

FONDEMENTS

ENERGETIQUES

DOCUMENT PEDAGOGIQUE

TP Etude d'un moteur thermique

PLATEFORME D'INGENIERIE EXPERIMENTALE
CAMPUS DE ST CYR L'ECOLE – BATIMENT 4

Table des matières

A.	Introduction	2
B.	Présentation du dispositif	2
1.	Méetrologie	2
2.	Acquisition.....	3
3.	Démarrage du TP	4
C.	Eléments d'analyse théorique.....	4
D.	Mise en pratique	5
1.	Fonctionnement à vide.....	5
2.	Fonctionnement en charge	6
E.	Discussions.....	6
1.	Biais expérimentaux	6
2.	Bilan énergétique	7



L'objectif de cette séance de travaux pratiques consiste à illustrer la notion de conservation de l'énergie totale à travers l'utilisation d'une machine thermique, i.e. un système de conversion d'énergie d'origine thermique en énergie mécanique utilisable.

Pour ce faire, de l'air considéré comme un gaz parfait est enfermé dans un réservoir et mis en contact alternativement avec deux sources de températures différentes avec lesquelles il échange de l'énergie sous forme de chaleur. Cet air est également en contact avec une paroi mobile (un piston) avec laquelle il échange de l'énergie sous forme de travail. Des masses sont disposées sur ce piston qui agit alors comme un monte-charge.

Toutes les transformations seront en première approximation considérées comme réversibles. Les cycles thermodynamiques obtenus seront commentés à la lumière des différents biais expérimentaux.

Mots-clés : pression, gaz parfaits, notion d'équilibre, premier principe, bilans, rendement

A. Introduction

La machine de conversion d'énergie que vous allez étudier est un véritable moteur thermique qui résulte d'un cycle à 4 étapes (compression, détente, chauffage, refroidissement). Ce cycle génère un travail utile qui permet d'élever une masse, tel un ascenseur. Les expériences réalisées dans ce TP vont vous permettre de vérifier que l'énergie utile nécessaire à l'élévation d'une masse m à travers la distance verticale z provient du travail fourni par le cycle thermodynamique, celui-ci pouvant être évalué à partir de l'aire fermée dans un diagramme pression - volume (p - V) obtenu expérimentalement. Ce TP va vous permettre de vous familiariser avec la mise en œuvre d'un cycle réel.

B. Présentation du dispositif

Le moteur thermique (Fig. 1) est constitué d'un cylindre transparent à l'intérieur duquel se déplace un piston de diamètre $D = 32.5$ mm. On considérera que ce déplacement se fait sans frottement. Une plateforme est attachée au piston afin d'y déposer les masses à soulever. La partie inférieure du cylindre située en dessous du piston est reliée par un tube flexible (de diamètre intérieur $D_t = 3$ mm et de longueur $L_t = 480$ mm) à un réservoir rendu hermétique par un bouchon en caoutchouc. Ce réservoir (de diamètre intérieur $D_r = 40$ mm et de longueur $L_r = 160$ mm) dans lequel l'air est emprisonné peut être plongé dans deux grands bacs remplis d'eau faisant office de source froide et de source chaude.

Il est à noter que le dispositif de mesure du déplacement est équipé d'un jeu de poulies reliant le plateau du piston à une masse suspendue. Cette masse suspendue a été choisie de sorte à ce que la tension qu'elle exerce contrebalance le poids du piston.

1. Métrologie

Trois types de capteurs permettent les mesures simultanées de la pression, de la température et du déplacement du piston. Chacun des capteurs produit une tension dont le signal est une application affine de la grandeur mesurée. Chacune des tensions est lue par un système d'acquisition, qui réalise la conversion analogique/numérique permettant l'acquisition sur un PC.

Les capteurs de température, de pression et de déplacement ainsi que les raccords rapides reliant les tubes flexibles au cylindre sont tout particulièrement fragiles. Il est donc important de **procéder avec précaution** lors de vos manipulations.

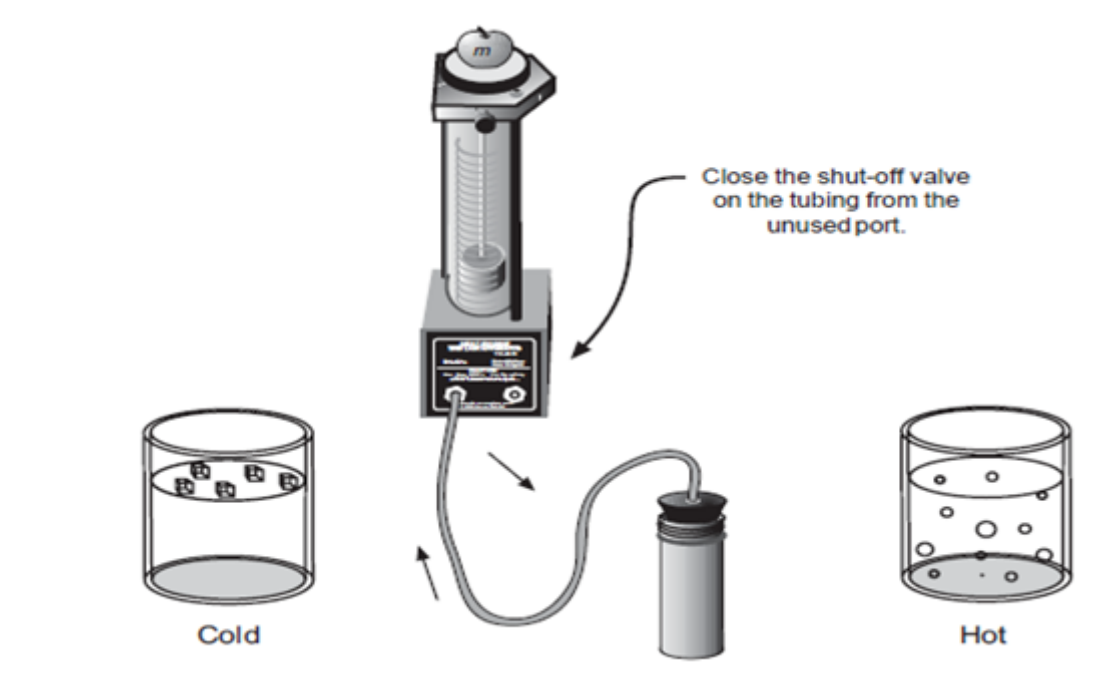


Figure 1 : Dispositif expérimental

2. Acquisition

L'acquisition en ligne des mesures est effectuée par un programme installé sous Windows. La page d'accueil par défaut du programme est présentée en figure 3.

Toute la phase d'étalonnage a été réalisée au préalable et intégrée au programme d'acquisition. Vous aurez ainsi directement accès aux mesures de la pression (en kPa), de la température (en °C) et du volume (en m³), ce dernier étant estimé à partir de la mesure du déplacement du piston. Vous verrez ces grandeurs apparaître dans le menu "Données".

Les figures 4 à 7 placées en fin de ce fascicule sont des captures d'écran de la séquence vous permettant de manipuler les tensions qu'envoient les capteurs. Dans cet exemple, l'unité de la mesure de pression est transformée de kPa en Pa.

Il vous faudra dans la suite de ce TP créer de nouvelles variables sur ce modèle. Par exemple, le volume mesuré est ici relatif à la position initiale du piston. Ce qui est donc mesuré est la variation de volume par rapport à cette position initiale. Or, il sera nécessaire de connaître le volume total de gaz contenu dans le système thermodynamique considéré. Pour cela, il suffira de créer une nouvelle variable, "volume total" à partir du volume existant en lui ajoutant le volume total de gaz contenu sous le piston, c'est à dire le volume du réservoir, du tube flexible et de la partie située sous le piston dans le cylindre¹.

Pour visualiser en ligne l'évolution de n'importe quelle grandeur, il suffit de la faire glisser depuis le menu "Données" vers l'onglet *graphique* du menu "Affichages", puis de cliquer sur "Démarrer".

¹ Il est conseillé de conserver un volume mort initial constant de sorte que l'expression du volume totale soit inchangée pour l'ensemble des manipulations.

3. Démarrage du TP

Lancer DataStudio². Placer le réservoir en pyrex après l'avoir rempli d'eau sur la plaque chauffante et fixer la consigne à la valeur 370. Plonger une des sondes de température (canal B ou C) dans l'eau afin de relever l'évolution de la température de l'eau au cours du régime transitoire (c'est à dire jusqu'à l'établissement du régime stationnaire où la température cesse d'évoluer au cours du temps). Suivre graphiquement cette évolution. Lorsque la température atteint 50 °C, établir la consigne à 150 à l'aide du potentiomètre tout en poursuivant l'acquisition.



C. Eléments d'analyse théorique

Pour tout système fermé, le premier principe de la thermodynamique postule l'existence d'une grandeur d'état extensive, appelée énergie interne et notée U , contribuant à l'énergie totale E du système, telle que la variation de cette énergie totale au cours d'une transformation infinitésimale subie par le système soit la somme des échanges de chaleur δQ et de travaux δW entre le système et son extérieur :

$$dE = d(U + E_c + E_p) = \delta Q + \delta W$$

où E_p est l'énergie potentielle et E_c l'énergie cinétique macroscopiques du système.

En considérant les seules forces de pression agissant sur le système, le travail élémentaire δW d'origine hydrostatique échangé par le système avec son extérieur est :

$$\delta W = -p_{ext}dV$$

Cette expression peut s'écrire

$$\delta W = -pdV$$

pour des transformations lentes (quasi-statiques) en absence de forces de frottements.

Il est proposé dans un premier temps de revenir sur la notion de pression. Vous devrez à l'issue de cette étape être capables de prédire son évolution (de manière quantitative) au cours de chaque évolution étudiée lors de ce TP.

1. Etablir la pression atmosphérique dans le réservoir. Il suffit pour cela de déconnecter un raccord rapide situé à la base du cylindre. Penser toutefois à rendre le système hermétique en le reconnectant.
2. Lancer l'acquisition. Relever la pression à vide (c'est à dire sans masse additionnelle posée sur le plateau) puis, pour 3 masses différentes³, par intervalles de 15s. Comment la pression mesurée évolue-t-elle avec la masse ajoutée ?

² Un raccourci appelé « version de base » devrait se trouver sur le bureau du PC. Faites un copier-coller de cette version.

³ Afin d'éviter de brusques variations de pression du gaz, il est conseillé lors de chaque manipulation des masses de maintenir le piston immobile en utilisant la vis de serrage prévue à cet effet.

3. A partir d'un bilan des forces appliqué au système piston + masse à l'équilibre, exprimer la pression du gaz contenu sous le piston.
4. Vérifier graphiquement que la mesure obtenue par la sonde de pression et affichée par le programme d'acquisition est conforme à l'estimation théorique.

5

Peut-on alors prédire l'évolution de la pression du gaz contenu dans un tel système entre deux états d'équilibre ?

Une fois comprise la façon dont la pression est déterminée dans le gaz, il est indispensable de conclure cette analyse théorique préliminaire en appréhendant la chaîne de conversion d'énergie à l'œuvre dans cette machine thermique.

5. En considérant le modèle thermoélastique cylindre + piston, montrer que l'énergie utile nécessaire à l'élévation du piston de masse M sur lequel repose une masse m provient du travail des forces de pression fourni par le gaz chauffé.

D. Mise en pratique

1. Fonctionnement à vide

Nous allons maintenant tenter de mettre en œuvre un cycle thermodynamique capable de fournir l'énergie nécessaire à l'élévation d'un système massif. Sachant depuis le second principe de la thermodynamique qu'un cycle ne peut être moteur que si le système est en contact avec deux sources de températures différentes, nous allons successivement mettre en contact le réservoir avec les bacs d'eau froide et chaude.

Positionner le piston 10 mm au-dessus de sa base tout en établissant la pression du gaz à la pression atmosphérique, le réservoir étant plongé dans la source froide. S'assurer de l'étanchéité du système. Lancer l'acquisition. Utiliser l'affichage graphique du diagramme de Clapeyron (p - V). Plonger ensuite le réservoir dans la source chaude. Puis, une fois la position du piston établie, plonger à nouveau le réservoir dans la source froide.

- Qu'observez-vous au niveau du piston ?
- Comment la pression a-t-elle évoluée au cours de ces deux transformations ?
- Quel est le travail utile fourni par le gaz ?

– Appliquer le premier principe de la thermodynamique au système gaz. Quelle est la condition sur les échanges de chaleur entre le gaz et les deux sources pour que le travail échangé sur un cycle soit strictement négatif, c'est à dire qu'il soit moteur ?

2. Fonctionnement en charge

Nous allons maintenant étudier deux nouveaux cycles par l'ajout de deux masses différentes et obtenir expérimentalement leur tracé dans le diagramme de Clapeyron selon le protocole suivant :

1. Lancer l'acquisition.
2. Utiliser l'affichage graphique du diagramme de Clapeyron (p-V).
3. Positionner le piston 10 mm au-dessus de sa base et mettre le gaz au contact de la source froide à la pression atmosphérique.
4. Assurer l'étanchéité du système.
5. En utilisant la vis de blocage du piston, disposer une masse sur le plateau. Relâcher le plateau. Relever sur le cylindre, la nouvelle hauteur du piston.
6. Mettre le système gaz en contact de la source chaude. Relever la nouvelle hauteur du piston sur le cylindre.
7. En utilisant la vis de blocage du piston, extraire la masse du plateau. Relâcher le piston. Relever la nouvelle hauteur du piston sur le cylindre.
8. Remettre le système gaz en contact de la source froide.
9. Arrêter l'acquisition.

De quelles natures sont les transformations thermodynamiques obtenues ?

E. Discussions

1. Biais expérimentaux

L'analyse théorique de ces cycles repose sur un certain nombre d'hypothèses plus ou moins restrictives, parmi lesquelles :

- toutes les évolutions élémentaires sont supposées réversibles.
- le comportement de l'air peut être modélisé par la loi du gaz parfait.
- le système thermodynamique étudié est fermé.
- les forces de frottements demeurent négligeables.

On se propose donc ici de discuter de la validité de certaines de ces hypothèses et de prendre du recul par rapport aux mesures qui viennent d'être faites afin d'envisager quels biais expérimentaux susceptibles de fausser notre analyse auraient pu nous échapper.

1. Imaginer une manipulation permettant de vérifier que le système peut rigoureusement être qualifié de fermé.
2. Représenter pour un cycle de votre choix le rapport pV/T en fonction du volume.
3. Imaginer une expérience permettant d'estimer le temps de réponse caractéristique de la sonde de température.

4. Quel est le temps caractéristique d'une transformation élémentaire ?

Qu'en déduisez-vous ?

Lors de la manipulation consistant à décrire un cycle à vide, vous avez certainement remarqué que l'aire sous la courbe dans le diagramme (p-V) n'était en fait pas nulle, i.e. que le système échangé donc du travail avec son extérieur.

- D'où provient la variation de pression ?
- Quel est le signe de ce travail ? A quoi sert-il donc ?

2. Bilan énergétique

Pour chacun des cycles :

1. Déterminer le travail du cycle.
2. Estimer les quantités de chaleur échangées au cours des quatre transformations élémentaires.
3. Estimer le rendement énergétique de chaque cycle.
4. Comparer au rendement théorique du cycle de Carnot qui serait obtenu entre les mêmes sources froide et chaude.

Proposer une manipulation permettant d'améliorer les rendements des cycles mesurés. La mettre en œuvre sur un cycle.

n°essai	masse ajoutée [g]	T_{SF} [°C]	T_{SC} [°C]	Q_{SF} [J]	Q_{SC} [J]	W_{cycle} [J]	η_{cycle} [J]	Observations

Figure 2 : Tableau récapitulatif des résultats

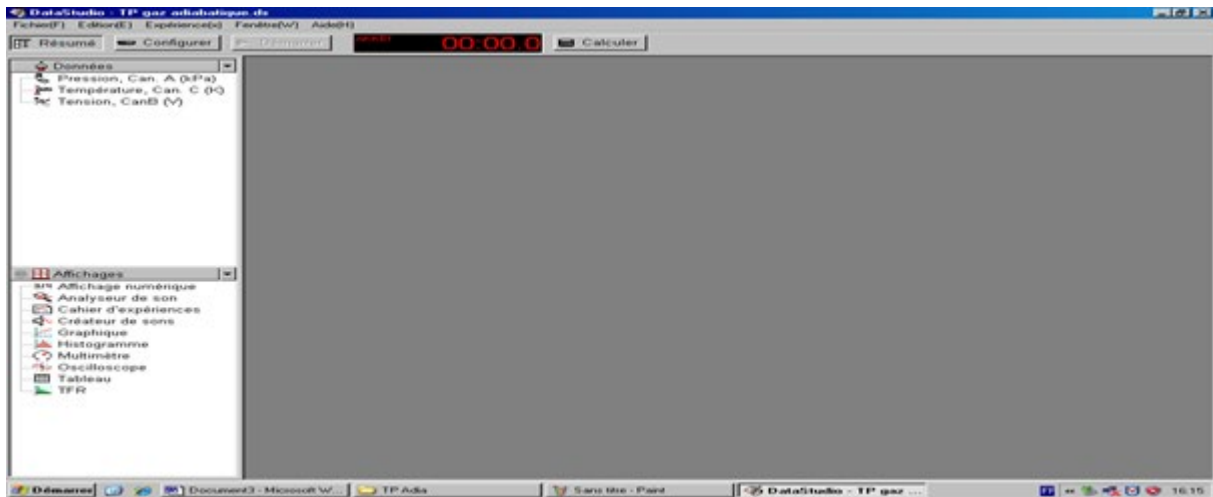


Figure 3 : Page d'accueil du logiciel d'acquisition

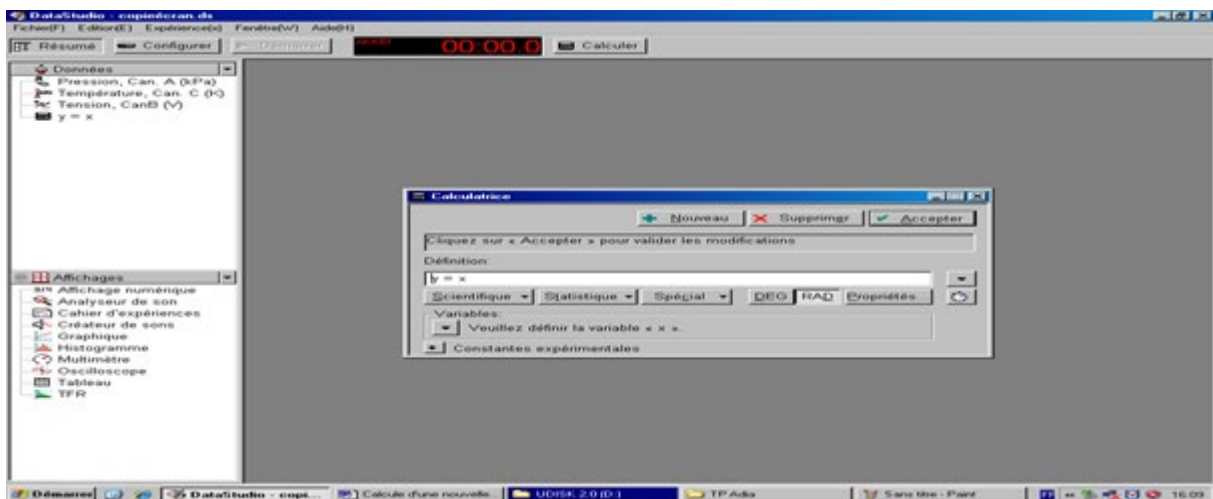


Figure 4

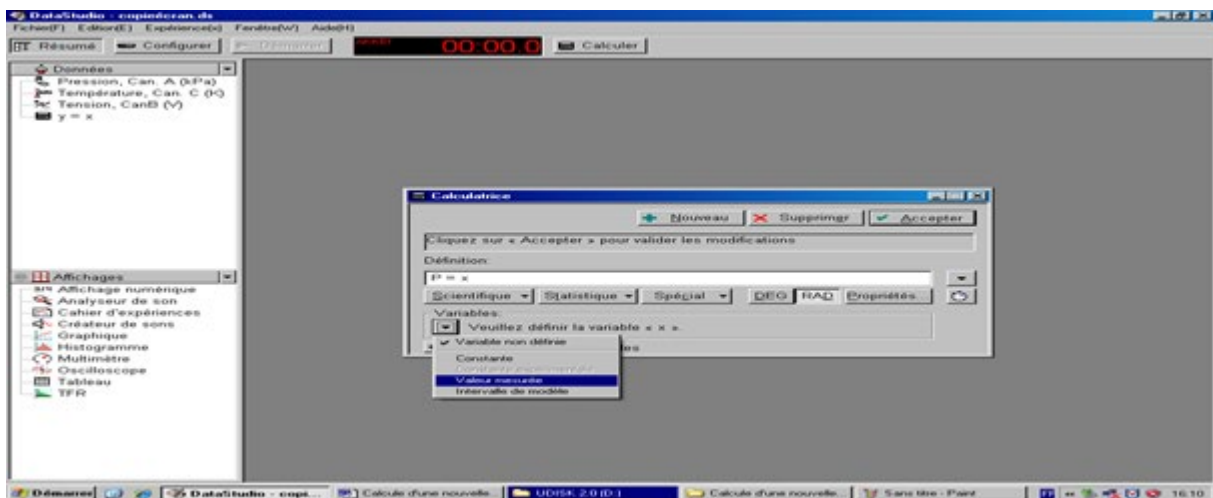


Figure 5

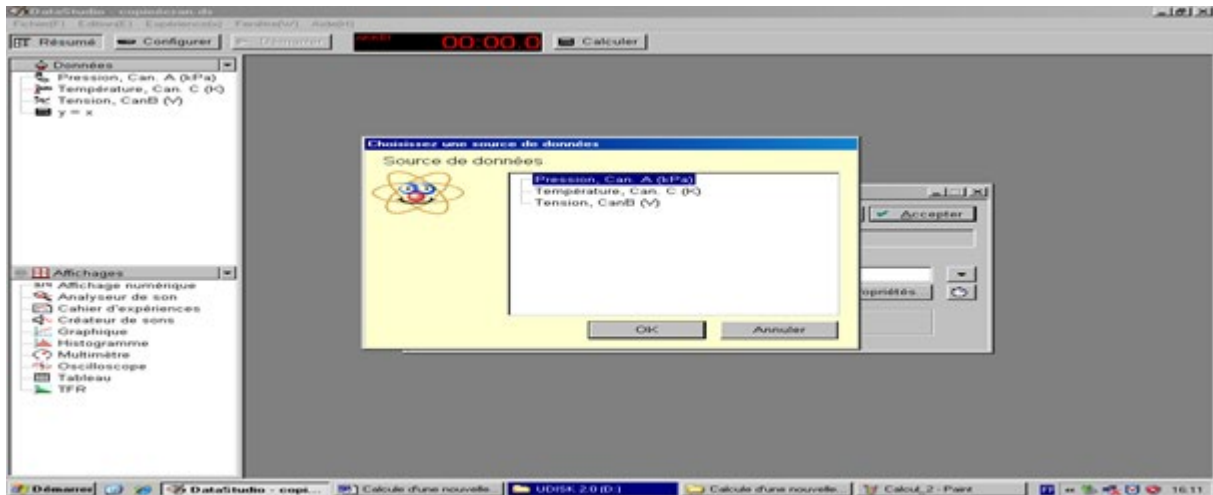


Figure 6

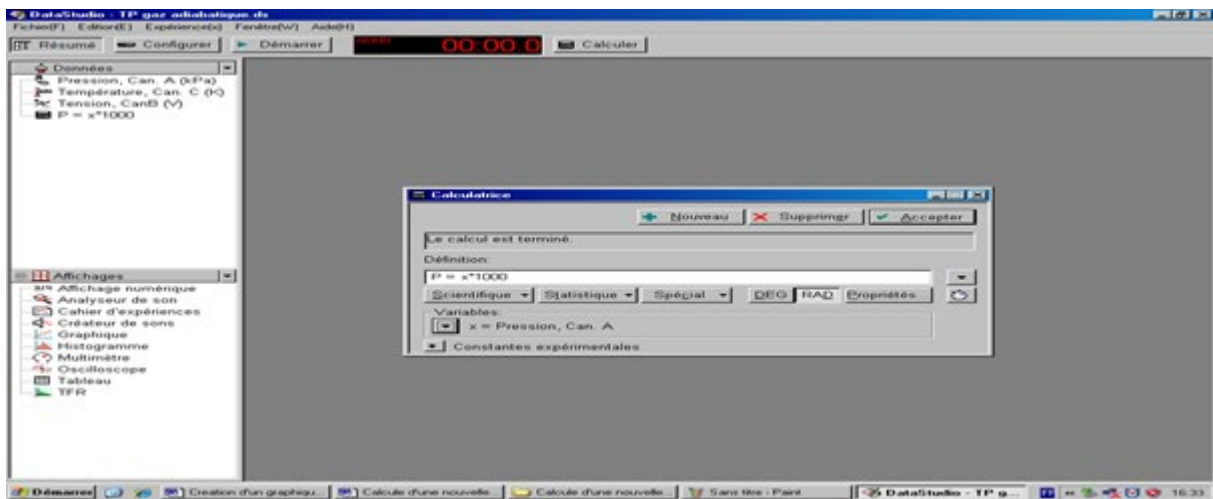


Figure 7

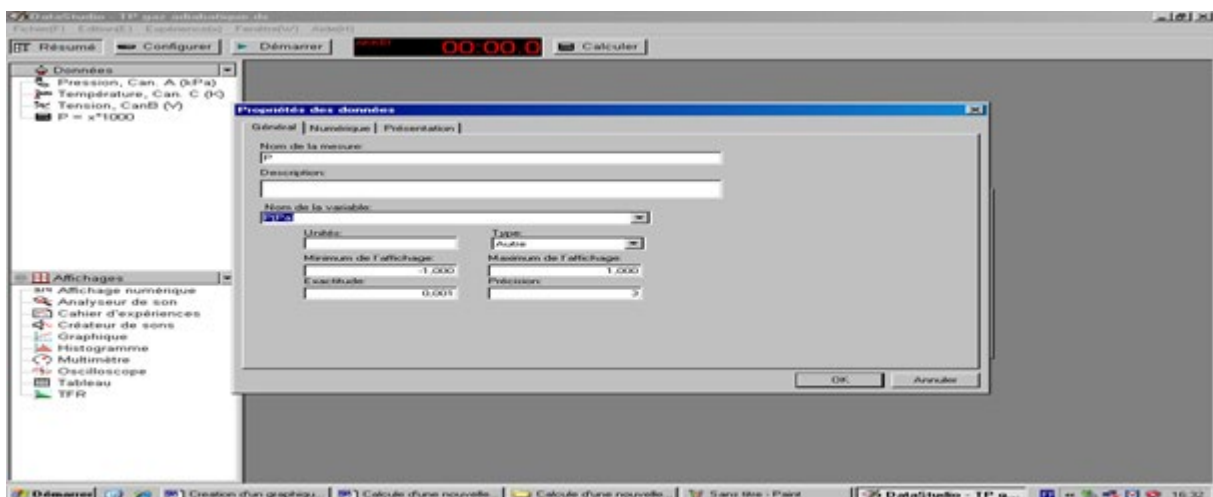


Figure 8

SORBONNE UNIVERSITE

Faculté des Sciences et Ingénierie

Plateforme d'Ingénierie Expérimentale

Campus de Saint-Cyr-l'Ecole

2 Place de la Gare de Ceinture

78210 SAINT CYR L'ECOLE



Campus de St Cyr - Sorbonne Université

REJOINDRE LA PLATEFORME

Accès en **train**, arrêt Saint Cyr :

Depuis Montparnasse, ligne N

Depuis La Défense, ligne U

Depuis Saint Michel ND, RER C

Prévoir ensuite 10 mn de **marche**

Accès en **voiture** :

Coordonnées GPS

N 48.80217°

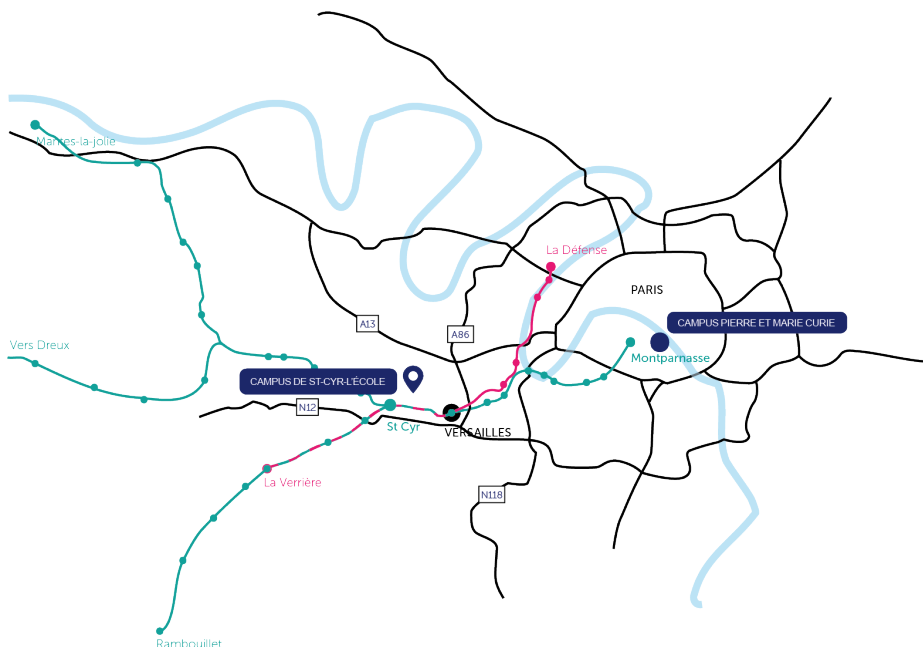
E 2.07639

Accueil campus

01.44.27.95.64

Informations et réservations TP

01.44.27.95.22



→ www.sorbonne-plateforme-ingenierie-experimentale.fr