

Température et pression dans une cocotte-minute en fonctionnement

par Paul DROUILLON
Groupe EVARISTE/CNAM, DLC15
68160, Sainte Marie aux Mines

RÉSUMÉ

Il s'agit d'une expérience de cours assistée par ordinateur.

La température et la pression sont mesurées dans une cocotte minute en fonctionnement. Les courbes $\theta = f(t)$ et $p = g(t)$ se construisent point par point devant les élèves.

Deux niveaux d'exploitation sont possibles :

- 1^{er} niveau : collège et lycée : mise en évidence des paliers de changement d'état.
- 2^{ème} niveau : CPGE, DEUG, TS, IUT : Vérification des lois de la thermodynamique concernant la pression de vapeur saturante.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- cocotte SEB 8 litres,
- couvercle modifié et pièces pour passage des capteurs,
- sonde en température LM35DZ, précision $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$,
- sonde en pression 0,0 – 2.5 bars absolue.

(Cet ensemble est distribué par Microlec sous le nom de **COCOT-TOR**).

- ordinateur compatible PC, écran couleur VGA,
- interface ORPHY-GTS,
- logiciel MELORPHY ou REGORPHY pour l'acquisition,
- logiciel REGORPHY pour le traitement des mesures,
- réchaud électrique puissance 2 kW réglable de 0 à 6.

La transformation du couvercle, pour permettre le passage des sondes en température et/ou en pression, a été réalisée par un élève ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (Centre de Chalons-sur-Marne), avec l'aide des techniciens d'atelier et sous la direction de ses professeurs.

Que tous trouvent ici l'expression de mes remerciements pour l'aide qu'ils m'ont apportée à la mise au point du prototype du matériel nécessaire à la manipulation.

Mes remerciements vont également à la Société SEB pour son aide et ses conseils.

Mise en garde : Pour des raisons de sécurité ne pas chercher à bricoler la transformation du couvercle qui doit être réalisée par des professionnels !

1. EXEMPLE D'EXPLOITATION EN LYCÉE ET COLLÈGE (graphique 1)

Il s'agit de montrer que la vaporisation de l'eau, à pression constante, se fait à température constante, et que la température d'ébullition dépend de la pression.

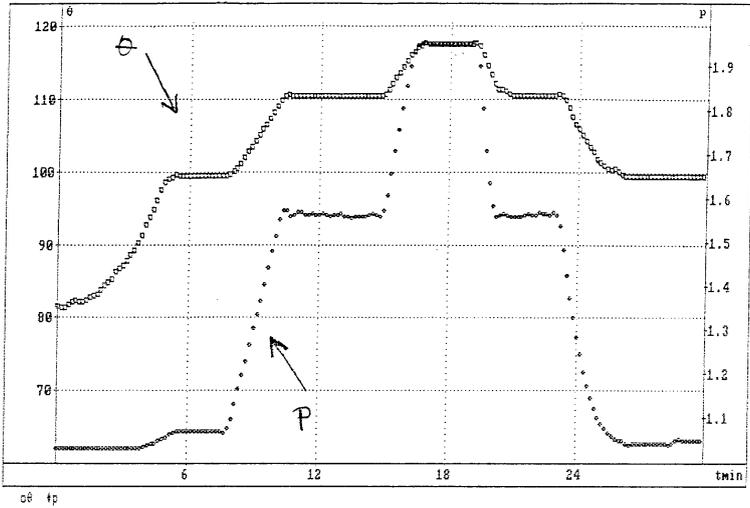
Dans cette expérience, l'embase d'origine fixée sur le couvercle de la cocotte et destinée à recevoir la soupape tournante est utilisée normalement.

La sonde en pression et une sonde en température sont fixées sur les pièces ad-hoc du couvercle transformé, la sonde en température est fixée de telle sorte qu'elle mesure la température de la vapeur d'eau.

Pression p en bar, température θ en $^{\circ}\text{C}$.

Température de l'eau en début d'expérience : $\approx 80^{\circ}\text{C}$.

Durée de l'expérience 30 mn, une mesure toutes les 10 s, réchaud du réchaud 5, environ 1.5 litres d'eau dans la cocotte.



Graphique 1: Évolution de la température et de la pression dans une cocotte minute
 θ = température de la vapeur en °C
 p = pression en bar
 t_{min} = durée en minutes

a) La soupape tournante est enlevée. Il y a élévation de température de la vapeur d'eau à la pression atmosphérique. On note une légère surpression de vapeur au moment de l'ébullition et le palier de température (99.6°C).

b) La soupape tournante est mise en place. Il y a élévation de la pression et de la température. Au moment de la mise en rotation de la soupape, on constate **corrélativement** l'apparition des paliers en pression (1.56 bar) et en température (111°C).

c) Après quelques minutes, on empêche la soupape de tourner (mettre le doigt dessus).

Il y a alors élévation de la pression et de la température jusqu'au déclenchement de la soupape de sécurité. Dès que la soupape de sécurité fonctionne régulièrement, on note l'apparition des paliers en pression (1.95 bar) et en température (118°C).

Comme on peut le constater sur le graphique, les paliers sont très nets.

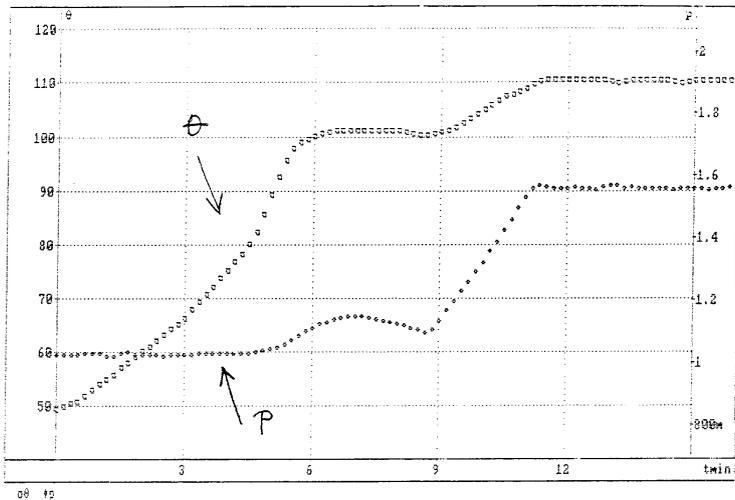
d) Il est alors intéressant de libérer la rotation de la soupape. On constate que la pression revient à la valeur de 1.56 bar et que la température revient à 111°C.

e) On peut enfin enlever la soupape tournante, la pression est à nouveau la pression atmosphérique et la température revient à la valeur du premier palier.

Les parties *d)* et *e)* montre bien que si un système physique est ramené dans les mêmes conditions on obtient les mêmes réponses, ce qui, au niveau des lycées et des collèges, est un des fondements des Sciences Physiques.

QUELQUES RÉSULTATS PARTICULIERS

Si la puissance de chauffe est trop importante, on peut mettre en évidence une surpression notable lors de la partie a), entraînant une température d'ébullition supérieure à 100°C. Pour faire cesser cette surpression, il faut diminuer le chauffage et tout «rentre dans l'ordre» (Graphique 2).



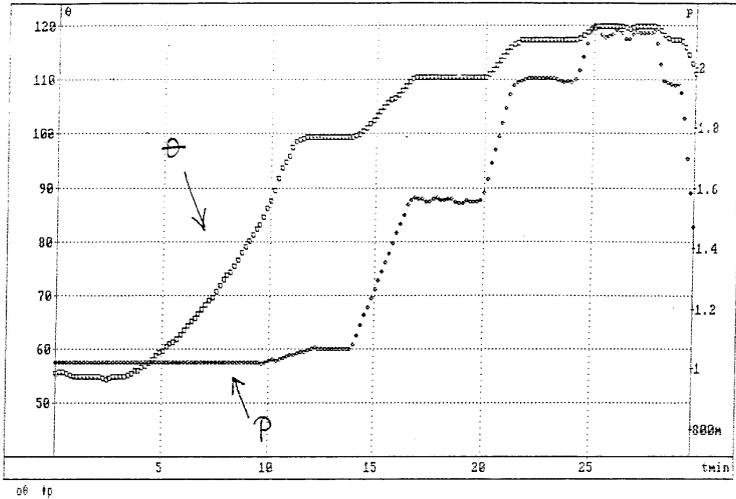
Graphique 2 : Enregistrement avec surchauffe au début de la manipulation, réduction du chauffage et mise en place de la soupape tournante, (cf. 5^{ème}-9^{ème} minute)

θ = température de la vapeur en °C

p = pression en bar

t_{min} = durée en minutes

Si l'on bloque la soupape de sécurité en même temps que la soupape tournante, l'étrier qui maintient le couvercle va se déformer et la vapeur va s'échapper par le couvercle qui se soulève, provoquant des oscillations de relaxations. C'est ce que montre le graphique 3.



Graphique 3 : Enregistrement avec blocage de la soupape de sécurité.

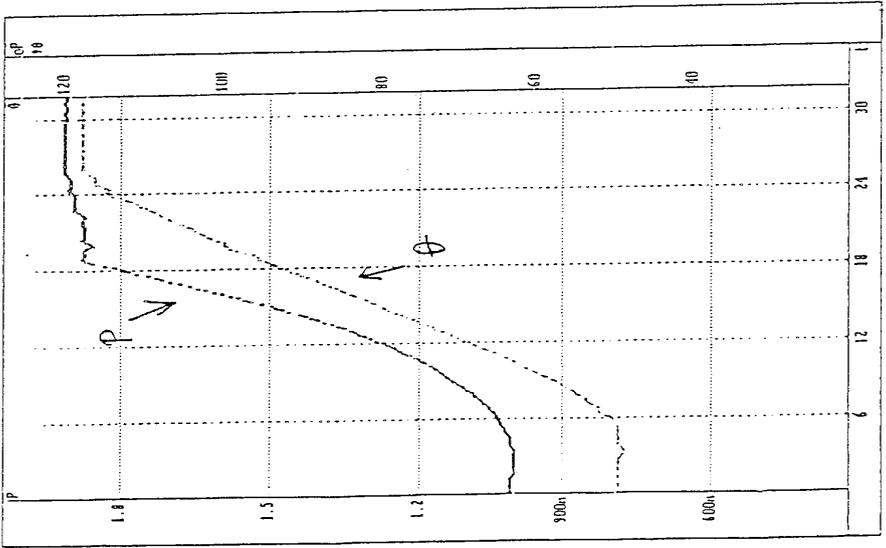
Quatre paliers : $\theta_1 = 99,7^\circ\text{C}$, $p_1 = 1,02$ bar ; $\theta_2 = 11^\circ\text{C}$, $p_2 = 1,56$ bar ; $\theta_3 = 118^\circ\text{C}$, $p_3 = 1,96$ bar ; $\theta_4 = 120^\circ\text{C}$, p oscille entre 2,08 et 2,14 bar.

θ = température de la vapeur en $^\circ\text{C}$

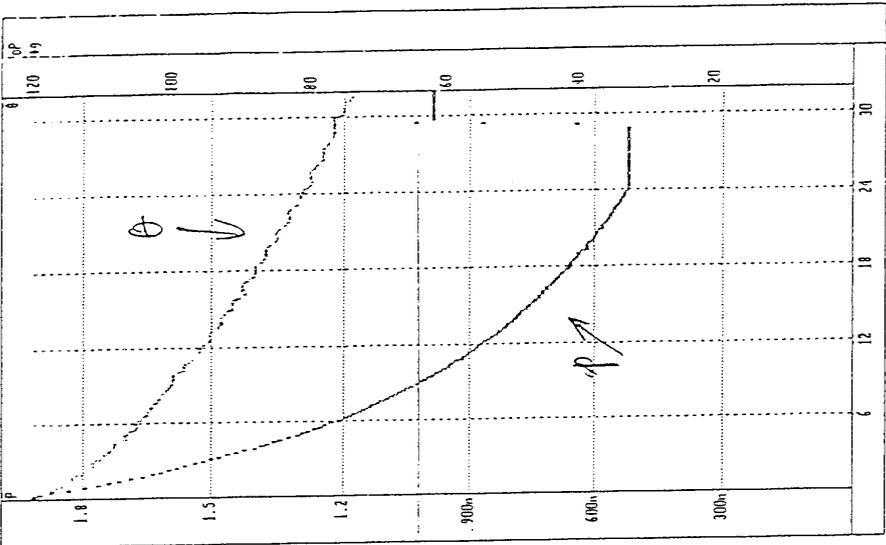
p = pression en bar

t_{min} = durée en minutes

Attention, ne faire cette dernière manipulation que rarement et avec beaucoup de précautions : le couvercle peut rester déformé.



Graphique 4-1 : Exemples des courbes obtenues :
On voit nettement le rôle de la soupape de sécurité.



Graphique 4-2 : On remarque la dépression dans la cocotte lors du refroidissement.

Les documents page ci-contre, graphiques 4-1 et 4-2 correspondent à des manipulations où la sonde de température se trouve dans la vapeur, le deuxième passage de sonde est obturé, l'embase de la soupape tournante est utilisée pour la sonde de pression. Seule la soupape de sécurité est active ; par construction elle déclenche à 1.9 bar absolue (donnée constructeur).

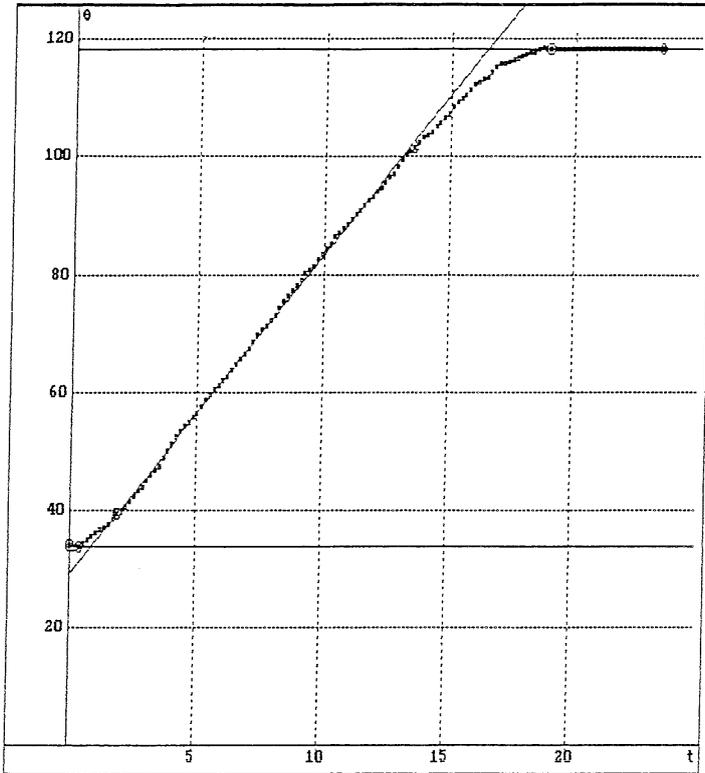
Cette configuration est nécessaire pour pouvoir étudier la température et la pression lors du refroidissement de la cocotte.

4-1 Chauffage : Les mesures démarrent 3 minutes avant que le réchaud soit mis en fonctionnement.

On constate la montée régulière de la température, le déclenchement de la soupape de sécurité à 1.9 bar à la 19^{ème} minute, à partir de la 25^{ème} minute paliers en pression (1.9 bar), et en température (118°C).

4-2 Refroidissement : C'est la suite de la courbe précédente, la cocotte a été posée sur la paillasse de chimie.

On constate la décroissance rapide de la pression; dès la 8^{ème} minute, l'intérieur de la cocotte est en dépression, (phénomène bien connu, mais pas toujours expliqué de la difficulté d'ouvrir la cocotte lorsqu'elle a refroidi) ; à la 24^{ème} minute la limite des possibilités de la sonde de pression utilisée est atteinte, (COCOTTOR comporte une sonde mieux adaptée), à la 29^{ème} minute, l'intérieur de la cocotte est mis en communication avec l'extérieur.



Graphique 5 : Modélisation du chauffage

θ = température en °C

t = durée en minutes

Modèle	$\theta = a$	$\theta = b * t + c$	$\theta = d$
	$a = 33.7 \pm 0,210$	$b = 5.42 \pm 0.038$	$d = 118$

La représentation graphique a fait l'objet d'une modélisation en trois parties. Jusqu'à 100°C, les déperditions calorifiques de la cocotte sont négligeables, on constate en effet que $\Delta\theta = b \cdot \Delta t$. Le palier à 118°C est également bien marqué.

Puisque nous chauffons avec un réchaud électrique, il me paraît possible de pouvoir exploiter cette manipulation pour faire une étude du rendement de l'installation. Pourquoi ne pas envisager de calorifuger la cocotte ou d'utiliser une cocotte à fond inox en recommençant l'expérience «toutes choses égales d'ailleurs» ?

2. EXPLOITATION EN POST-BAC Documents A-B-C-D

Pression p en atmosphère ($1\text{atm} = 1,013 \text{ bar}$), T en Kelvin.

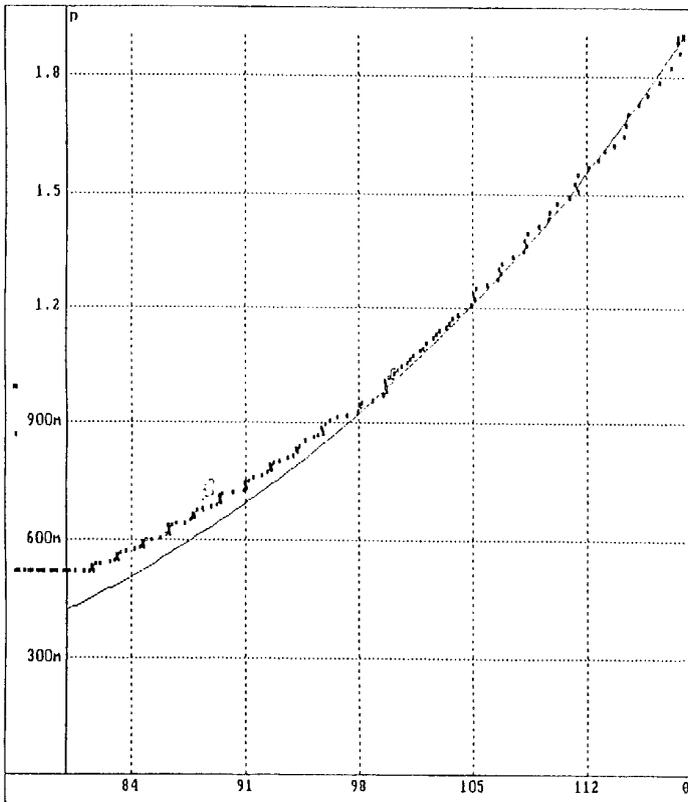
Le matériel choisi permet d'obtenir une précision de 2 %.

Le montage des sondes est celui correspondant au graphique 4.

Lors du refroidissement (Graphique 4-2), la pression mesurée est la pression de vapeur saturante de l'eau. On peut donc vérifier la validité d'un certain nombre de formules, que ces formules soient empiriques ou déduites des formules de Clapeyron.

Vérification de la formule de Duperray :

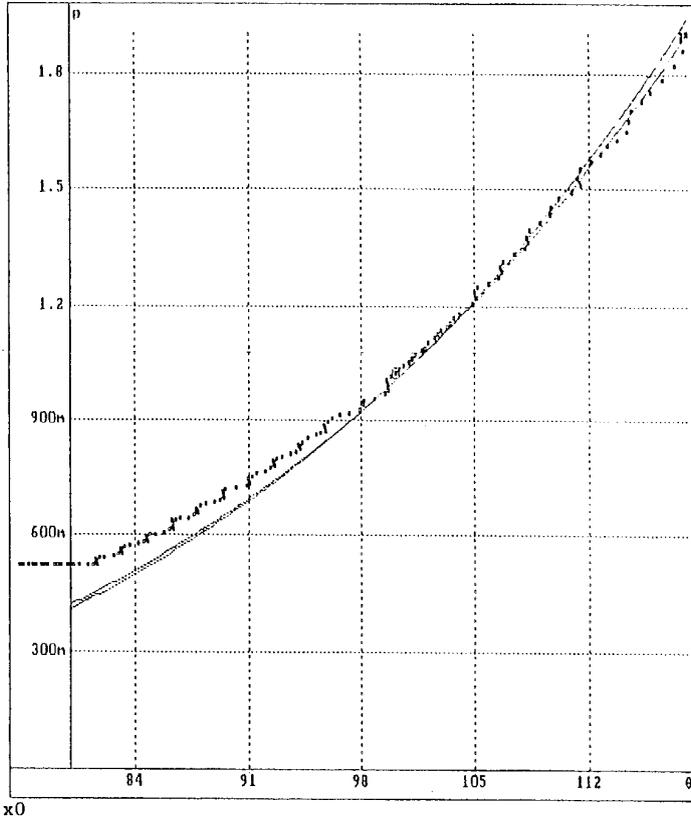
A-1 Modélisation de $p = \left(\frac{\theta}{100}\right)^c$ entre 100°C et 118°C on trouve $c = 3.88$.



x0
Graphique A-1

A-2 Superposition de la courbe précédente avec la courbe d'équation

$$p = \left(\frac{\theta}{100} \right)^4.$$



Graphique A-2 :

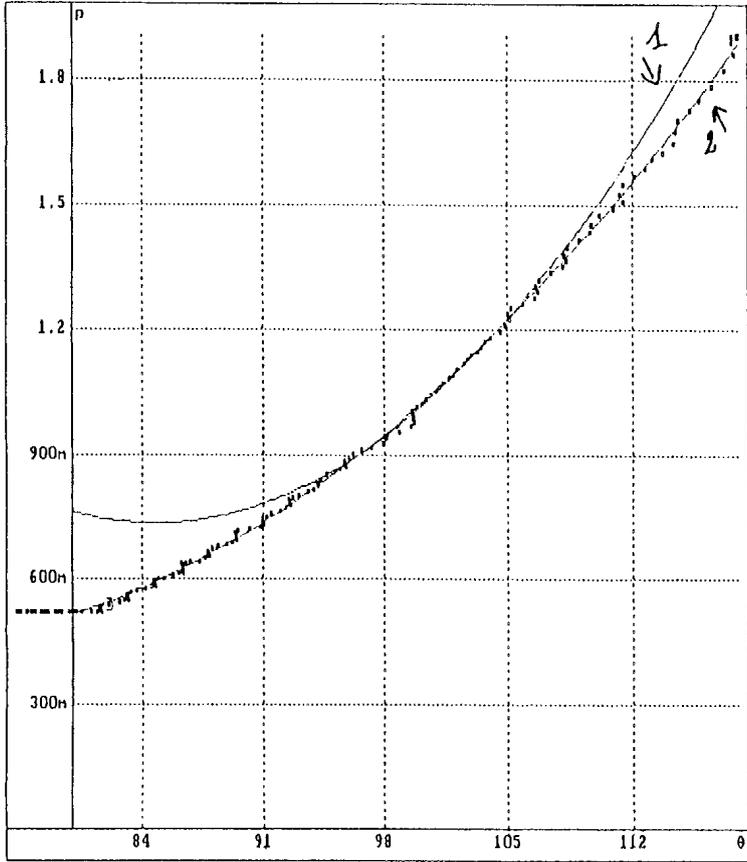
superposition de $p = \left(\frac{\theta}{100} \right)^C$ $C = 3,88$ avec $p = \left(\frac{\theta}{100} \right)^4$.

Duperray avait trouvé empiriquement la formule $p = \left(\frac{\theta}{100} \right)^4$ en faisant tous les calculs à la main (il n'y avait pas de calculettes...).

On remarque la très bonne qualité de cette formule empirique.

Modélisation de $p = f(\theta)$ avec un développement limité :*B-1* Autour du point 100°C (bornes 95° – 100°)

$$p = a + b * (\theta - 100) = c * (\theta - 100)^2$$

superposé à : $p = a + b * \theta + c * \theta^2$ 

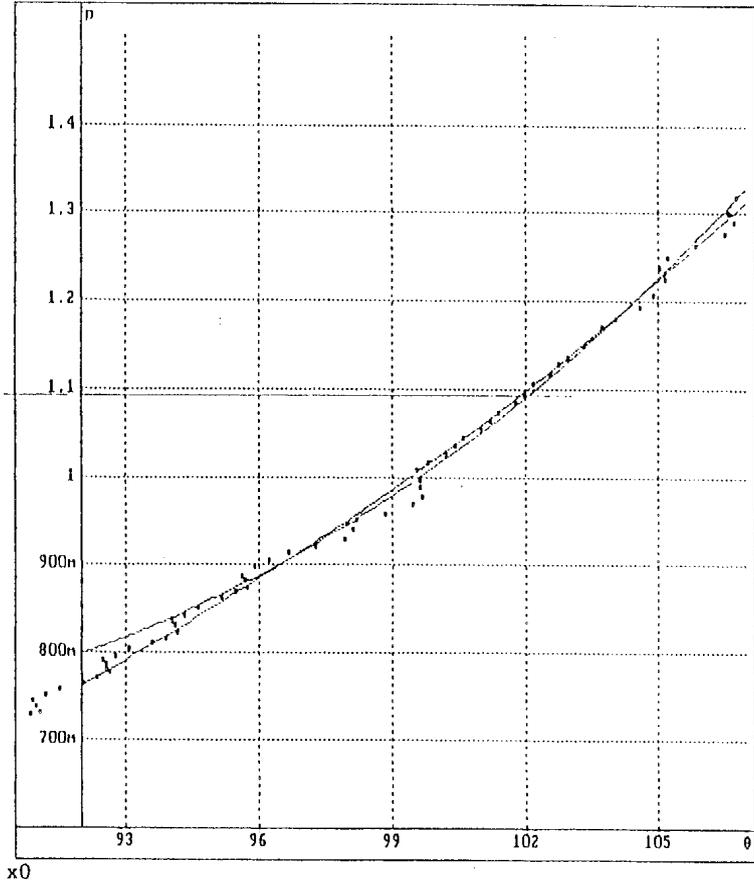
x0

Document B-1 :

Superposition de la modélisation 1) et 2)

1) $p = a + b(\theta - 100) + c(\theta - 100)^2$ entre 95°C et 105°C.2) $p = a + b\theta + c\theta^2$ entre 82°C et 118°C.

B-2 Est un agrandissement de la partie centrale des courbes tracées en B-1.



Document B-2 :

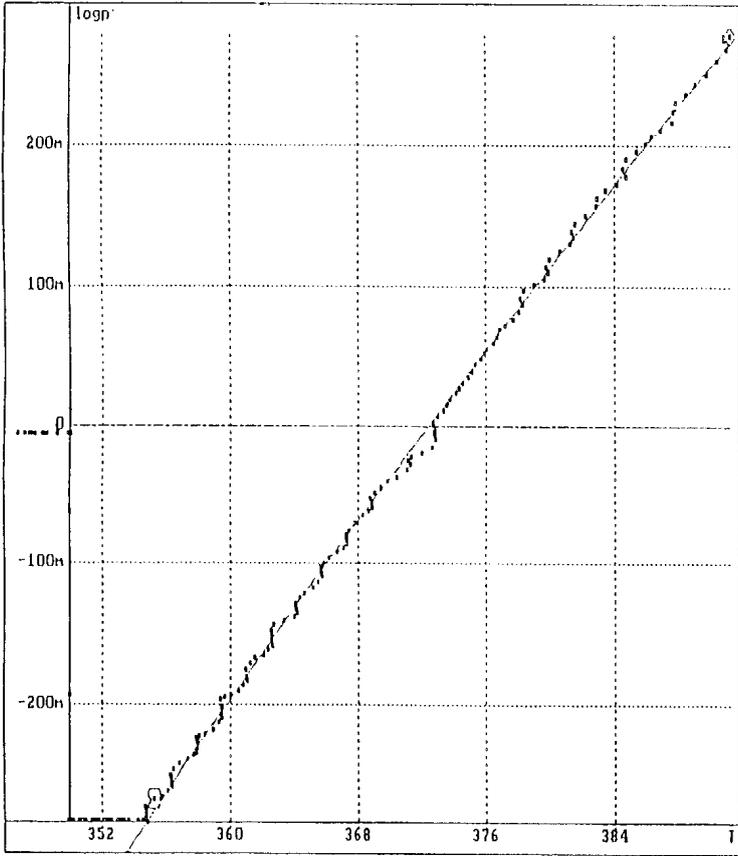
Superposition des modélisations 1 et 2 agrandissement

On notera la très légère différence entre les deux modélisations, différence invisible sur le document précédent dans la partie centrale.

Modélisations déduites des formules de Clapeyron :

C-1 Formule de Rankine-Callendar.

$$\log_{10}(p) = A - \frac{B}{T}$$



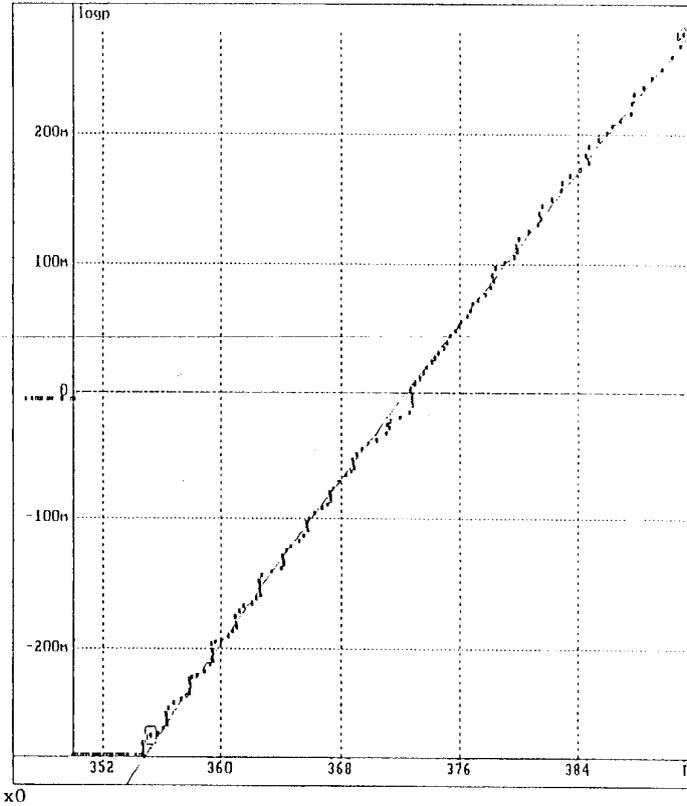
x0

Document C-1 :

$$\log p = A - B/T$$

$$A = 5,738 \pm 0,031 \quad B = 2140 \pm 11$$

C-2 Formule de Dupré $\log_{10}(p) = A - \frac{B}{T} - C * \log_{10}(T)$



Document C-2 : $\log p = A - B/T - 3,868 + \log T$

$$A = 17,36 \pm 0,033 \quad B = 2763 \pm 12$$

N.B. On touche là une limite de la manipulation et/ou de la modélisation : Avec certains enregistrements, j'ai obtenu $C=0$, ce qui peut se comprendre, le troisième terme étant un terme correctif, avec d'autres le logiciel n'arrivait plus à modéliser. En «forçant» alors le coefficient C à 3.868 on trouve des valeurs en accord avec les valeurs du BRUHAT de Thermodynamique (éditions Belin 1968 p. 256) : pour $C = 3.868$.

$$\begin{array}{ll} \text{Belin : } A = 17,44 & \text{Modèle : } A = 17,36 \\ B = 2795 & B = 2763. \end{array}$$

Modélisation proposée par les élèves :

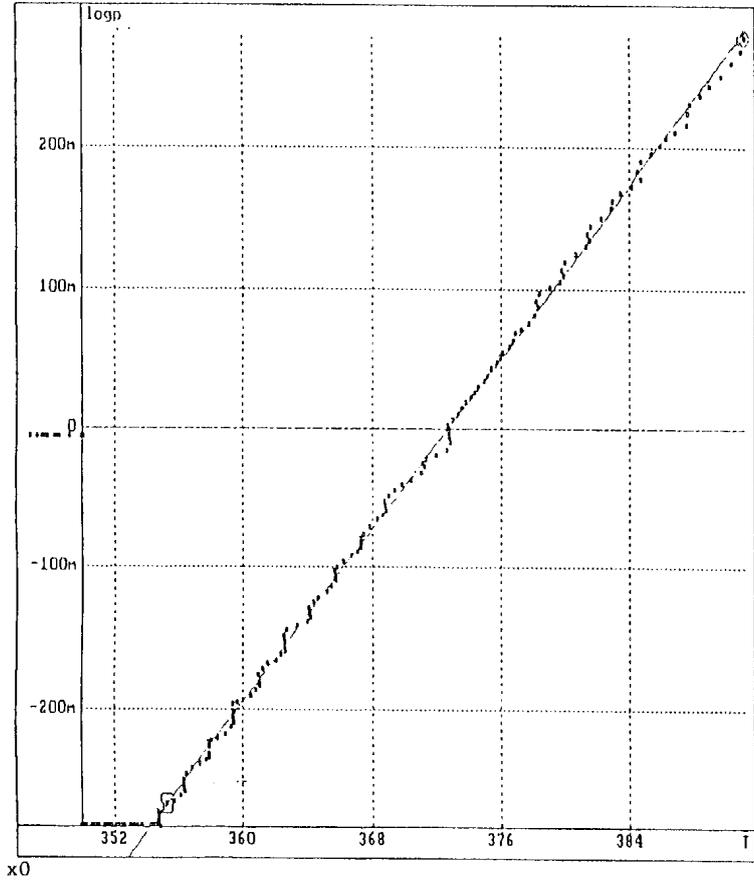
Face à l'allure de la représentation graphique de :

$$\log_{10}(p) = f(T)$$

la modélisation «naturelle» proposée par un élève sera :

$$\log_{10}(p) = A + B * T$$

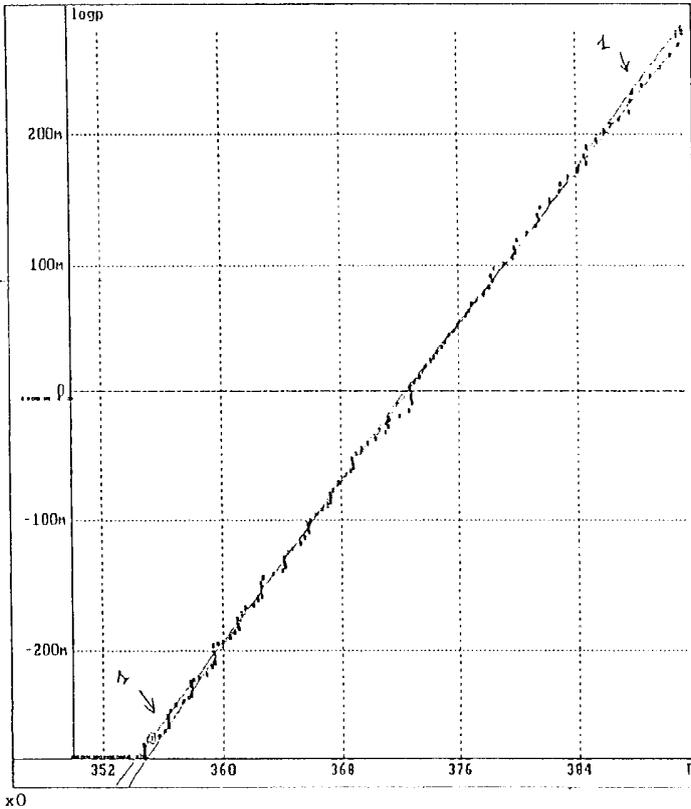
D-1 C'est cette modélisation qui est proposée.

**Document D-1 :**

$$\log p = A + B * T$$

$$A = -5,723 \pm 0,030 \quad B = 5,723 \pm 0,030$$

D-2 présente la superposition précédente avec celle de Dupré.



Document D-2 :

Superposition de $\log p = A + B * T$

- 1) $\log p = A + B * T$ avec
- 2) $\log p = A - B/T - 3,868 * \log T$
- 1) est au dessus de 2.

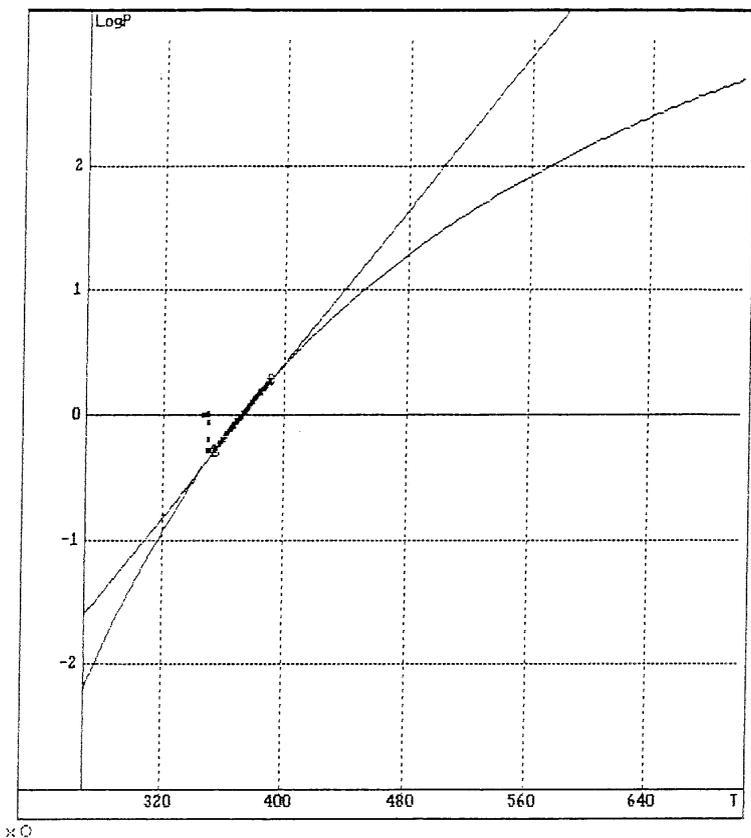
On peut remarquer la très légère courbure de la modélisation de Dupré par rapport à la droite $\log_{10}(p) = A + B * T$.

Remarque

Il me semble que ce travail peut être l'occasion de mener une réflexion critique sur la notion et les limites de la modélisation d'un phénomène physique. On pourra aussi faire réfléchir les élèves sur les

problèmes de l'extrapolation des lois physiques, dès lors que l'amplitude de la mesure est faible par rapport à l'étendue de l'extrapolation.

C'est ce que le document ci-dessous essaye de mettre en évidence.



Document D-3 :

Superposition de $\log P = A - B/T$
avec $\log P = A + B * T$
et extrapolation de 273°K à 700°K.

EN GUISE DE CONCLUSION QUELQUES PISTES À EXPLORER

D'autres manipulations sont possibles :

- Étude du changement d'état de mélanges,
- Étude de l'ébullition de l'eau sucrée et de l'eau salée, mais je crains que la précision de la sonde de température ne permette pas de vérifier la formule de l'ébullioscopie : $\Delta\theta = K * \frac{S}{M}$,
- Étude du comportement des différents paramètres en mettant des légumes dans la cocotte.

Le matériel est prévu pour pouvoir remplacer la sonde de pression par une sonde de température plongeant dans le liquide. Il est intéressant de voir évoluer simultanément les deux courbes.

Rappel

- L'étude du refroidissement nécessite que la pression soit prise sur l'embase de la soupape tournante, sinon il y a des entrées d'air dans la cocotte lorsqu'elle est en dépression par rapport à l'extérieur.
- Il ne faut pas «bricoler» la transformation du couvercle.
- L'ensemble du matériel COCOTTOR, l'interface ORPHY-GTS et les logiciels utilisés, sont diffusés par la Société MICRELEC - 77120 Coulommiers.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- G. BRUHAT - Cours de Physique générale
Thermodynamique - Ed. Masson et Cie - 1968.
- DÉVORÉ et ANNEQUIN - Cours de Physique
Thermodynamique et Chaleur (tome 1) - Ed. Vuibert - 1966.
- De LAHARRE - Notes et Formules de l'Ingénieur - tome 1
21^{ème} édition - Ed. Albin Michel - 1923.