

Thermodynamique industrielle

Ondes électromagnétiques

*La colle commence par une question de cours extraite de la liste ci-dessous et se poursuit par un exercice.
Je rappelle que vous trouverez sur mon site la version complétée du poly de cours,
ainsi que les corrigés des TD et des DM. N'hésitez surtout pas à me signaler s'il en manque !*

Au programme



Une question de cours de thermodynamique sera suivie d'un exercice sur les OEM ... et réciproquement.
Le programme est chargé, mais correspond exactement à celui du DS du samedi 18 mars.

Chapitre 16 : Diagrammes et tables thermodynamiques

Questions de cours et exercices.

Chapitre 17 : Thermodynamique des installations industrielles

Questions de cours et exercices.

Chapitre 18 : Ondes électromagnétiques dans le vide

Questions de cours et exercices.

- ▷ Ce chapitre a été l'occasion de terminer l'étude du formalisme de l'électromagnétisme en introduisant les bilans d'énergie électromagnétique, dans un cadre plus large que celui des OEM. Ainsi, des exercices sur les équations de Maxwell et les bilans d'énergie peuvent être posés, même s'il ne s'agit pas de phénomènes ondulatoires.

Chapitre 19 : Réflexion et absorption des ondes électromagnétiques

Questions de cours et exercices.

- ▷ Privilégier autant que possible l'utilisation du formalisme complexe.
- ▷ La résolution d'une équation aux dérivées partielles par séparation des variables (solution cherchée sous la forme $f(x) \times g(t)$ qui donne l'identité $c^2 f''/f = g''/g = \text{cte}$ d'où on déduit deux équations différentielles ordinaires sur f et g) n'est plus à connaître. Les étudiants doivent être guidés pour l'appliquer si nécessaire (je ne l'ai fait ni en cours ni en TD), et les formes de solutions cherchées toujours données.
- ▷ À ce titre, j'ai cherché les modes propres d'une cavité directement sous la forme $f(x) e^{i\omega t}$ (cavité traitée en cours + guide d'ondes plan en TD PT*, ne pas hésiter à redonner des exercices équivalents).

Questions et applications de cours

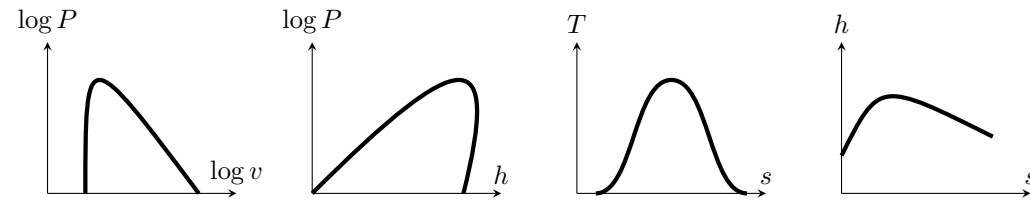
Seuls les étudiants du groupe PT (trinômes 1 à 7) seront interrogés sur les questions marquées d'une étoile, car elles sont plus techniques et/ou moins essentielles ... mais tous les étudiants sont bien sûr invités à les travailler !*

(★) 16.1 - Établir le théorème des moments pour une fonction au choix de l'interrogateur : volume, enthalpie ou entropie.

16.2 - Représenter l'allure d'un diagramme au choix de l'interrogateur et établir l'allure d'une famille de courbe iso dans des cas limites.

- ▷ diagramme de Clapeyron (P, v) : isothermes (liquide + diphasé + gaz parfait) ;
- ▷ diagramme des frigoristes (P, h) : isothermes (liquide + diphasé + gaz parfait) ;
- ▷ diagramme entropique (T, s) : isobares (diphasé + gaz parfait) et isenthalpe (gaz parfait) ;
- ▷ diagramme de Mollier (h, s) : isobares (diphasé) et isothermes (gaz parfait).

Je rappelle que l'allure de la courbe de saturation n'est pas une vague patate identique dans tous les diagrammes ...



16.3 - Par lecture du diagramme des frigoristes du R22 (page suivante), déterminer

- ▷ l'enthalpie de vaporisation sous 20 bar ;
- ▷ la pression de vapeur saturante à 20 °C ;
- ▷ l'état physique, l'enthalpie massique et l'entropie massique du fluide sous 3 bar et à 50 °C.

17.1 - Pour un moteur OU un réfrigérateur OU une pompe à chaleur (au choix de l'interrogateur), indiquer le sens réel (signe) des échanges énergétiques, par exemple sur un schéma. Définir le rendement (l'efficacité) en fonction des énergies échangées au cours du cycle, puis établir l'expression du rendement (efficacité) de Carnot.

Pour établir sans erreur les expressions des efficacités de Carnot, le plus simple est de dire que cette limite est atteinte pour un fonctionnement réversible de la machine, puis de partir du second principe sous la forme

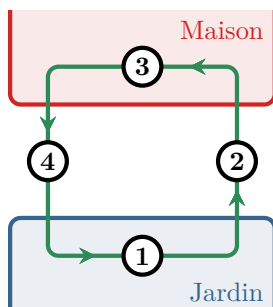
$$\Delta S = S_{\text{éch}} + S_{\text{créée}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \underset{\uparrow}{=} 0.$$

Bien sûr, il est un peu plus général de partir de l'inégalité ... mais cela ajoute une difficulté par rapport aux signes. Enfin, j'ai fait en cours une démonstration conservant l'entropie créée jusqu'au bout calcul : elle est intéressante pour bien comprendre que c'est la création d'entropie qui limite l'efficacité, mais je la déconseille dans une copie.

(★) **17.2** - Démontrer le premier principe de la thermodynamique appliqué à un fluide en écoulement stationnaire.

La démonstration est notoirement très longue : outre l'habituel travail de mémorisation, les étudiants doivent également faire un travail de concision, pour tout dire en un minimum de mots et de temps.

17.3 - Pour un composant thermodynamique au choix de l'interrogateur, indiquer son rôle et simplifier l'écriture du premier principe en justifiant les hypothèses faites. Les composants à connaître sont le détendeur, la turbine, le compresseur, la tuyère, l'échangeur simple flux, l'échangeur double flux, le mélangeur et le séparateur.



17.4 - Une pompe à chaleur est constituée de quatre composants thermodynamiques : un compresseur, un détendeur, un évaporateur et un condenseur. Indiquer à quel composant correspondent les bulles ① à ④ de la figure ci-contre. Justifier la réponse en expliquant soigneusement le rôle/la nécessité de chaque composant.

① Évaporateur ; ② Compresseur ; ③ Condenseur ; ④ Détendeur.

Le condenseur et l'évaporateur sont deux échangeurs dans lesquels le fluide frigorigène change d'état : dans le condenseur, il se liquéfie (= il se condense) en cédant de l'énergie au milieu extérieur alors que dans l'évaporateur, il se vaporise en prélevant de l'énergie à son environnement. Dans une pompe à chaleur, le fluide doit prélever de l'énergie à l'extérieur de la maison, c'est donc l'évaporateur qui s'y trouve, et la céder à l'intérieur, où se trouve le condenseur.

Concernant le compresseur et le détendeur, l'idée essentielle que les étudiants doivent savoir expliquer est qu'une machine frigorifique réalise un transfert thermique effectif de sens opposé au sens naturel ... mais lorsque le fluide caloporteur est au contact des sources dans les échangeurs, les « vrais » transferts thermiques ne peuvent se faire que dans le sens naturel. Ainsi, le fluide doit être plus froid que la source froide (T_f) lorsqu'il est en contact avec elle dans l'évaporateur et plus chaud que la source chaude (T_c) dans le condenseur. Or en sortie du condenseur le fluide est au moins à la température T_c , le refroidissement adiabatique dans le détendeur est donc indispensable pour que la température soit inférieure à T_f en entrée de l'évaporateur. De même, en sortie de l'évaporateur le fluide est au plus à la température T_f , l'échauffement adiabatique dans le compresseur est donc nécessaire également.

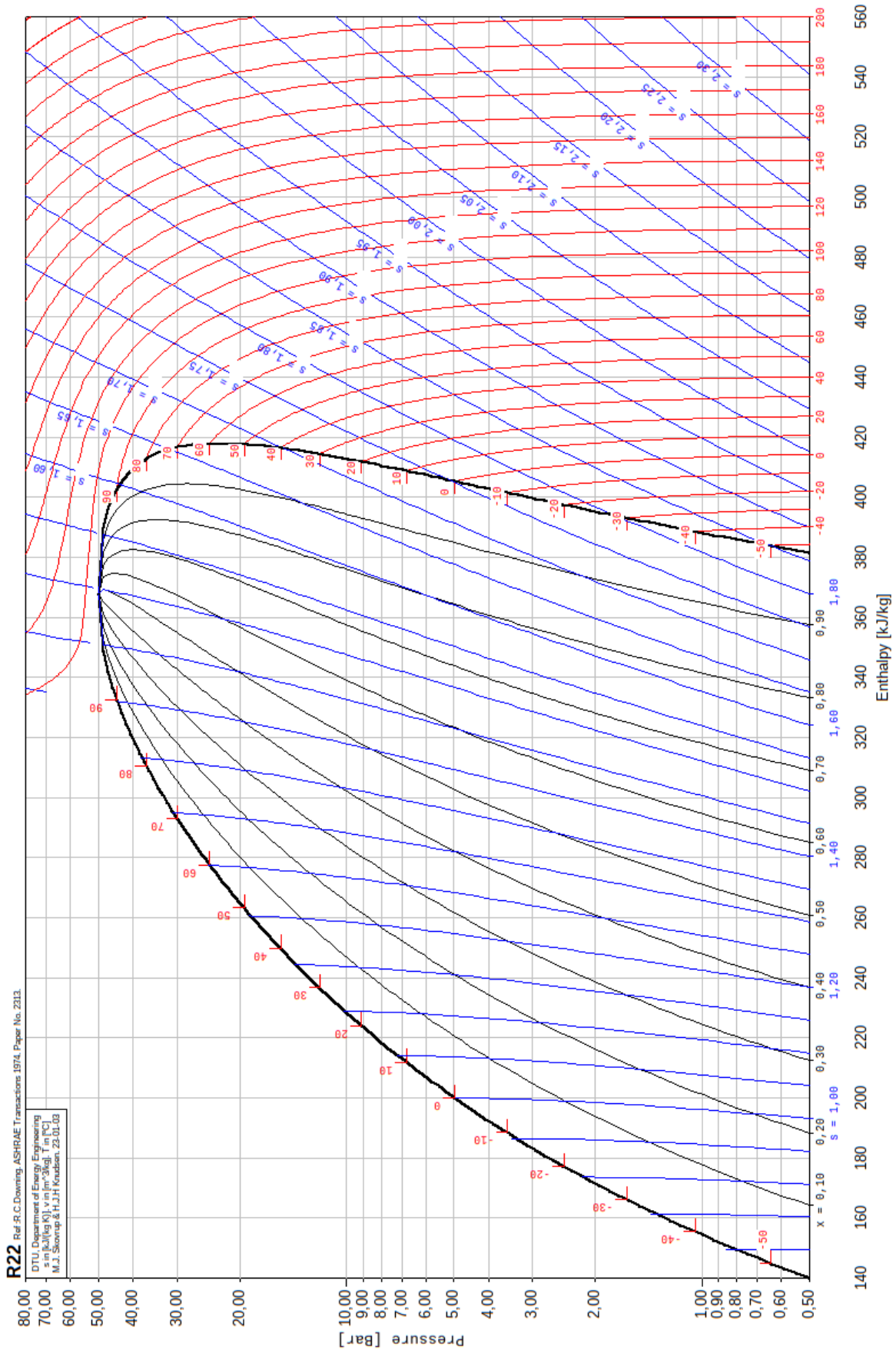
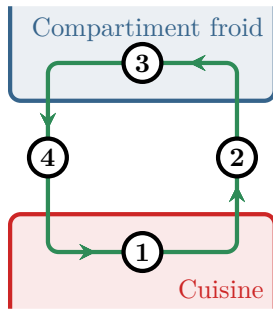


Figure 1 – Diagramme des frigorigènes du R22. Le cadre en haut à gauche indique les grandeurs représentées et leur unité : « s in kJ/(kgK), T in °C, v in m^3/kg »



17.5 - Un réfrigérateur est constitué de quatre composants thermodynamiques : un compresseur, un détendeur, un évaporateur et un condenseur. Indiquer à quel composant correspondent les bulles ① à ④ de la figure ci-contre. Justifier la réponse en expliquant soigneusement le rôle/la nécessité de chaque composant.

① Condenseur ; ② Détendeur ; ③ Évaporateur ; ④ Compresseur

Dans un réfrigérateur, le fluide doit prélever de l'énergie au compartiment froid, c'est donc l'évaporateur qui s'y trouve, et la céder à l'air de la cuisine, où se trouve le condenseur. Mêmes justifications qu'à la question précédente pour le reste.

17.6 - Une pompe à chaleur est constituée de quatre composants thermodynamiques : un compresseur, un détendeur, un évaporateur et un condenseur. La figure 2 représente son cycle dans le diagramme des frigoristes.

- Commenter le sens de parcours du cycle.
- Indiquer à quel composant correspond chacune des étapes du cycle. Justifier la réponse.
- Déterminer le COP par lecture du diagramme.
- Comment se nomme l'étape 3'3 ? Quel est son intérêt ?
- Même question pour l'étape 1'1.

1-2 : Compresseur (augmentation de la pression) ; 2-3 : Condenseur (il y a liquéfaction) ; 3-4 : Détendeur (chute de pression) ; 4-1 : Évaporateur (il y a vaporisation).

$$\text{Le COP vaut } -\frac{q_{\text{cond}}}{w_{\text{compr}}} = -\frac{h_3 - h_2}{h_2 - h_1} = -\frac{250 - 450}{450 - 405} \simeq 4$$

L'étape 3'3 est un sous-refroidissement, qui permet d'augmenter le COP : on voit graphiquement que cette étape augmente $|q_{\text{cond}}|$ sans changer w_{compr} .

L'étape 1'1 est une surchauffe, qui permet d'assurer que le compresseur n'aspire que de la vapeur sèche, même en cas de perturbation du cycle. Elle n'a pas d'intérêt thermodynamique, mais résulte de contraintes technologiques.

(★) **17.7** - La figure 3 représente le cycle suivi par l'eau du circuit secondaire d'une centrale nucléaire dans le diagramme entropique.

- Commenter le sens de parcours du cycle.
- Identifier à quelle étape du cycle correspond le passage dans le générateur de vapeur ? dans le condenseur ? Interpréter l'allure de la courbe correspondant au passage dans le GV.
- La détente 2-3 est réalisée dans deux turbines successives, séparées d'une étape de réchauffe 3'2', où l'eau traverse un échangeur thermique pour se vaporiser complètement. Quel en est l'intérêt ?
- Déterminer le rendement par lecture du diagramme.

GV = 1-2 (il y a vaporisation, précédée d'une phase où la température de l'eau liquide augmente, ce qui explique le point anguleux) ; condenseur = 3-4 (il y a liquéfaction).

La réchauffe permet d'augmenter le titre en vapeur en sortie de turbine par rapport à une détente en une étape, ce qui augmente sa durée de vie : c'est une contrainte technologique.

Le rendement tient compte de la réchauffe et des deux détentes, et vaut

$$\eta = -\frac{(h_{3'} - h_2) + (h_3 - h_{2'})}{(h_2 - h_1) + (h_{2'} - h_{3'})} \simeq -\frac{2600 - 2800 + 2250 - 2750}{2800 - 150 + 2750 - 2600} \quad \text{soit} \quad \boxed{\eta = 0,25}$$

18.1 - Établir l'équation de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide pour le champ électrique ou magnétique, au choix de l'interrogateur. Identifier dimensionnellement la célérité c .

18.2 - Établir la relation de dispersion dans le cas particulier d'une OPPH se propageant dans le sens des x croissants en utilisant, au choix de l'interrogateur, les champs réels ou les champs complexes.

18.3 - Établir les écritures complexes des équations de Maxwell dans le cas particulier d'une OPPH de la forme

$$\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM})} \vec{e}_y.$$

En déduire la relation de structure.

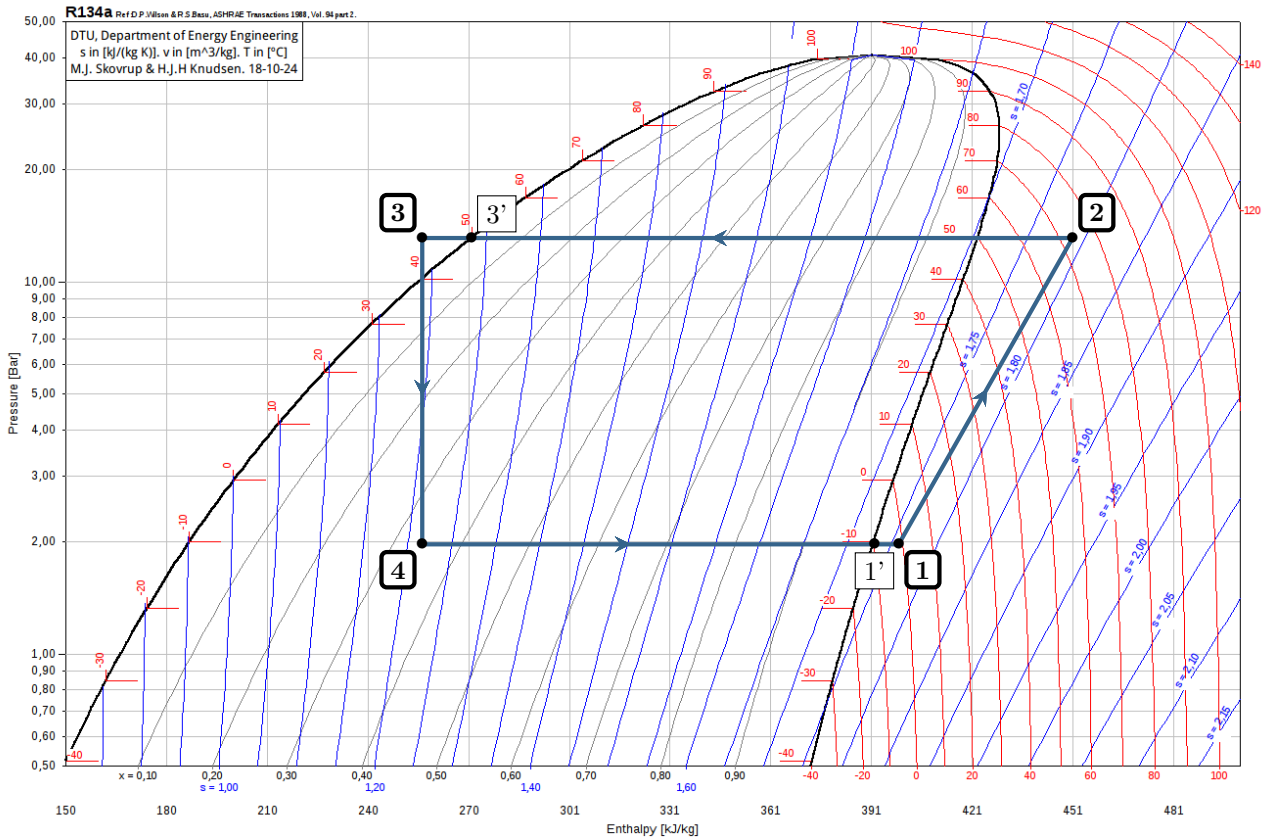


Figure 2 – Cycle de la PAC représenté dans le diagramme des frigoristes du R134a.

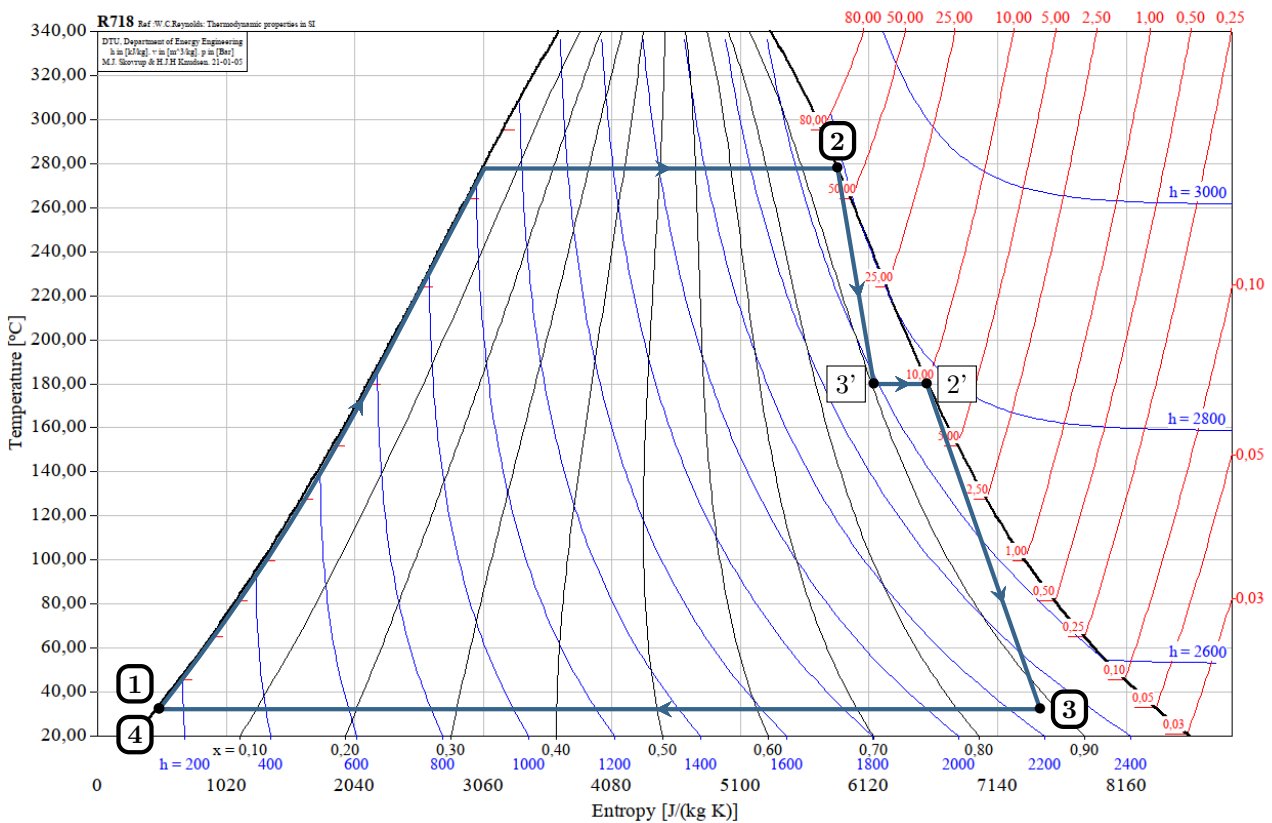


Figure 3 – Cycle de Rankine étagé représenté dans le diagramme entropique de l'eau.

18.4 - Sur un exemple de champ électrique donné par l'interrogateur (coordonnées cartésiennes uniquement), identifier la direction et le sens de propagation, l'état de polarisation de l'onde, puis en déduire le champ magnétique et le vecteur de Poynting.

(★) **18.5** - Rappeler sans démonstration mais en le justifiant physiquement le bilan d'énergie électromagnétique pour un volume de contrôle macroscopique. En déduire (= démontrer) l'équation de Poynting sous forme locale.

(★) **19.1** - Montrer qu'un conducteur ohmique excité à basse fréquence peut être considéré localement neutre et que le courant de déplacement peut y être négligé devant le courant de conduction. On rappelle que pour un métal $\gamma \sim 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ tant que $f \lesssim 10^{13} \text{ Hz}$, et on donne $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$.

19.2 - Écrire les équations de Maxwell simplifiées dans un conducteur ohmique excité en basse fréquence et en déduire l'équation de propagation pour le champ électrique ou magnétique, au choix de l'interrogateur.

19.3 - En partant de l'équation de propagation (rappelée par l'interrogateur), établir la relation de dispersion complexe dans un conducteur ohmique. Définir l'épaisseur de peau. En déduire l'expression du champ électrique d'une pseudo-OPPH et l'interpréter physiquement.

19.4 - Considérons un conducteur parfait occupant le demi-espace $x > 0$, sur lequel est envoyée une onde incidente

$$\vec{E}_i = E_0 e^{i(\omega t - kx)} \vec{e}_y.$$

On cherche l'onde réfléchie en la cherchant sous la forme

$$\vec{E}_r = r E_0 e^{i(\omega t + kx)} \vec{e}_y.$$

Déterminer le coefficient de réflexion en amplitude r .

Le calcul est légèrement différent de celui du cours, car un peu moins général : pour alléger le calcul, on admet ici directement que l'onde réfléchie a la même polarisation que l'onde incidente, ce qui permet de n'utiliser qu'une seule projection de la relation de passage.

19.5 - Considérons une cavité électromagnétique formée par deux plans conducteurs situés en $x = 0$ et $x = L$. On cherche ses modes propres sous la forme

$$\vec{E}(x, t) = f(x) e^{i\omega t} \vec{e}_y.$$

Déterminer les fonctions f qui conviennent.

Et après ?

🔴🔴🔴 **Attention !** Pas de colle la semaine de la rentrée ... mais concours blanc !

- ▷ Chapitre 20 : Modèle scalaire des ondes lumineuses ;
- ▷ Chapitre 21 : Interférences par division du front d'onde ;
- ▷ Révisions R10 : Optique géométrique et ondes mécaniques.