

DM 4 -- Machines thermiques et bilans macros (à rendre le 28/11/2016)

Problème 1 : Etude machine thermique, diagramme (logP,h) (extrait Banque PT)

PT Epreuve de Physique C : Thermodynamique

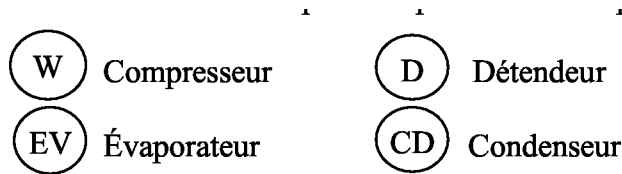
Durée 2 h

L'épuisement progressif des réserves de pétrole et de gaz, le coût du chauffage électrique, amènent à envisager des solutions de chauffage, qui, dans certains cas, s'avèrent plus économiques, entre autres les PAC (pompes à chaleur). On préconise néanmoins de les utiliser « en relève de chaudière » car nous allons voir qu'en-dessous d'une certaine température extérieure, le COP (coefficient optimal de performance – autrement dit **l'efficacité**) de la PAC chute fortement et la chaudière doit alors prendre le relais. Nous allons étudier les caractéristiques d'une PAC air/eau qui extrait un transfert thermique de l'air extérieur et en fournit à l'eau du circuit de chauffage (il existe aussi des PAC air/air et eau/eau).

La PAC contient un fluide en écoulement permanent qui est amené à subir des changements d'état (liquéfaction dans le condenseur, vaporisation dans l'évaporateur). Le fluide échange de la chaleur avec les deux sources en traversant des échangeurs appelés condenseur ou évaporateur, selon la source avec laquelle s'effectue l'échange.

(Ajout de ma part ci-dessous)-----

Une pompe à chaleur se compose de quatre éléments principaux :



Le principe du climatiseur est le suivant : le compresseur fait circuler le fluide, qui au cours du cycle refroidit la source froide (lors du passage dans l'évaporateur) et réchauffe la source chaude (lors du passage dans le condenseur).

Un fluide circule entre ces différents organes et subit un cycle de transformations à chaque passage. Dans toute l'étude, on suppose l'écoulement du fluide permanent, et on néglige toute variation d'énergie cinétique massique et d'énergie potentielle massique.

Le compresseur aspire le fluide sous une basse pression, le comprime à l'aide d'un piston entraîné par un moteur et le refoule sous une haute pression.

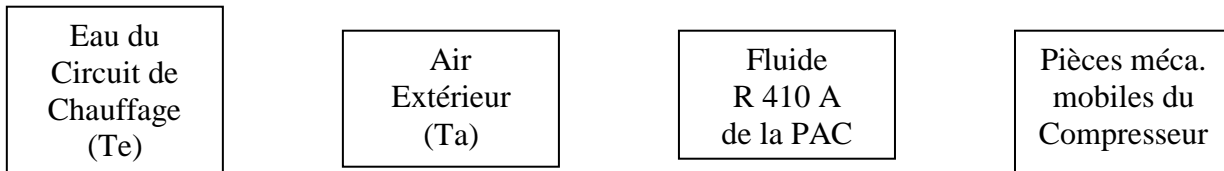
Le détendeur, calorifugé et sans pièces mécaniques mobiles, est muni d'un pointeau qui permet de réguler le débit du fluide. La chute de pression est due aux variations de section dans cet élément.

L'évaporateur et le condenseur sont des échangeurs thermiques isobares, dépourvus de pièces mécaniques mobiles qui ressemblent à des radiateurs, offrant ainsi une grande surface de contact thermique avec les thermostats (source froide/chaude).

On suppose que les pressions sont uniformes dans chacune des deux parties du circuit (la partie haute pression et la partie basse pression), c'est-à-dire que l'on néglige les pertes de charge, sauf dans le détendeur (voir plus haut).

I. COP D'UNE POMPE A CHALEUR

1/ Sur UN schéma de principe, identifier les différents transferts énergétiques à l'œuvre dans une PAC, entre les différents éléments ci-dessous et les représenter au moyen d'une flèche ; identifier, en le justifiant, la source chaude et la source froide.



2/ Redémontrer l'inégalité de Clausius en appelant T_1 la température de la source chaude et T_2 la température de sa source froide.

3/ On considère une 'une PAC idéale ; rappeler ce qu'on entend par « idéale » et déterminer l'expression du coefficient de performance ou COP. Comment serait modifié le COP pour une PAC réelle ? Pourquoi ?

4/ D'après vous, le COP augmente-t-il ou diminue-t-il avec la différence des températures intérieure et extérieure de l'habitation ? Pourquoi ?

5/ Doit-on placer le condenseur au contact de la source froide ou de la source chaude ? Pourquoi ?

6/ Enfin a-t-on intérêt à rechercher un COP le plus élevé possible ou le plus faible possible ? Sur quels paramètres peut-on jouer pour modifier le COP ?

7/ Les PAC air/eau ont un meilleur COP que les PAC air/air. Pouvez-vous fournir une explication ?

II. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La PAC réchauffe l'eau du circuit de chauffage d'une habitation afin de maintenir sa température à 20°C , en lui fournissant une puissance thermique de 8 kW. L'eau du circuit de chauffage pénètre dans l'échangeur à 30°C et en ressort à 35°C . On rappelle la valeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{K}^{-1}$.

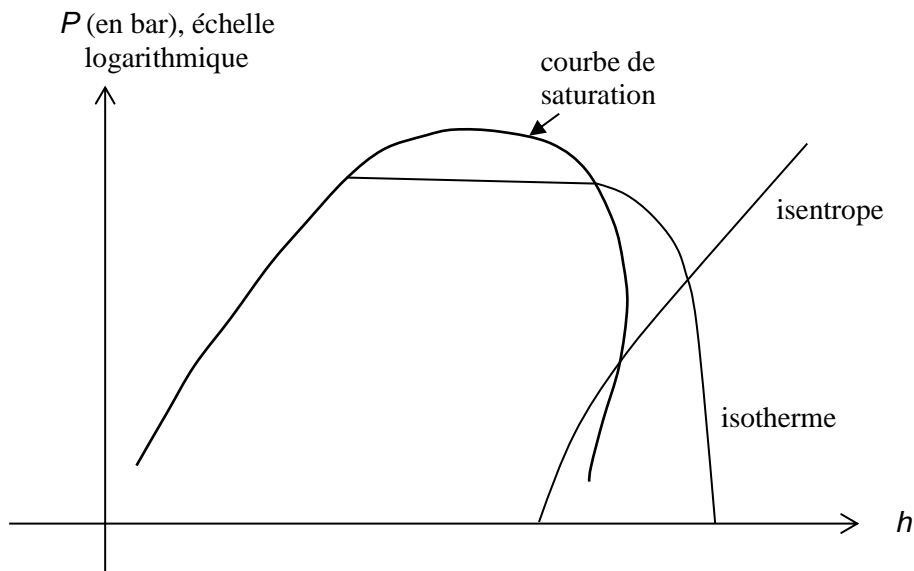
En fin de l'énoncé figure le cycle décrit par le fluide dans un diagramme : h (en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) en abscisse, et P (en bar) en ordonnée avec échelle logarithmique.

L'échelle des enthalpies massiques h est reportée **en bas et en haut** du diagramme, pour faciliter la lecture.

Sont également représentées sur ce diagramme les courbes isotitres (x est le titre massique en vapeur), isothermes (la température est ici indiquée en $^\circ\text{C}$), et isentropes.

Quelques-unes des courbes isentropes sont repérées en bas du diagramme par des flèches.

L'utilisation de ce diagramme demandant une familiarisation préalable, on indique ci-dessous l'allure sommaire, dans ce diagramme, de la courbe de saturation, de celle d'une isotherme et de celle d'une isentrope.



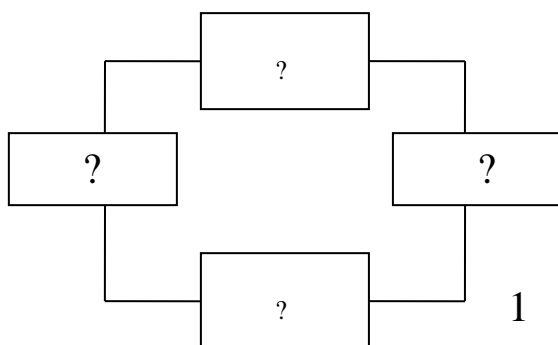
Allure sommaire du diagramme enthalpique

On exploitera le diagramme fourni en annexe p.6 pour répondre aux questions posées. **Il est demandé de ne pas rendre ce diagramme avec la copie.**

Le compresseur est le seul élément de la PAC comportant des pièces mécaniques mobiles. Le passage du fluide dans le compresseur est supposé réversible.

Le détendeur et le compresseur sont calorifugés : l'évolution du fluide y est adiabatique.

8/ Reproduire et compléter le schéma ci-dessous en identifiant la nature des différents blocs (compresseur – condenseur – détendeur – évaporateur). Numéroté sur ce schéma les états (1 – 2 – 3 – 4), à partir de l'état 1 défini sur le diagramme Ln(P),h , en tenant compte du sens effectif de parcours du cycle par le fluide (on s'appuiera notamment sur la réponse apportée à la question 5).



9/ Redémontrer le premier principe de la thermodynamique, appliqué aux grandeurs massiques, pour un fluide en écoulement permanent. On s'attachera à détailler toutes les étapes et préciser les hypothèses qui permettent d'arriver à l'énoncé simplifié $\Delta h = w_i + q$, en précisant le statut de w_i et q . Montrer que l'évolution du fluide dans le détendeur est isenthalpique.

10/ Dans quel élément du circuit le fluide échange-t-il du travail avec des pièces mécaniques mobiles de la PAC ? Quel est, du point de vue du fluide, le signe de ce travail ? Quelle en est, numériquement, la valeur massique ? Justifier.

11/ Dans quel élément du circuit le fluide rejette-t-il de la chaleur vers le milieu extérieur ? Quelle est la nature de ce milieu extérieur ? Quelle est, numériquement, la valeur massique de ce transfert thermique ? Justifier.

12/ Dans quel élément du circuit le fluide reçoit-il de la chaleur du milieu extérieur ? Quelle est la nature de ce milieu extérieur ? Quelle est, numériquement, la valeur massique de ce transfert thermique ? Justifier.

13/ Quel doit être le débit massique du fluide de la PAC pour assurer une puissance de chauffage de 8 kW ? Quel doit être celui de l'eau du circuit de chauffage ? Quel est alors son débit volumique en Lh^{-1} ?

14/ Calculer le COP de la PAC à partir des grandeurs énergétiques déduites de la lecture du cycle. Quelle est la puissance consommée par le compresseur ?

III. ETUDE DU CYCLE THERMODYNAMIQUE

15/ Dans quel état se trouve le fluide en sortie de compresseur ? Quelle est sa température ? Dans cette partie du diagramme, quelle serait l'allure d'une isotherme pour un gaz parfait ? Pourquoi ? Justifier alors l'allure des isothermes.

En considérant le fluide comme un gaz parfait, démontrer la relation qui relie les pressions et températures du fluide à l'entrée et à la sortie du compresseur, et γ , rapport des chaleurs massiques du fluide supposé constant, lors de la compression isentropique. Calculer γ .

Indication : Exprimer le 1^{er} principe sur une durée/transfo élémentaire (travail des forces de pression du cas quasistatique/réversible), faire qq calculs pour ne faire apparaître que deux variables d'état (dT et dV = les plus simples, sinon dT et dP), puis intégrer la relation entre l'état initial et l'état final, on démontre ainsi une des lois de Laplace. On peut alors invoquer l'équation d'état pour établir celle avec P et T (si pas obtenue directement).

16/ Dans le condenseur, la transformation dégage-t-elle de la chaleur ou en absorbe-t-elle ? Pourquoi ? Quelle est la température du fluide à la sortie du condenseur ?

17/ Déterminer la fraction massique en vapeur du fluide en sortie du détendeur. Que vaut sa température ? On rappelle que le passage du fluide dans le détendeur est isenthalpique.

18/ Dans l'évaporateur, le fluide se vaporise entièrement et subit une surchauffe. En quoi, d'après vous, cette surchauffe est-elle nécessaire ?

19/ (facultative) En admettant que pour une transformation isentropique $dh = dP/\rho$ (sera vu en chimie) quelle est l'équation d'une isentrope, pour un gaz parfait, dans un diagramme $\ln(P), h$? Est-elle en accord avec sa courbe sur le diagramme ?

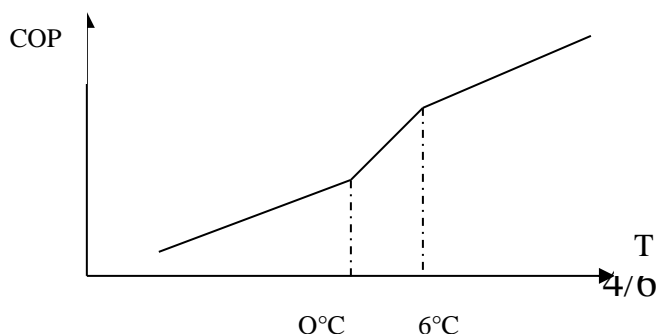
~~**20/** Ce cycle peut-il être celui d'un climatiseur ?~~ (question bizarre, car réponse évidente d'après Q14)

21/ Pourquoi cette installation requiert-elle l'apport d'un chauffage électrique ou d'une chaudière si la température extérieure est inférieure à -9°C ?

IV. TRANSFERT THERMIQUE AVEC L'ECHANGEUR EXTÉRIEUR

Le principal inconvénient avec les PAC air/eau est le givrage de l'évaporateur : l'eau contenue dans l'air au contact des plaques froides de l'évaporateur se condense pour former une couche de givre.

Cette couche de givre fait fortement chuter le COP, comme le montre le diagramme suivant :



22/ Pourquoi cette couche de givre a-t-elle pour effet de diminuer le transfert thermique entre les plaques de l'évaporateur et l'air ? En quoi est-ce préjudiciable au bon fonctionnement de l'installation ?

23/ D'après vous, pourquoi la chute plus importante de COP cesse-t-elle au-dessous de 0°C ?

Le dégivrage est assuré par inversion de cycle (la chaleur nécessaire au dégivrage est prélevée à l'installation !). On peut aussi augmenter la puissance du ventilateur de la PAC pour y remédier et/ou on inverse le cycle de la PAC.

24/ Expliquer pourquoi ces deux procédés permettent le dégivrage. Quel est l'effet sur le COP ?

25/(facultative) On considère une couche de givre, d'épaisseur e et de conductivité thermique λ_g et de section S ; déterminer sa résistance thermique.

On adopte un modèle dans lequel les échanges thermiques avec l'air l'extérieur sont donnés par la loi de Newton : La puissance dP échangée avec l'extérieur à la température T_e , par un élément de surface dS d'un corps à la température T , est donnée, en valeur absolue par :

$$\left| \frac{dP}{dS} \right| = K \cdot |T - T_e| . \text{ Le coefficient d'échange } K \text{ est constant.}$$

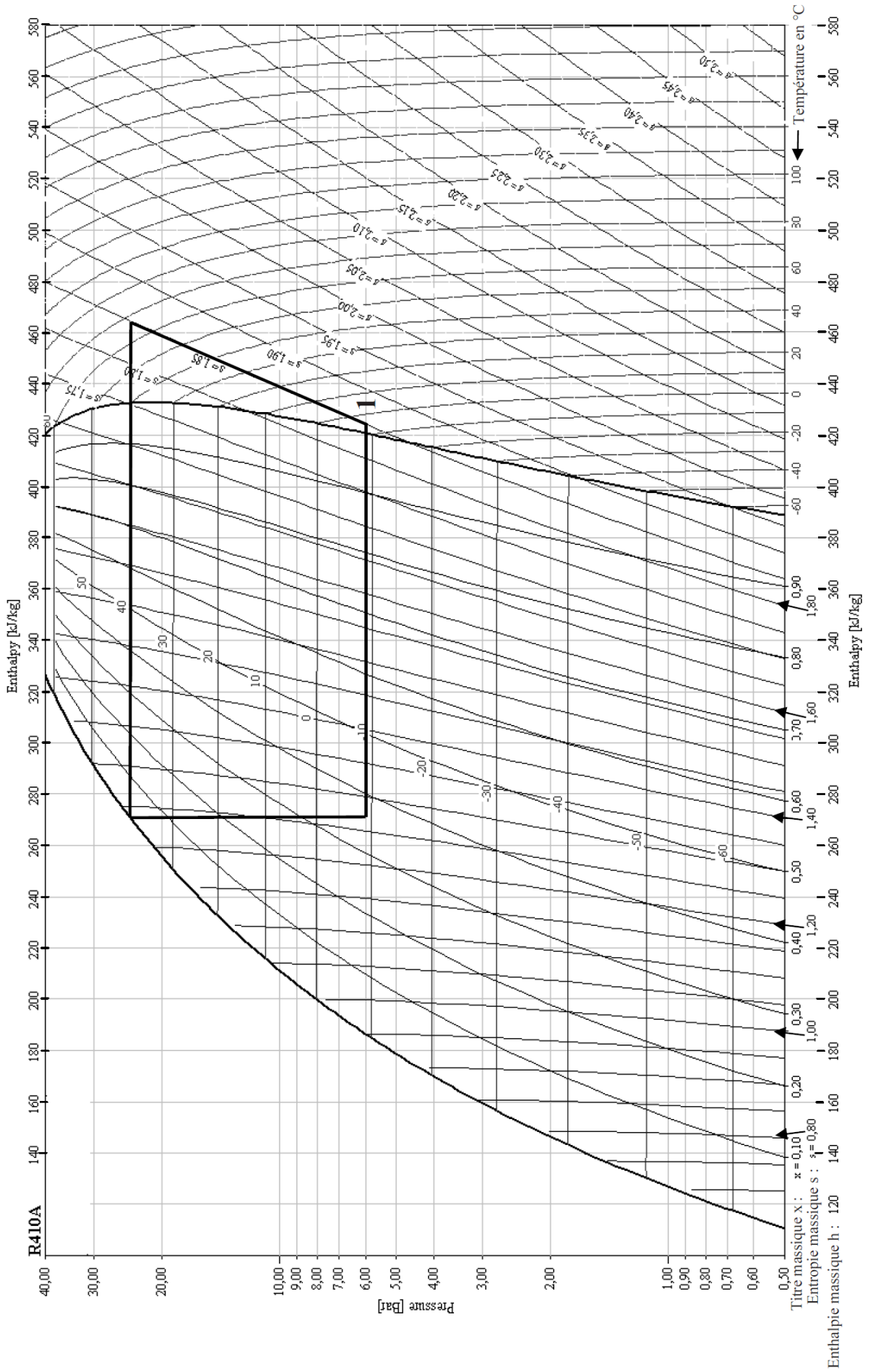
Déterminer la résistance thermique due à ce transfert.

26/(facultative) A l'aide d'une analogie électrique exprimer le rapport P_g / P de la puissance thermique transférée à l'évaporateur en présence de givre à celle de la puissance thermique transférée à l'évaporateur en l'absence de givre, en fonction de K coefficient d'échange entre l'air extérieur et la paroi, K_g coefficient d'échange entre l'air extérieur et le givre, λ_g et e . On suppose fixées les valeurs des températures T_p de la plaque et T_e .

27/(facultative) Sachant que $K = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $K_g = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et $\lambda_g = 2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, quelle est la valeur de ce rapport P_g / P dès qu'apparaît la couche de givre ?

28/(facultative)

28/ Sachant que $K = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $K_g = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et $\lambda_g = 2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, quelle est la valeur de ce rapport P_g / P dès qu'apparaît la couche de givre ?



FIN DE L'ÉPREUVE.

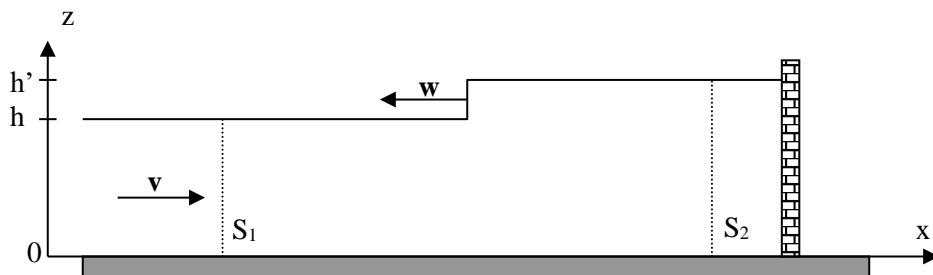
Problème 2 : Ressaut hydraulique (tombé à CCP, mais aussi ENS il y a assez longtemps)

Un canal de largeur L est obstrué par une paroi verticale (fermeture « brutale » d'une écluse). Une vague remonte alors le canal à une célérité w dans le référentiel terrestre.

La hauteur d'eau en amont du ressaut est h , et la vitesse du courant est v . En aval du ressaut, la hauteur d'eau est h' et la vitesse nulle. Les grandeurs h , h' et v sont constantes.

Dans tout le problème, on se place dans le référentiel lié à la vague, supposé galiléen (car en TRU dans le référentiel terrestre).

On étudie le système ouvert (S) de fluide délimité par les sections (en pointillés) amont S_1 et aval S_2 , *sections fixes dans le référentiel d'étude*. Pour simplifier, on supposera que le front de la vague est vertical.



Attention le schéma est dessiné dans le référentiel terrestre, qui n'est pas le référentiel d'étude

1. Quelle est la vitesse du fluide entrant dans (S) au niveau de S_1 , et celle en ressortant au niveau de S_2 ?
2. En traduisant la conservation de la masse, établir une relation entre v , w , h et h' .
3. Définir un système fermé (S^*) approprié, et montrer que la variation de la composante horizontale de sa quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{dP_x^*}{dt} = -\rho L h \times g(v, w)$$

où $g(v, w)$ est une fonction à expliciter.

4. La pression étant P_0 à la surface du fluide, calculer la pression régnant dans l'eau en amont puis en aval du ressaut.
5. Que vaut la résultante *horizontale* des forces de pression sur le système (S^*) ? En déduire l'expression de la résultante des forces extérieures s'appliquant sur (S) en fonction de ρ , g , L , h et h' .
6. En déduire alors que $h(v+w)v = \frac{1}{2}g.f(h, h')$ où $f(h, h')$ est une fonction à expliciter.
7. En déduire la célérité de la vague en fonction de g , h et h' . Que vaut-elle si $h \approx h'$?