

Compte rendu d'un travail interdisciplinaire

mathématiques-sciences physiques

fonctions, statistique et hydrostatique

Brigitte CHAPUT, Hamid HADIDOU - IRES de TOULOUSE
Christine DUCAMP – ENFA TOULOUSE

Résumé

Bien souvent, à la suite d'expériences en sciences physiques, les élèves considèrent que le résultat obtenu est "vrai" ou "unique". Aussi, lorsqu'ils étudient l'évolution d'une grandeur en fonction d'une autre et reportent les résultats sur un graphique, ils relient systématiquement les points par des segments de droite.

Dans ce travail, à travers l'étude en sciences physiques, de l'évolution de la pression en un point d'un liquide en fonction de la hauteur de ce liquide, nous avons tenté de sensibiliser les élèves à l'incertitude liée à toute mesure et de les amener à chercher un modèle mathématique qui traduit au mieux les résultats. Ici il s'agit du modèle linéaire.

Une étude statistique a permis d'établir le lien avec les indicateurs statistiques (moyenne et écart-type). Cela a conduit à donner du sens à ces indicateurs et à comprendre comment les interpréter.

Mots-clés

pression en un point d'un liquide, régression linéaire, incertitude de mesure, simulation, moyenne, écart type.

Cet article est le compte rendu d'un travail pluridisciplinaire mathématiques-sciences physiques mené dans une classe de Première Professionnelle, option électrotechnique, énergie et équipements communicants. Les objectifs visés dans ce travail sont :

- le réinvestissement des connaissances de collège et de seconde,
- la sensibilisation des élèves à la régression linéaire qui sera étudiée en Terminale Professionnelle,
- la sensibilisation des élèves à l'incertitude attachée à toute mesure expérimentale.

Ces objectifs sont en accord avec ceux des baccalauréats professionnels, cités dans le préambule du Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale spécial n°2 du 19 février 2009, notamment :

- la préparation à la poursuite d'étude,

- le développement des attitudes transversales : sens de l'observation, ouverture à la communication, au dialogue et au débat, esprit critique vis-à-vis de l'information disponible.

La démarche pédagogique adoptée met en œuvre l'analyse, la recherche, la découverte, l'exploitation et la synthèse des résultats. Elle s'appuie sur les points suivants du préambule :

- 1 - Prendre en compte la bivalence
- 2 - Privilégier la démarche d'investigation
- 3 - S'appuyer sur l'expérimentation
- 8 - Intégrer les TIC dans les apprentissages
- 9 - Mettre l'élève au travail, individuellement ou en groupe

Le travail s'est déroulé en plusieurs étapes :

- le TP1 (voir Annexe 1) sur la mesure de pression, réalisé par 22 élèves et dont les 22 séries de résultats ont été regroupées,
- un travail d'analyse de la variabilité de ces résultats,
- le TP2 (voir Annexe 2) sur le remplissage d'une éprouvette avec 25 mL d'eau qui met en évidence la fluctuation de mesure dans des conditions de répétabilité (même manipulateur, mêmes conditions matérielles...),
- un travail d'analyse des résultats,
- un retour sur le TP1 et une première approche de la régression linéaire,
- un prolongement du travail sur la prise en compte des incertitudes de mesures aussi bien pour la détermination de la pression, que pour la mesure de la hauteur d'eau.

Descriptif du TP1 (voir annexe 1)

Le TP1 de cette étude fait partie du tronc commun du programme des classes de première et terminale des baccalauréats professionnels dont le programme de sciences physiques et chimiques est organisé autour de quatre thèmes¹.

Ici il s'agit du thème des Transports (T) et plus précisément du paragraphe 2 : **Pourquoi les hublots des sous-marins sont-ils épais ?** du chapitre T 5 intitulé : **Comment se déplacer dans un fluide ?**

Les objectifs du TP sont les suivants :

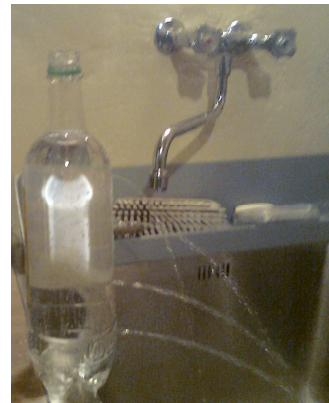
- Mesurer la pression d'un liquide en un point
- Déterminer expérimentalement les variations de pression dans un fluide
- Distinguer pression atmosphérique, pression relative et pression absolue
- Utiliser la formule $P_B - P_A = \rho . g . h$

¹ Bulletin officiel spécial n°2 du 19 février 2009

Ce TP est précédé d'une séance de trois activités expérimentales, intitulée *Pression et forces pressantes* au cours de laquelle sont introduites les notions de pression, de force pressante et de surface pressée. La dernière activité de la séance est consacrée à la pression dans un liquide. Une expérience (photo ci-contre) avec une bouteille en plastique percée à différentes profondeurs et remplie d'eau, permet aux élèves de dégager qualitativement quelques caractéristiques de la force pressante.

On constate en particulier que "plus la profondeur augmente plus la pression augmente".

À ce stade la plupart des élèves sont souvent tentés de conclure hâtivement que "*La pression est proportionnelle à la profondeur*".



Commentaires sur le déroulement du TP1 (voir annexe 1)

Activité 1 : Discussion et échanges à partir des questions ouvertes.

Activité 2 :

Au cours de cette activité, les élèves peuvent utiliser le matériel s'ils le souhaitent. Il leur est demandé de rédiger individuellement le protocole expérimental, cette tâche leur paraît souvent difficile !.

Il s'ensuit une mise en commun, par groupe, pendant laquelle le professeur insiste sur les détails du protocole et les conditions de l'expérience.

Activité 3 : Réalisation du TP

À la fin de la première partie, après avoir placé les points dans le repère, certains élèves relient ces points par des segments de droites.

A la question **5)** de cette partie et après débat, on arrive aux conclusions suivantes :

- Le nuage de points peut être modélisé par une droite qui passe par l'origine du repère.
- C'est la différence de pression et non la pression qui est proportionnelle à la profondeur. Ici, le professeur introduit le vocabulaire concernant la pression absolue et la pression relative.

C'est à la suite de cette partie que l'étude statistique qui fait l'objet de cet article, est menée avec les élèves par groupes en accompagnement personnalisé.

Dans un deuxième temps, le travail se poursuit en cours de sciences physiques pour arriver à la relation générale : $P_B - P_A = \rho . g . h$.

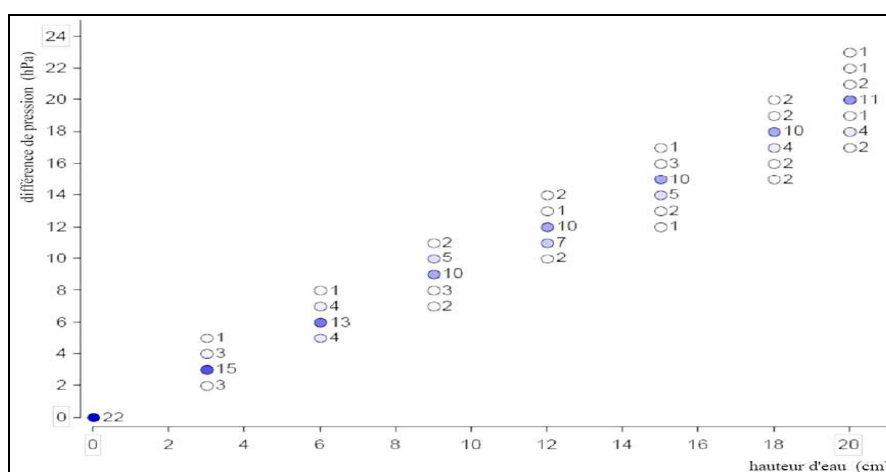
Bilan du TP1

Le tableau ci-dessous donne les différences de pression à différentes hauteurs d'eau relevées par 22 élèves. Les hauteurs sont exprimées en centimètres et les différences de pression en hectopascals.

Hauteurs	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	4	2	3	3	3	3	3	3	3
6	5	5	7	5	6	6	6	6	7	6	6
9	10	8	10	7	9	9	9	9	9	9	8
12	12	11	14	10	11	12	12	12	12	11	11
15	16	13	17	13	15	15	15	15	15	14	14
18	19	15	20	16	18	18	18	18	18	16	17
20	21	17	22	18	20	20	20	20	20	18	18

Hauteurs	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp	Δp
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	5	4	3	3	3	2	4	2	3
6	6	6	8	7	6	6	6	6	7	5	6
9	9	11	10	10	9	9	8	9	10	7	11
12	12	12	11	14	12	12	11	11	13	10	12
15	15	15	14	16	15	15	14	14	16	12	15
18	18	18	17	20	18	18	17	17	19	15	18
20	20	20	20	23	20	20	19	18	21	17	20

La représentation des données recueillies par un nuage de points pose le problème de la superposition de plusieurs points. Nous avons opté pour la représentation suivante : chaque disque correspond à une mesure, il est plus ou moins foncé selon que la valeur associée est plus ou moins fréquente, les effectifs des valeurs représentées sont indiqués à côté.



Pourquoi les résultats associés à une même profondeur sont-ils différents ?

Les élèves formulent des réponses en termes de différence de manipulation :

Matériels différents : règles, éprouvettes, pressiomètres électroniques, résolution des appareils...

Manipulateurs différents : perceptions visuelles différentes, dextérités différentes pour l'alignement du niveau d'eau du tube du pressiomètre avec la graduation de la règle...

☞ Que ce serait-il passé si les mesures avaient été effectuées toutes avec le même matériel par le même manipulateur ?

Réponse possible : résultats identiques !

Incertitude de mesure et comment la quantifier ?

Lorsqu'on effectue une mesure, on ne peut pas être absolument sûr du résultat. Une incertitude est attachée au résultat.

Cette incertitude traduit la dispersion des résultats obtenus. Pour la plupart des mesures, la distribution des résultats peut se modéliser avec une loi normale décrite par ses deux paramètres : moyenne **Erreur !** et écart-type σ :

- environ 68 % des observations se situent dans l'intervalle [**Erreur !** - σ ; **Erreur !** + σ] ;
- environ 95 % des observations se situent dans l'intervalle [**Erreur !** - 2 σ ; **Erreur !** + 2 σ] (cet intervalle est une approximation de l'intervalle [**Erreur !** - 1,96 σ ; **Erreur !** + 1,96 σ] que l'on trouve couramment) ;
- environ 99,7 % des observations se situent dans l'intervalle [**Erreur !** - 3 σ ; **Erreur !** + 3 σ].

On utilise alors l'écart type de la distribution des résultats pour préciser l'incertitude d'un résultat de mesurage. L'incertitude peut avoir plusieurs sources, l'objectif du TP suivant est d'évaluer l'incertitude lié au manipulateur lors d'une mesure.

Descriptif du TP2 (voir annexe 2)

Le TP2 vise à évaluer l'incertitude attachée à un manipulateur pour le remplissage d'une éprouvette avec 25 mL d'eau distillée. Nous avons utilisé une éprouvette en la détournant de son utilisation classique pour des raisons pratiques, la manipulation proposée est plus simple qu'avec de la verrerie jaugée (séchage plus rapide, par exemple). Le but n'était pas de calibrer l'éprouvette mais de sensibiliser les élèves à l'incertitude attachée à un manipulateur opérant dans des conditions de répétabilité (même manipulateur, même matériel, mêmes conditions expérimentales...).

Bilan du TP2

Les résultats des élèves sont saisis dans un classeur Excel, disponible à l'adresse <http://www.irem.ups-tlse.fr/spip/spip.php?rubrique48>

Voici par exemple ceux de deux binômes d'élèves de deux classes différentes

Température		Masse volumique		
23,1 ° C		994,37 g/L		
Essai	Masse verrerie vide (g)	Masse verrerie et eau (g)	Masse eau (g)	Volume eau (mL)
1	22,43 g	47,22 g	24,79 g	24,93 mL
2	22,48 g	47,47 g	24,99 g	25,13 mL
3	22,47 g	47,42 g	24,95 g	25,09 mL
4	22,49 g	47,19 g	24,70 g	24,84 mL
5	22,48 g	47,57 g	25,09 g	25,23 mL
Moyenne				25,04 mL
Ecart-type corrigé				0,16 mL

Température		Masse volumique		
22,4 ° C		994,63 g/L		
Essai	Masse verrerie vide (g)	Masse verrerie et eau (g)	Masse eau (g)	Volume eau (mL)
1	22,53 g	47,91 g	25,38 g	25,52 mL
2	22,49 g	47,36 g	24,87 g	25,00 mL
3	22,53 g	47,15 g	24,62 g	24,75 mL
4	22,50 g	47,38 g	24,88 g	25,01 mL
5	22,54 g	47,46 g	24,92 g	25,05 mL
Moyenne				25,07 mL
Ecart-type corrigé				0,28 mL

Interprétation et communication des résultats

Les mesurages donnent des résultats qui se répartissent selon une distribution théorique qui peut être considérée comme normale (vu le contexte expérimental), d'espérance mathématique V et d'écart type σ . σ quantifie la dispersion des mesures autour de V .

Le problème est qu'on ne connaît pas V et qu'on cherche à l'évaluer.

Si on ne dispose que d'une seule mesure v du volume, on fait confiance au hasard et on admet dans ce cas que la mesure trouvée v est :

- pour un niveau de confiance de 95 % à moins de deux écarts types de distance de V
- pour un niveau de confiance de 68 % à moins d'un écart type de distance de V

Ainsi, pour un niveau de confiance de 95 %, on admet que v appartient à l'intervalle $[V - 2 \sigma ; V + 2 \sigma]$. Ce qui traduit aussi le fait qu'on admet que V appartient à l'intervalle $[v - 2 \sigma ; v + 2 \sigma]$.

$[v - 2 \sigma ; v + 2 \sigma]$ est un **intervalle de confiance** de V au **niveau de confiance** de 95 % (ou au **seuil de confiance** de 5 %).

De la même façon, $[v - \sigma ; v + \sigma]$ est un **intervalle de confiance** de V au **niveau de confiance** de 68 % (ou au **seuil de confiance** de 32 %).

Les résultats des deux binômes d'élèves précédents s'expriment sous la forme suivante :
À la température de 23,1 °C.

$$V_{\text{éprouvette}} = (25,04 \pm 0,32) \text{ mL à 95 \% de confiance.}$$

$$V_{\text{éprouvette}} = (25,04 \pm 0,16) \text{ mL à 68 \% de confiance.}$$

À la température de 22,4 °C.

$$V_{\text{éprouvette}} = (25,07 \pm 0,56) \text{ mL à 95 \% de confiance.}$$

$$V_{\text{éprouvette}} = (25,07 \pm 0,28) \text{ mL à 68 \% de confiance.}$$

Pourquoi l'écart type corrigé ?

Si on pouvait faire toutes les réalisations possibles des 4 étapes du T.P. précédent, les résultats du calcul du volume d'eau fluctueraient avec un certain écart type, noté σ , qui mesure la dispersion autour de leur moyenne V.

Dans le cadre du T.P., on ne réalise que 5 fois l'expérience, on obtient un échantillon de 5 mesures (parmi l'infinité précédente). Cet échantillon a une moyenne **Erreur !** et une variance $\sigma_{\text{Erreur !}}$. En considérant tous les échantillons de 5 expériences possibles :

☞ la moyenne des moyennes **Erreur !** des échantillons de taille 5, serait V,

☞ la moyenne des variances $\sigma_{\text{éch.}}^2$ des échantillons de taille 5, serait $\frac{4}{5} \sigma^2$

La théorie de l'échantillonnage montre que dans le cas d'échantillons de taille n , la moyenne des variances d'échantillon est $\frac{n-1}{n} \sigma^2$ (ici $n = 5$).

On cherche ainsi une caractéristique de la dispersion calculée sur les échantillons, qui ait pour moyenne σ^2 (et pas $\frac{4}{5} \sigma^2$). Pour cela, on corrige la variance d'échantillon en la multipliant par $\frac{5}{4}$: on obtient la **variance corrigée** :

☞ la moyenne des variances corrigées d'échantillon $\frac{5}{4} \times \sigma_{\text{éch.}}^2$ soit $\frac{5}{4} \times \frac{4}{5} \sigma^2 = \sigma^2$.

☞ Pour l'échantillon de taille n , la variance corrigée est $\frac{n}{n-1} \sigma_{\text{éch.}}^2$ soit **Erreur !**

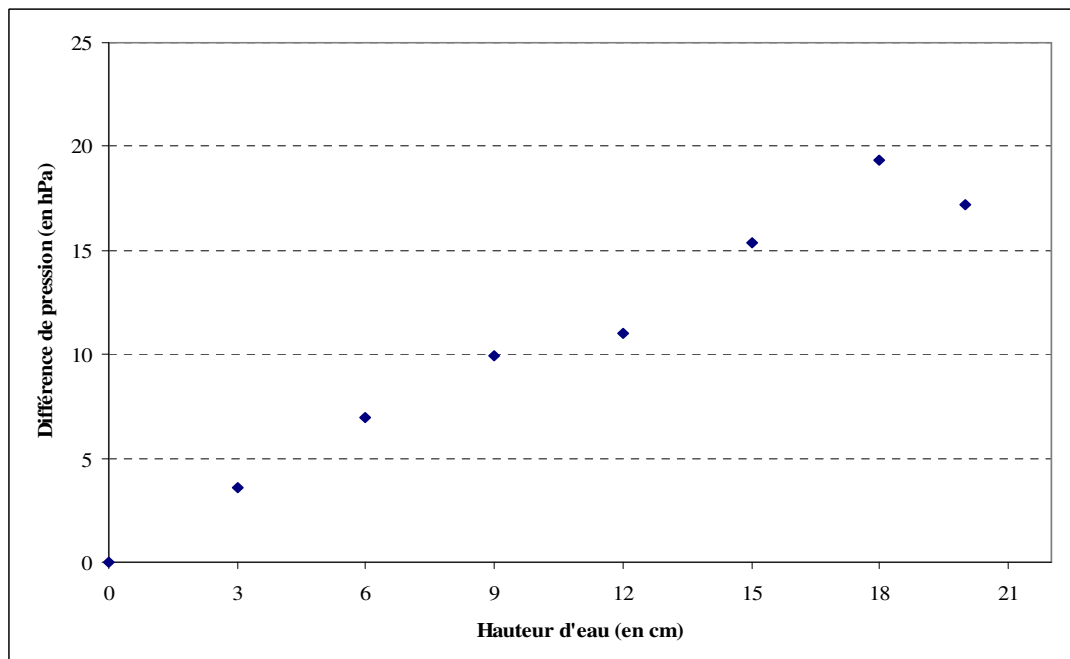
L'**écart type corrigé** est la racine carrée de la variance corrigée (pour retrouver une caractéristique dont la dimension est celle des données).

Retour au TP1

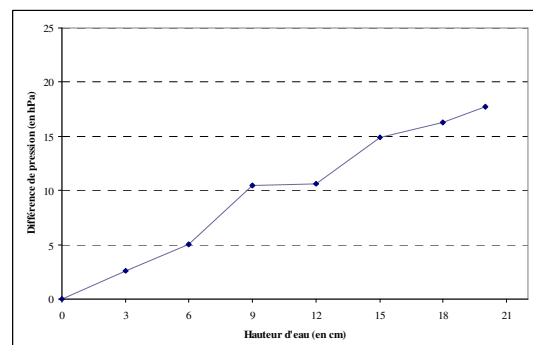
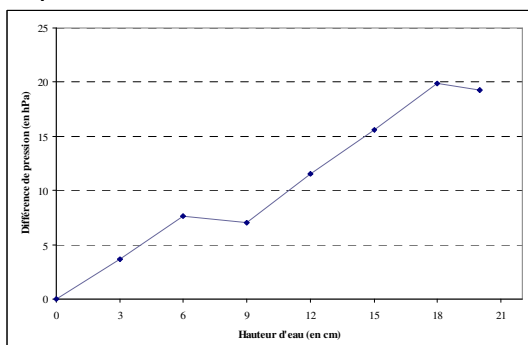
Que se passe-t-il lorsqu'on ne dispose que d'une seule mesure pour chaque hauteur ?

Pour chaque hauteur, on obtient une différence de pression qui est éloignée de la valeur cherchée d'un certain écart, appelé **erreur de mesure**.

Voici des valeurs simulées de mesures aux différentes hauteurs du TP :



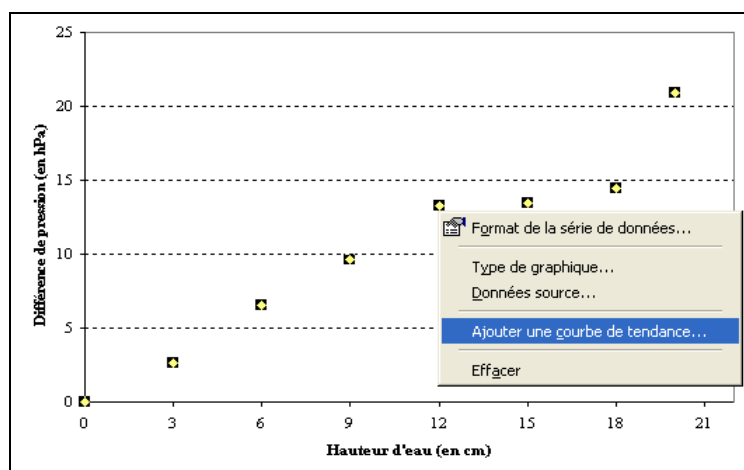
On ne peut pas joindre les points obtenus car ils fluctuent. Voici deux autres exemples !



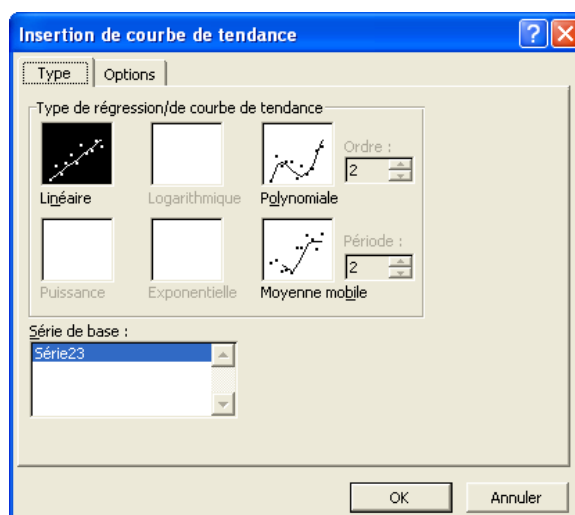
Traitement d'une série de mesures

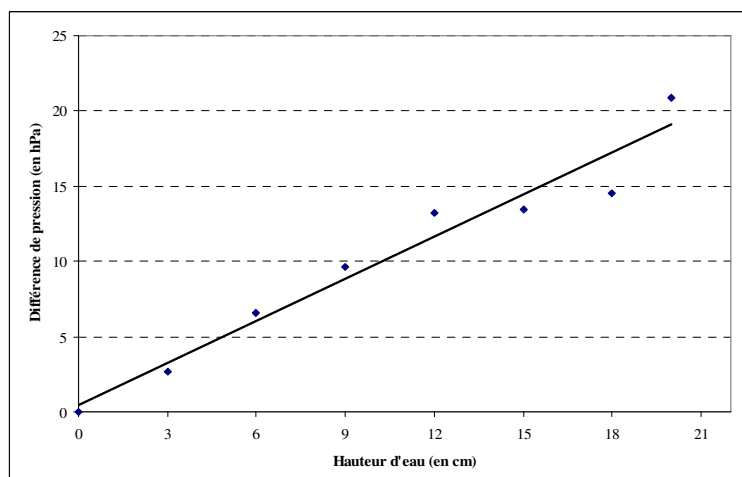
On construit le nuage de points associés à une série de résultats expérimentaux que l'on peut ajuster par une droite lorsque les points sont proches de l'alignement. On obtient ici la **droite de régression linéaire de la différence de pression en la hauteur**.

Avec un tableur (Excel ou Calc d'OpenOffice), la droite d'ajustement s'obtient par un clic droit sur un des points représentant les données. On obtient un menu contextuel et on choisit la commande **Ajouter une courbe de tendance...**:

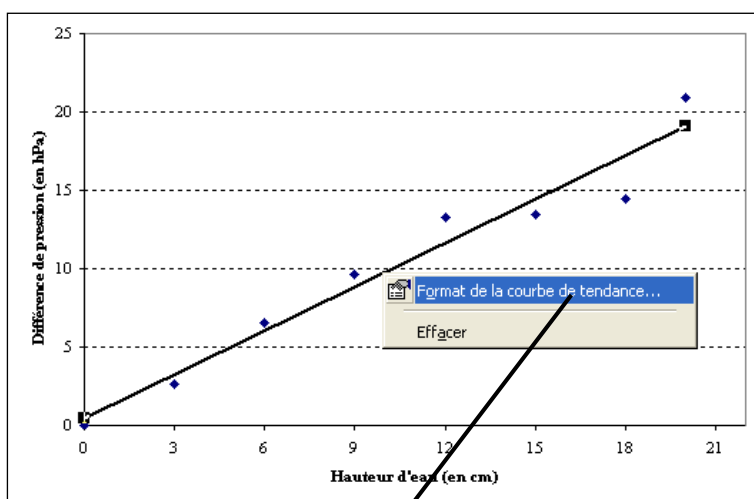


On choisit l'option **Linéaire** et après un clic sur , la droite apparaît sur le graphique.





La droite de régression peut servir à faire des estimations de résultats pour des valeurs de hauteurs qui n'ont pas été choisies lors de l'expérience. On utilise pour cela son équation réduite que l'on peut faire apparaître par un clic droit et le choix de la commande **Format de la courbe de tendance...** du menu contextuel qui apparaît.



Format de courbe de tendance

Motifs | Type | Options

Nom de la courbe de tendance

☒ Automatique : Linéaire (Série23)

☐ Personnalisé :

Prévision

Prospective : 0 unité(s)

Rétrospective : 0 unité(s)

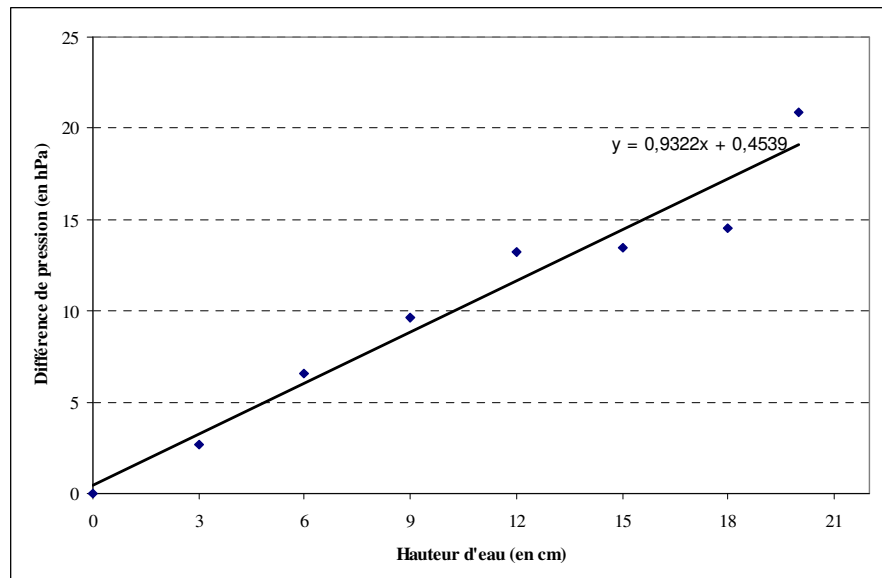
☐ Coupe l'axe horizontal (X) à : 0

☒ Afficher l'équation sur le graphique

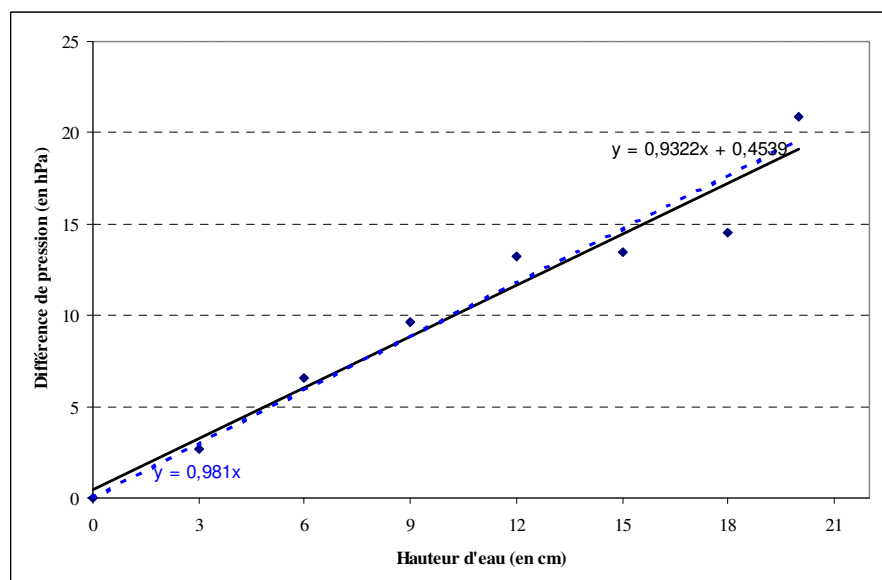
☐ Afficher le coefficient de détermination (R²) sur le graphique

OK Annuler

Dans l'onglet **Options** de la fenêtre qui s'ouvre, on coche l'option **Afficher l'équation sur le graphique**. Après un clic sur **OK**, l'équation réduite de la droite apparaît sur le graphique.



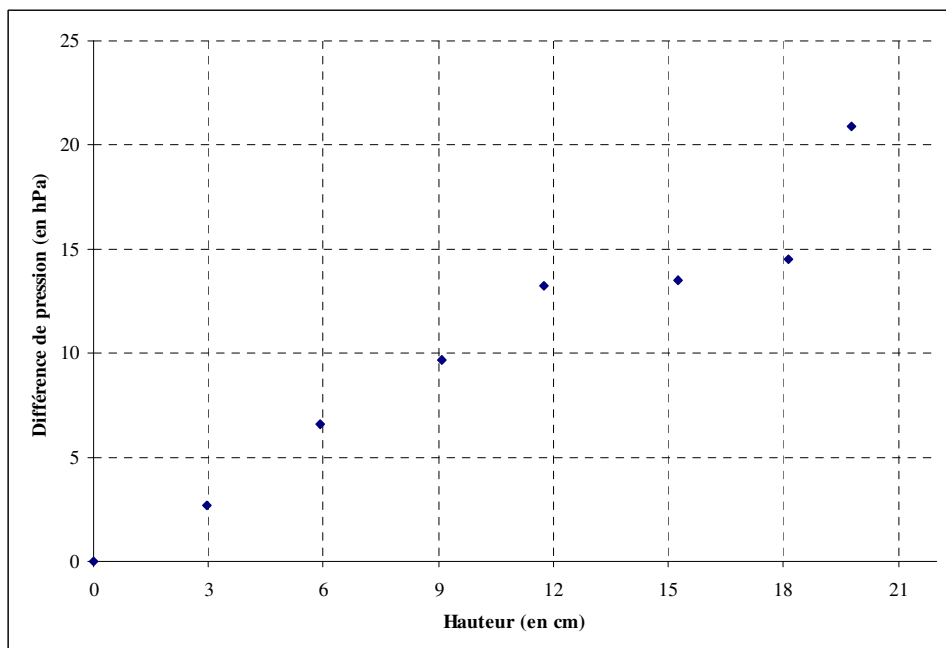
On peut comparer la droite de régression linéaire associée aux points du nuage avec la droite qui traduit la loi sur la pression : $\Delta p = \rho g h$.



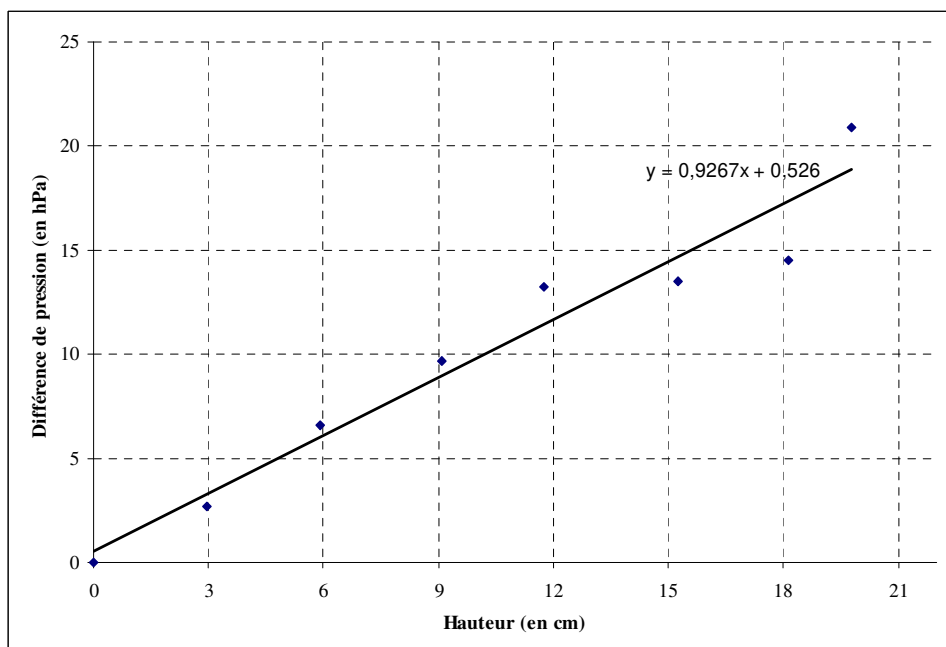
La méthode des moindres carrés n'imposent pas à la droite de régression de passer par l'origine. Compte tenu des incertitudes de mesure, on peut considérer que ces résultats expérimentaux obéissent à la loi sur la pression.

Pour aller plus loin...

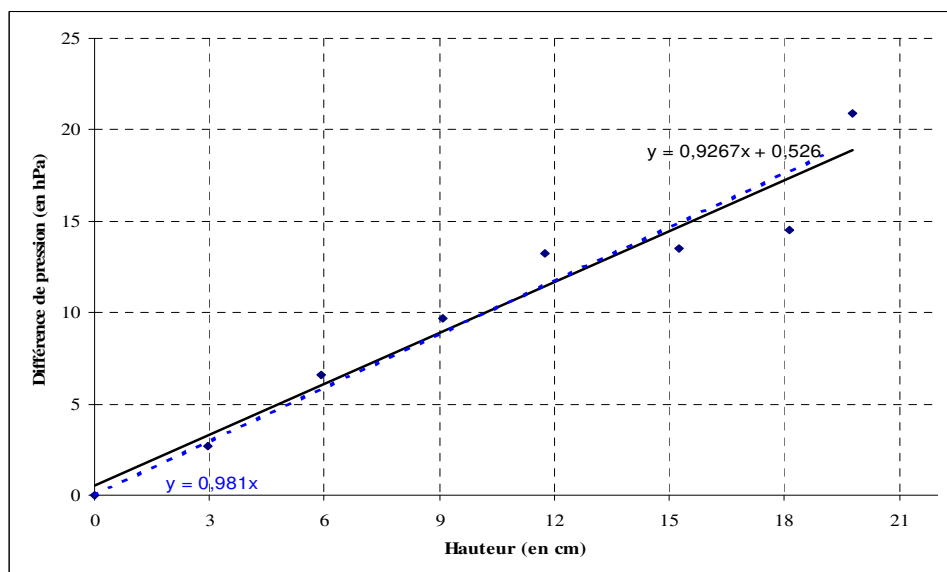
On aurait pu tenir compte de l'incertitude sur la mesure de la hauteur d'eau : incertitude sur les graduations de la règle, incertitude sur l'ajustement du niveau d'eau dans le tube du pressiomètre avec la graduation de la règle (incertitude de répétabilité du manipulateur). Voici des résultats obtenus par simulation :



Droite de régression linéaire associée aux points obtenus :



Comparaison avec la droite obtenue avec la loi sur la pression.



Conclusion

À partir d'une expérience de mesure de la pression en un point d'un liquide pour différentes hauteurs, les élèves sont sensibilisés à l'incertitude attachée à toute mesure, à l'analyse et à la critique des résultats d'une expérience. Le lien établi avec les indicateurs statistiques - moyenne et écart type - permet de donner du sens à ces indicateurs et sensibilise les élèves à l'interprétation de ces paramètres.

Le recueil des mesures dans des conditions de "répétabilité" lors du TP2, permet aux élèves de prendre conscience de l'existence d'une erreur aléatoire que l'on produit en réalisant une expérience plusieurs fois dans les mêmes conditions expérimentales. La valeur "vraie" est impossible à déterminer. On détermine un intervalle de confiance à l'intérieur duquel on peut estimer que se trouve la valeur cherchée avec un certain niveau de confiance.

Les résultats de mesures obtenus à l'issue du TP1 conduisent les élèves à la recherche d'un modèle, ici le modèle linéaire, pour interpréter et exploiter leurs résultats.

Avec un autre groupe d'élèves, cette même expérience d'étude de l'évolution de la différence de pression en fonction de la hauteur du liquide a été réalisée par EXAO. Les mesures dans des liquides différents permettent aux élèves de comprendre le sens des résultats affichés par l'ordinateur lorsqu'on réalise une courbe de tendance « Régression linéaire » et de comprendre le sens du coefficient directeur et de l'ordonnée à l'origine. Ces résultats feront l'objet d'un prochain article.

Références

Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale spécial n°2 du 19 février 2009 :

http://cache.media.education.gouv.fr/file/special_2/25/3/mathematiques_sciences_physiques_chimiques_44253.pdf

Enseignement Agricole :

Référentiel de Seconde Professionnelles

<http://www.chlorofil.fr/diplomes-et-referentiels/formations-et-diplomes/2nde-professionnelle.html>

Référentiel de formation des modules généraux (Janvier 2010)

http://www.chlorofil.fr/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/user_upload/diplomes/ref/bacpro/bacpro-mg-tronc-commun-ref.pdf&t=1415818094&hash=f8500e7e4610125cf5e533f2fc5334124475a0a0

Documents sur mesure et incertitudes (Inspection Générale de l'Éducation Nationale mai 2012) :

http://cache.media.eduscol.education.fr/file/Mathematiques/12/7/LyceeGT_ressources_MathPC_Mesure_et_incertitudes_218127.pdf

Activité 3 Réalisation du TP

Première partie

- 1) A l'aide du matériel mis à votre disposition, relevez la pression atmosphérique :

$$P_{\text{atm}} = \dots\dots\dots$$

- 2) Que pensez-vous de la valeur de la pression à la surface du liquide ? On notera cette pression p_0 .

.....

- 3) En respectant le protocole prévu, faites les mesures et calculs suivants en fonction de la profondeur h .

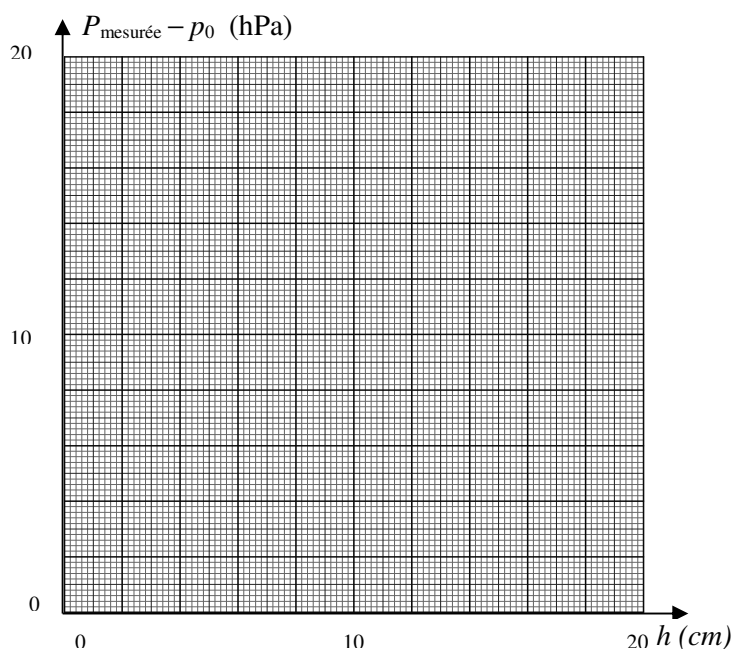
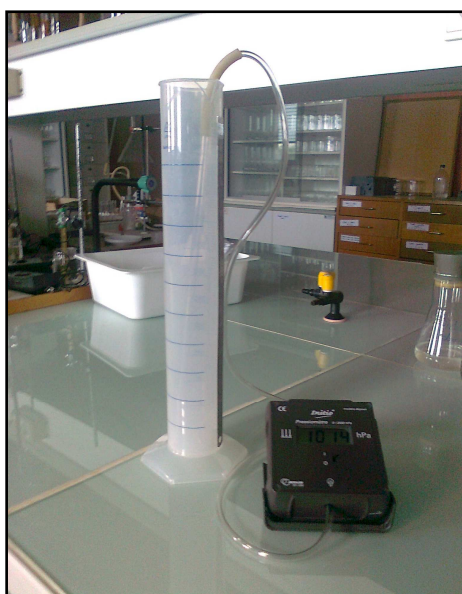
h (en cm)	0	3	6	9	12	15	18	20
$P_{\text{mesurée}}$ (en hPa)								
$P_{\text{mesurée}} - p_0$ (en hPa)								

par la
mesure

- 4) Sur la grille millimétrée suivante, représentez la différence de pression entre la surface et le point de mesure ($P_{\text{mesurée}} - p_0$) en fonction de la profondeur h .

- 5) Que peut-on dire de l'affirmation de l'activité 1.3) ?

.....



Deuxième partie

Quelle relation y a-t-il entre la différence de pression et la différence de profondeur dans un fluide ?

1) Compléter le tableau suivant.

h (en cm)	0	3	6	9	12	15	18	20	
$P_{\text{mesurée}} - p_0$ (en hPa)									} à reporter
$\rho \cdot g \cdot h$ (en Pa)									
$\rho \cdot g \cdot h$ (en hPa)									} par le calcul

Données : $\rho_{\text{eau}} = 1\,000 \text{ kg/m}^3$; $g = 9,81 \text{ N/kg}$

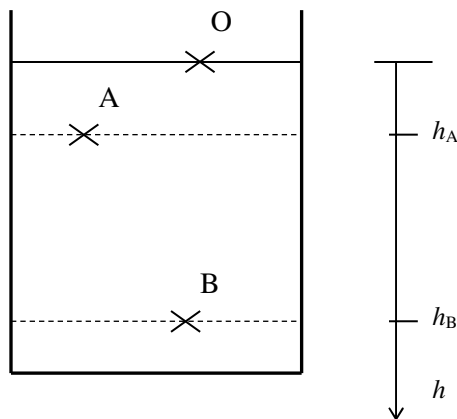
Attention : Pour le calcul de $\rho \cdot g \cdot h$, ρ s'exprime en kg/m^3 , g en N/kg et h en m.

2) En comparant les 2^{ème} et 4^{ème} lignes du tableau précédent, quelle est la relation que l'on peut déduire entre $P_{\text{mesurée}} - p_0$ et $\rho \cdot g \cdot h$?

Généralisation

Cette loi peut être généralisée si on prend comme référence un point A quelconque du liquide au lieu d'un point à la surface :

Écrire la relation générale :



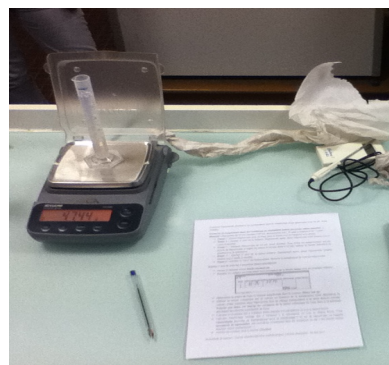
Annexe 2 concernant TP2

La rigueur de manipulation garantit-elle l'égalité des résultats expérimentaux ?	Durée 1 h 30
--	--------------

Évaluons l'incertitude attachée à un manipulateur pour le remplissage d'une éprouvette avec 25 mL d'eau distillée.

Matériel

- éprouvette de 25 mL
- pipette Pasteur
- thermomètre à 0,1 °C près
- balance à 10^{-2} g près.



Protocole de l'expérience dans des conditions de répétabilité

- ☞ **Étape 1** : Rincer l'éprouvette avec de l'eau, puis la rincer avec de l'acétone et la sécher.
- ☞ **Étape 2** : Ajuster le zéro de la balance. Rapidement après, peser l'éprouvette vide (masse m_1) et noter le résultat.
- ☞ **Étape 3** : Remplir l'éprouvette avec 25 mL d'eau distillée en évitant les éclaboussures sur les parois de l'éprouvette (sécher les éclaboussures avec du papier absorbant sinon), utiliser la pipette Pasteur pour terminer le remplissage au goutte-à-goutte (attention à la parallaxe et au ménisque).
- ☞ **Étape 4** : Ajuster le zéro de la même balance. Rapidement après, peser l'éprouvette remplie (masse m_2) et noter le résultat.
- ☞ **Étape 5** : Vérifier le "zéro" du thermomètre. Mesurer la température de l'eau de l'éprouvette.

Répéter 5 fois de suite les 4 premières étapes précédentes.

- ☞ Ouvrir le classeur Excel **Saisie-résultats.xls**.
- ☞ Remplir les cellules sur fond jaune (non protégées) de la feuille **Saisie** avec les résultats obtenus :

Température °C		Masse volumique g/L		
Essai	Masse verrerie vide (g)	Masse verrerie et eau (g)	Masse eau (g)	Volume eau (mL)
1				
2				
3				
4				
5				
			Moyenne	
			Ecart-type corrigé	

- ☞ Déterminer la masse de l'eau de chaque remplissage dans la colonne **Masse eau (g)**.
- ☞ Utiliser la masse volumique qui se calcule en fonction de la température², pour déterminer le volume d'eau contenue dans l'éprouvette lors de chaque manipulation et le saisir dans la colonne **Volume eau (mL)**. On considère que la température est constante tout au long de la manipulation. On néglige les variations de la masse volumique de l'eau dues à la présence d'isotopes des atomes constitutifs de l'eau.
- ☞ Calculer la moyenne des 5 volumes d'eau obtenus à la calculatrice ou avec le tableur Excel.
- ☞ Calculer l'écart type corrigé des 5 volumes à la calculatrice ou avec le tableur Excel. C'est l'**incertitude** associée au manipulateur pour le remplissage à 25 mL de l'éprouvette, on l'appelle **incertitude de répétabilité**, elle caractérise l'expérience dans les conditions où elle a été réalisée (même matériel, même manipulateur...).
- ☞ Vérifier les résultats dans la feuille **Résultats**.

² La masse volumique de l'eau dépend de la température t selon la relation suivante :

$\rho_{\text{eau}} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$ avec $a_0 = + 999,839\,563\,9$, $a_1 = - 0,067\,978\,299\,989$,
 $a_2 = - 0,009\,106\,025\,564$, $a_3 = + 0,000\,100\,527\,299\,9$, $a_4 = - 0,000\,001\,126\,713\,526$,
 $a_5 = + 0,000\,000\,006\,591\,795\,606$