,96. Par la suite nous arrondirons à 2.

- 2 - soixante-huit mesures sur cent sont comprises en $\mu - \sigma$ et $\mu + \sigma$
 – Il y a 68 % de chances pour qu'une mesure «tombe» entre $\mu - \sigma$ et $\mu + \sigma$.

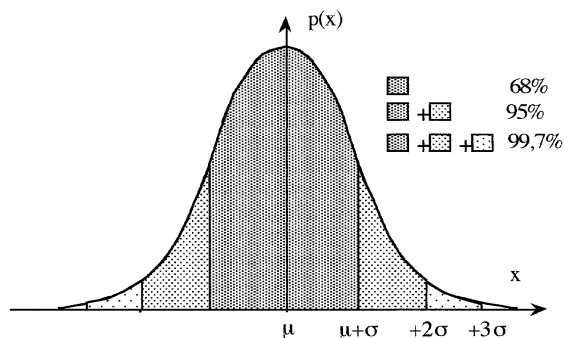


Figure 3 : La répartition de Gauss.

3.4. Le contre exemple

Il existe sur la plupart des calculettes une fonction mathématique appelée **fonction aléatoire** (elle est d'ailleurs en réalité pseudo-aléatoire) qui permet d'obtenir un nombre compris entre 0 et 1 ($0 < X \leq 1$) tiré au hasard.

Si à l'aide d'un programme on fait tirer à la machine un ensemble important de nombres aléatoires ($N > 1000$) et que l'on trace l'histogramme on constate que la répartition n'est pas normale.

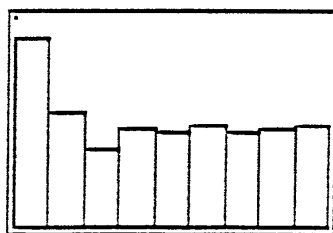


Figure 4 : Une autre répartition possible.

3.5. Que faire de N mesures ?

Il s'agit de tirer des informations d'un nombre limité de mesures (un échantillon) des renseignements sur la population dont cet échantillon est censé être extrait (on reconnaît une technique utilisée dans les sondages). Ces renseignements étant évidemment non rigoureux, on dira qu'on obtient des estimations, les grandeurs calculées sont alors des estimateurs.

Le meilleur estimateur de la valeur cherchée μ (sa valeur la plus probable) est la moyenne arithmétique des mesures. Elle est donnée par la formule :

$$x_0 = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (1) \text{ également notée } m$$

Le meilleur estimateur de la largeur à mi-hauteur σ est s_{N-1} , dont le carré est :

$$s_{N-1}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - x_0)^2}{N-1} \quad (2)$$

(s_{N-1} et s_{N-1}^2 sont donnés par les calculatrices).

Cette quantité est appelée variance de l'échantillon.

N.B. : Pour une série de N mesures, on peut aussi calculer l'écart moyen quadratique s_N :

$$s_N^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - x_0)^2}{N} \quad (3)$$

(s_N et s_N^2 sont donnés par les calculatrices).

Ce n'est pas le meilleur estimateur de σ .

Cependant, s_{N-1} et s_N sont proches quand N est suffisamment grand. (A l'aide de développements limités, il est facile de montrer que ces deux quantités diffèrent de moins de 3 % pour $N = 20$).

De plus la quantité s_{N-1} a une signification pour $N = 1$, alors que s_N valant 0, n'en a pas.

L'histogramme des moyennes de N mesures

Prenons une série de N mesures extraite d'une population dont on appelle l'histogramme H_1 . La moyenne de ces N mesures est m_1 . Répétons l'opération en faisant N autres mesures qui ont une moyenne m_2 . Répétons de nombreuses fois l'opération qui consiste à faire N mesures et à prendre leur moyenne m_i .

On peut alors tracer l'histogramme H_2 des m_i .

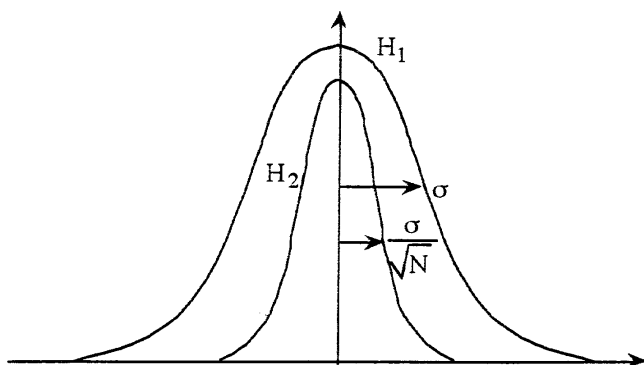


Figure 5 : Histogrammes des mesures individuelles et des moyennes.

- Cet histogramme est plus étroit que la répartition de Gauss H_1 dont sont extraites les mesures.
- Le centre des deux histogrammes (la population infinie de mesures et les moyennes m_i de N mesures) est le même. Ce centre est inconnu, sans quoi on connaîtrait la valeur cherchée.
- L'histogramme des moyennes suit une loi de Gauss.
- La répartition de Gauss des moyennes est $\sqrt{N}$ fois plus étroite que celle de la population.

A cette nouvelle répartition de Gauss H_2 , on peut appliquer les résultats ci-dessus, par exemple le résultat 1 :

1 - Il y a 95 % de chances pour que l'un des m_i , moyenne de N mesures, (quantité connue x_0) tombe entre $\mu - \frac{2\sigma}{\sqrt{N}}$ et $\mu + \frac{2\sigma}{\sqrt{N}}$ ce qui peut s'écrire en remplaçant σ par son estimateur s_{N-1} :

$$\mu - \frac{2s_{N-1}}{\sqrt{N}} < x_0 < \mu + \frac{2s_{N-1}}{\sqrt{N}}$$

ou encore :

$$x_0 - \frac{2s_{N-1}}{\sqrt{N}} < \mu < x_0 + \frac{2s_{N-1}}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

On obtient ainsi l'intervalle de confiance dans lequel se trouve la valeur cherchée avec le taux de confiance de 95 %.

Des tables de statistiques donnent les coefficients qu'il faut mettre à la place du «2» de la formule (4) quand on souhaite calculer l'intervalle de confiance correspondant à un autre taux de confiance. On peut se contenter, en T.P. de calculer des intervalles correspondants à 95 %.

Quand N est inférieur à vingt ce coefficient doit être remplacé par un coefficient dit de Student qui est d'autant plus grand que N est faible. Ceci provient du fait que s_{N-1} n'est qu'un estimateur de σ d'autant moins bon que le nombre de mesures est faible.

Remarques importantes

1 - On voit que la valeur de s_{N-1} est une caractéristique importante de la série de N mesures. Il arrive que l'on calcule seulement la valeur de s_{N-1} pour donner une idée de la dispersion d'une série de mesures. Pour la précision, il faut connaître de plus le nombre N de mesures.

2 - Le fait que N intervienne au dénominateur a pour conséquence que si l'on augmente le nombre de mesures, on peut «affiner» de plus en plus le résultat. On arrive ainsi à un résultat plus précis que les mesures à partir desquelles on l'a calculé. Par exemple, avec $N = 100$ mesures, on peut obtenir pour le résultat final une décimale de plus que pour chaque mesure individuelle.

3 - Il ne faut cependant pas croire qu'on puisse indéfiniment améliorer la précision du résultat. Comme on l'a vu ci-dessus, les statistiques traitent des erreurs aléatoires. Elles ne peuvent rien contre les erreurs systématiques, qui ont pour effet de déplacer l'ensemble des mesures, ainsi que la moyenne, toutes dans le même sens. L'incertitude d'origine systématique fixe donc la valeur de la précision que l'on peut chercher à atteindre par la multiplication des mesures et leur traitement statistique. On retrouve ici la dualité, **précision-exactitude** : la précision des mesures est liée aux erreurs aléatoires alors que l'exactitude est liée aux erreurs systématiques.

4. LE MODÈLE STATISTIQUE DE LA LOI NORMALE $N(\mu, \sigma)$

La distribution normale est une loi de probabilité théorique.

Elle est définie par des paramètres :

- la moyenne μ ,
- l'écart type σ .

En réalité, aucune mesure n'est jamais exactement distribuée suivant une loi normale. Ce n'est qu'un modèle mathématique mais qui intervient dans de nombreux domaines de la Physique. Elle donne la probabilité dP de trouver un résultat entre x et $x + dx$:

$$dP = p(x) dx \quad \text{avec} \quad p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Il est important de faire comprendre aux élèves que ce modèle sert à interpréter la distribution des mesures et qu'il existe d'autre modèle permettant d'interpréter d'autres distributions : la distribution du χ^2 , la distribution binomiale...

Les propriétés de la loi normale

- a - C'est une distribution continue. Toutes les valeurs X de $-\infty$ à $+\infty$ sont permises.
- b - Le premier paramètre μ indique la tendance centrale de la distribution.
- c - Le deuxième paramètre σ indique la dispersion.
- d - La distribution est symétrique.

e - L'aire comprise entre la courbe et l'axe des abscisses est égale à l'unité (loi de probabilité normée), le maximum est $\frac{0.399}{\sigma}$.

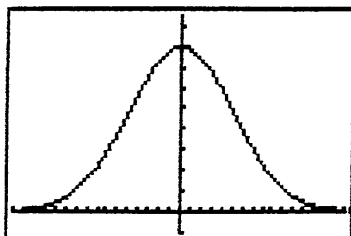
Les calculettes graphiques actuelles permettent de vérifier aisément les propriétés de la loi normale.

Exemple : utilisation de la TI82 Texas

```
Y1=(1/(√(2π)*0.5)
)*e^(-(X-0)²/(2
*0.5²))
Y2=
Y3=
Y4=
Y5=
Y6=
```

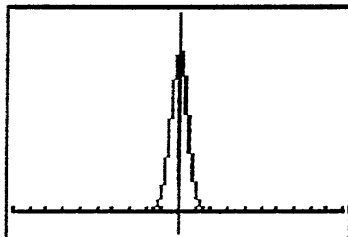
```
NORMAL FORMAT
Xmin=-1.6
Xmax=1.6
Xscl=.1
Ymin=-.1007015...
Ymax=.94785337...
Yscl=.1
```

$\sigma = 0,5$ $\mu = 0$

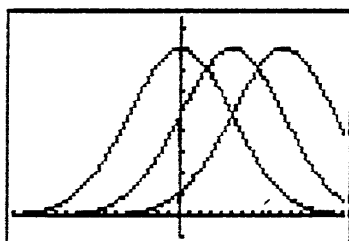


En faisant varier la fenêtre d'affichage on peut vérifier que toutes les valeurs X de $-\infty$ à $+\infty$ sont permises.

```
NORMAL FORMAT
Xmin=-10
Xmax=10
Xscl=1
Ymin=-.1007015...
Ymax=.94785337...
Yscl=1
```

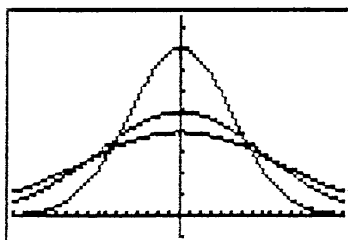


En faisant varier la paramètre μ et en maintenant σ constant on peut observer le déplacement du centre de la courbe.



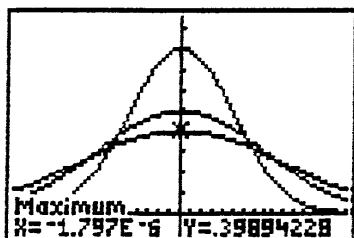
$$\mu = 0 \quad \mu = 0,5 \quad \mu = 1$$

En faisant varier le paramètre σ et en maintenant μ constant on peut observer la variation de la dispersion de la distribution.

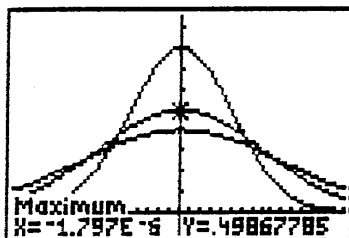


$$\sigma = 0,5 \quad \sigma = 0,8 \quad \sigma = 1$$

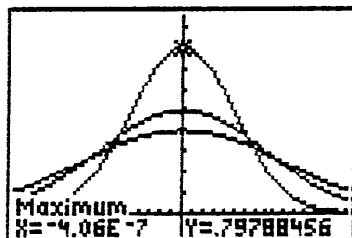
On peut également chercher les maxima de la courbe et montrer que le maximum est $\frac{0.399}{\sigma}$.



$$\mu = 0 \quad \sigma = 1$$

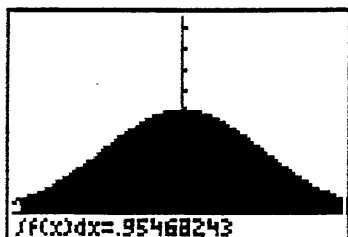


$$\mu = 0 \quad \sigma = 0,8$$

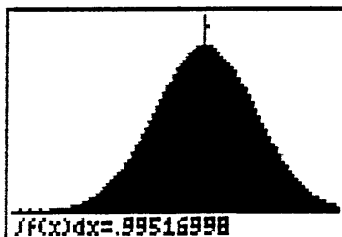


$$\mu = 0 \quad \sigma = 0,5$$

On peut également montrer que l'aire de la partie de la courbe comprise entre la courbe et l'axe des abscisses est égale à 1.



$$\mu = 0 \quad \sigma = 0,8$$



$$\mu = 0 \quad \sigma = 0,5$$

5. EXEMPLES DE TRAVAUX PRATIQUES EN TERMINALE S

Il s'agit de mesurer la fréquence de résonance d'un circuit RLC. Pour que l'amortissement soit uniquement imposé par les résistances du circuit (R et résistance de la bobine), un amplificateur suiveur est placé entre le circuit et le générateur. A cause des propriétés de l'amplificateur, il faut travailler à des fréquences pas trop élevées (quelques kHz) et avec des niveaux suffisamment faibles pour ne pas être limité par le courant maximum du composant, en particulier au voisinage de la résonance.

Les mesures données ci-dessous sont obtenues avec les valeurs suivantes :

$$C = 1 \mu F,$$

$$L \approx 10 \text{ mH (bobine 500 tours, résistance propre d'environ } 3 \Omega),$$

$$R = 4,7 \Omega \text{ ou } 47 \Omega.$$

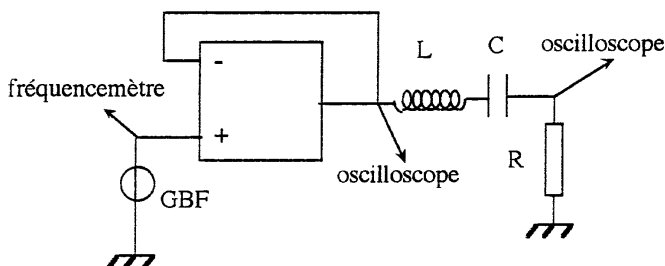


Figure 5

Toutes les mesures sont effectuées de la même manière. On cherche la résonance en faisant varier la fréquence du générateur pour réaliser le critère choisi : déphasage nul entre courant et tension appliquée ou maximum du signal. On dérègle le générateur entre deux mesures. Si on veut visualiser la tension aux bornes du condensateur, il faut échanger les places du condensateur et de la résistance (problème de masse) à moins de disposer d'une sonde différentielle.

Résultats expérimentaux

Avec $R = 47 \, \Omega$.

• Expérience n° 1

Résonance d'intensité mesurée avec deux fréquencesmètres en parallèle. La résonance est détectée par le déphasage nul entre courant et tension à l'oscilloscope.

Fréquencesmètre n° 1	Fréquencesmètre n° 2
1592 Hz	1582 Hz
1596 Hz	1583 Hz
1593 Hz	1583 Hz
1591 Hz	1580 Hz
1590 Hz	1579 Hz
1591 Hz	1580 Hz
1591 Hz	1581 Hz
1593 Hz	1582 Hz
1593 Hz	1582 Hz
1591 Hz	1581 Hz
Moyenne : 1592,1 Hz	Moyenne : 1581,3 Hz
Écart-type : 1,7 Hz	Écart-type : 1,3 Hz

- Expérience n° 2

Résonance d'intensité mesurée avec le fréquencesmètre n° 1. La résonance est détectée par le maximum de la tension aux bornes de R à l'oscilloscope.

Fréquencesmètre n° 1
1580 Hz
1596 Hz
1583 Hz
1606 Hz
1598 Hz
1596 Hz
1598 Hz
1574 Hz
1594 Hz
1598 Hz
Moyenne : 1592,3 Hz
Écart-type : 9,9 Hz

- Expérience n° 3

Résonance de tension mesurée avec le fréquencesmètre n° 1. La résonance est détectée par le maximum de la tension aux bornes de C à l'oscilloscope.

Fréquencesmètre n° 1
1502 Hz
1485 Hz
1482 Hz
1492 Hz
1500 Hz
1493 Hz
1497 Hz
1483 Hz
1470 Hz
1495 Hz
Moyenne : 1489,9 Hz
Écart-type : 9,8 Hz

Avec $R = 4,7 \, \Omega$.

• Expérience n° 4

Résonance de tension mesurée avec le fréquencesmètre n° 1. La résonance est détectée par le maximum de la tension aux bornes de C à l'oscilloscope.

Fréquencesmètre n° 1
1593 Hz
1591 Hz
1595 Hz
1592 Hz
1592 Hz
1591 Hz
1593 Hz
1594 Hz
1593 Hz
1590 Hz
Moyenne : 1592,4 Hz
Écart-type : 1,5 Hz

Commentaires

L'expérience n° 1 montre que deux appareils peuvent différer dans leurs indications sans que cela soit en contradiction avec les précisions affichées par le constructeur. On peut constater que la différence des deux indications est sensiblement constante et égale à 10 Hz (écart systématique), ce qui se retrouve au niveau des moyennes. En revanche, les dispersions des deux séries de mesures sont très voisines, et cette dispersion ne peut pas expliquer la différence des indications des deux appareils. On peut dire que les deux séries de mesures ont la même **précision** (écarts-types voisins) mais on ne peut rien dire de leur **exactitude** (il faudrait disposer d'un fréquencesmètre de meilleure qualité qui servirait d'étalon).

L'expérience n° 2 comparée à la première montre la différence de précision des deux séries de mesures. On illustre que la méthode de mesure peut en particulier affecter la précision. Ici, il est plus précis d'apprécier la résonance par le déphasage nul avec une courbe de Lissajous que par l'appréciation d'un maximum d'amplitude. En revanche, les deux moyennes diffèrent d'une faible quantité qui peut s'expliquer par la dispersion. L'exactitude des deux méthodes est donc la même.

Les expériences n° 3 et n° 4 ont pour but de montrer une éventuelle dépendance de la résonance de tension par rapport à l'amortissement. Dans l'expérience n° 3, l'amortissement est suffisamment grand pour qu'une influence soit détectable. Sans évoquer des tests statistiques sophistiqués, les deux moyennes des expériences n° 3 et n° 2 sont significativement différentes au vu de leurs écarts-types. Pour les expériences n° 4 et n° 2, les deux intervalles de confiance à 95 % se recouvrent largement et on peut affirmer au contraire qu'il n'y a pas de raison de penser que ces deux fréquences sont différentes.

On peut enfin remarquer que la précision des mesures de l'expérience n° 3 est nettement moins bonne que pour l'expérience n° 4, alors que la méthode expérimentale est la même. Ceci est dû au fait que l'amortissement dans le cas n° 4 est plus faible, donc la résonance est plus aiguë donc la détermination du maximum est plus précise. La précision d'une mesure dépend donc également, toutes choses égales par ailleurs, de la manière dont la grandeur est définie.

Cette expérience simple permet de mettre en évidence plusieurs points intéressants concernant une série de mesures :

- la précision et l'exactitude sont deux concepts différents. La précision est liée aux écarts aléatoires intervenant dans une mesure, elle s'apprécie donc en faisant plusieurs mesures et en notant la dispersion des résultats. L'exactitude ne peut s'apprécier que si on dispose d'une référence ou d'un étalon de meilleure qualité. Sinon, on ne peut que constater une différence entre les méthodes ;
- la précision est souvent liée au protocole expérimental choisi, en particulier si les sens de l'expérimentateur interviennent : recherche d'un maximum, d'un minimum, d'une coïncidence, d'une égalité d'éclairement, etc. Du point de vue pédagogique, ce sont ces situations qui se prêtent le mieux à la mise en évidence de la dispersion des mesures ;
- selon la nature de la question posée, les qualités des mesures mises en jeu ne sont pas les mêmes. Si on cherche la fréquence de résonance d'intensité (par exemple dans le but de mesurer un coefficient d'auto-induction), c'est l'exactitude qui est fondamentale, la précision ne donnant que l'étendue du domaine de confiance. Si on veut mettre en évidence le rôle de l'amortissement dans la résonance de tension, c'est la précision qui est importante car elle permet ou non de mettre en évidence cette variation éventuelle. C'est la variation de fréquence qui est importante et non l'exactitude avec laquelle chaque fréquence

est mesurée (on suppose évidemment que cette exactitude est constante, c'est-à-dire que le dispositif expérimental ne change pas).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. COELHO : «*Contribution à l'étude didactique du mesurage en physique dans l'enseignement secondaire*» - Thèse (Paris VII) - 1993.
- [2] M.-G. SÉRÉ, C. LARCHER et R. JOURNEAUX : «*Learning statistical analysis of measurement errors*» (first year of University) - Students' conceptions and obstacles - International Journal of Science Education - Vol. 15 - n° 4 - p. 427-438 - 1993.
- [3] M.-G. SÉRÉ et R. JOURNEAUX : «*Le traitement statistique des mesures en T.P. de Physique de DEUG : une innovation à Orsay*» - Didaskalia - 1995.