Banque PT, France

Session 2023, filière PT

Physique B, thermodynamique

Durée : 2 heures

Ce que traite le sujet

- I) Quelques questions générales
- II) Centrales hydrauliques en montagne
- III) Centrale solaire thermique

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/banque-pt/pt/2023/physique-b-thermo

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

Epreuve de Physique B - Thermodynamique

Durée 2 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est interdit.

AVERTISSEMENT

La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction, la clarté et la précision** des raisonnements entreront pour une **part importante** dans **l'appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats de leurs calculs.

CONSIGNES :

- Composer lisiblement sur les copies avec un stylo à bille à encre foncée : bleue ou noire.
- L'usage de stylo à friction, stylo plume, stylo feutre, liquide de correction et dérouleur de ruban correcteur est interdit.
- Remplir sur chaque copie en MAJUSCULES toutes vos informations d'identification : nom, prénom, numéro inscription, date de naissance, le libellé du concours, le libellé de l'épreuve et la session.
- Une feuille, dont l'entête n'a pas été intégralement renseigné, ne sera pas prise en compte.
- Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance

Tournez la page S.V.P.

Production d'énergie électrique à partir de ressources renouvelables

Le rejet massif de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle est responsable d'une modification du climat qui en est à ses débuts. Outre les modifications du temps qu'il fait et des températures, ce sont les événements catastrophiques, liés à une modification rapide des équilibres planétaires, qui sont à redouter ; on en constate déjà les effets. Il serait donc raisonnable de réduire fortement les émissions de ces GES dans un avenir immédiat.
La production électrique mondiale, stimulée par les activités humaines toujours croissantes, est en forte hausse dans le monde (+72% entre 2000 et 2018). Sa production est toujours assurée dans de nombreux pays par des centrales thermiques à charbon, à gaz ou à fuel, entraînant un fort rejet de GES et parfois aussi de particules fines nuisibles pour la santé (+69% pour le charbon entre 2000 et 2018). Des solutions alternatives se développent aussi.
Ce problème va examiner quelques aspects physiques de solutions alternatives basées sur l'exploitation des ressources renouvelables de notre planète.
Les applications numériques seront faites, sauf indication contraire, avec 1 chiffre significatif.

I) Quelques questions générales (environ 5% du barème)

Q1. Donner l'ordre de grandeur de la puissance électrique produite par une centrale thermique, par une tranche de centrale nucléaire ou par un parc éolien en mer.

Q2. Quel inconvénient, lié à la production électrique, est associé à l'éolien, terrestre surtout, et au solaire ?

II) Centrales hydrauliques en montagne (environ 40% du barème)

L'eau est une source importante de production d'énergie électrique. En France, elle représente 11% de la production en 2019 et 16% dans le monde. Les centrales dédiées à la production hydroélectrique sont de types variés : des petites centrales au fil de l'eau, sans retenue ni barrage, en passant par les centrales de montagne, allant de celles de petites capacités utilisant de modestes réservoirs à celles dotées de barrages spectaculaires et de grands lacs de retenue.
Dans cette partie, nous nous intéresserons à un projet de barrage plus modeste.

1) Grands barrages

Document 1 : Centrales de pompage-turbinage
Les centrales de pompage-turbinage, appelées aussi STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), disposent d'un réservoir supérieur et d'un réservoir inférieur, reliés par une conduite forcée au bas de laquelle sont installés des groupes réversibles qui pompent l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur pendant les heures creuses (la nuit, le week-end) puis la turbinent pendant les heures de pointe.
Source : wikipédia

Q3. Quel est l'intérêt de pouvoir pomper de l'eau de l'aval à l'amont d'un barrage du point de vue de la production électrique globale d'un pays ?

L'exploitation de l'énergie de l'eau des barrages est faite après avoir capté cette dernière en la transmettant par conduite forcée jusqu'à une turbine. Cet aspect sera développé dans la sous-partie suivante consacrée à une centrale en projet dans les Alpes françaises.

2) Projet de centrale 1 MW

Dans le projet de centrale hydroélectrique de Bonnegarde (Savoie), il est prévu de capter l'eau de deux ruisseaux de montagne (affluents du ruisseau de Bonnegarde), l'amener par une conduite forcée jusqu'à une turbine Pelton avant de rendre l'eau au ruisseau de Bonnegarde. On lit en particulier dans le document de présentation de l'ouvrage :

Document 2 : principales caractéristiques du projet (extraits).
Niveau normal d'exploitation : 1 450,70 m,
Côte de restitution au Ruisseau de Bonnegarde : 767,50 m,
Hauteur de chute brute maximale (1450,70 - 767,50) : H_{mb} = 683,20 m,
Débit maximum prélevé : D_v = 0,65 m^3/s,
Puissance maximale brute : $\mathcal{P}_{mb}$ = 4 356 kW,
Puissance maximale disponible : $\mathcal{P}_{md}$ = 3380 kW
Production d'énergie théorique escomptée par an : 13 500 000 kWh,
Prix de vente de l'électricité (contrat H07 - tarif 2015) : 7,065 c€/kWh,
Caractéristiques de la conduite : D_1 = 0,60 m puis D_2 = 0,70 m.

Document 3 : perte de charge dans la conduite forcée et évaluation de la hauteur de chute nette.
Le calcul des pertes de charge linéaires dans la conduite forcée est réalisé à partir de la formule suivante :

$$\Delta H_{PCl} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \text{ (équation de Darcy-Weisbach)}$$

L'eau des deux ruisseaux est conduite sur 500 m au travers d'une conduite de diamètre D_1 = 60 cm puis réunie dans une conduite unique, de diamètre D_2 = 70 cm, sur 2300 m.
La perte de charge linéaire totale maximale est estimée à partir du débit dérivé maximal :

$$\Delta H_{pcl} = \Delta H_{plc1} + \Delta H_{pcl2} = 6,5 + 13,9 = 20,4 \text{ m}$$

Les pertes de charges accidentelles (coudes, branchements, entonnements …) sont estimées à environ de 5 m CE à pleine charge (CE : charge efficace). Ce qui fait une perte de charge totale estimée de 26 m CE, soit 4 % de la chute maximale. La chute nette pour le débit maximal est donc estimée à 650,00 m.

Q.4 Quel est le débit massique maximum dans la conduite après confluence ? Quelle vitesse moyenne peut-on prévoir dans cette conduite au maximum ?

Q.5 La puissance maximale brute est obtenue en négligeant tout frottement et en prenant un rendement de la turbine et de l'alternateur de 1 : c'est une valeur idéale. À quelle énergie E_{mb} correspondant-elle ? Donner l'expression de P_{mb} en fonction des autres caractéristiques de l'écoulement et de g. Calculer sa valeur numérique et conclure.

On donne la viscosité dynamique de l'eau : $\eta_e = 1,0.10^{-3}$ Pl.

Q.6 Rappeler la nature du phénomène auquel η est liée.

On lui associe une force volumique $\vec{f}_v = -\eta \Delta \vec{v}$ où Δ est l'opérateur laplacien et $\vec{v}$ la vitesse du fluide en un point donné. η s'exprime fréquemment en utilisant une autre unité que le poiseuille et qui fait intervenir l'unité de pression.

Q.7 Par une analyse dimensionnelle, retrouver cette unité.

On rappelle que le nombre de Reynold associé à un écoulement s'écrit :

$$R_e = \frac{\mu \ell v}{\eta}.$$

Q.8 Que représente la grandeur ℓ dans cette expression pour le problème traité ? Donner l'ordre de grandeur du nombre de Reynolds associé à l'écoulement du fluide dans la conduite forcée après confluence. Que peut-on en déduire ?

Le **document 3** évoque une « perte de charge totale linéaire » de 20 m dans les conduites et de 5 m pour les pertes accidentelles.

Q.9 De quoi s'agit-il pour chacune de ces pertes ?

On s'intéresse aux pertes linéaires.

Q.10 Quelle est la dimension du coefficient λ utilisé dans l'équation de Darcy-Weinsbach ?

Q.11 Rappeler la relation de Bernoulli pour un fluide parfait incompressible en écoulement stationnaire.

Tournez la page S.V.P.

Q.12 Comment tient-on compte des pertes de charges précédentes ΔH_{pc} dans la relation précédente, l'eau étant considérée comme un fluide newtonien ?

On utilise un abaque de Moody (**FIGURE 1**) pour déterminer le coefficient λ : on y indique λ (échelle en ordonnée à gauche) en fonction de la valeur du nombre de Reynolds R_e en abscisse. L'ordonnée à droite correspond à la rugosité de la paroi utilisée pour l'écoulement, chaque courbe correspondant à une valeur de e/D où D est le diamètre de la conduite et e la taille des irrégularités de surface de la conduite.

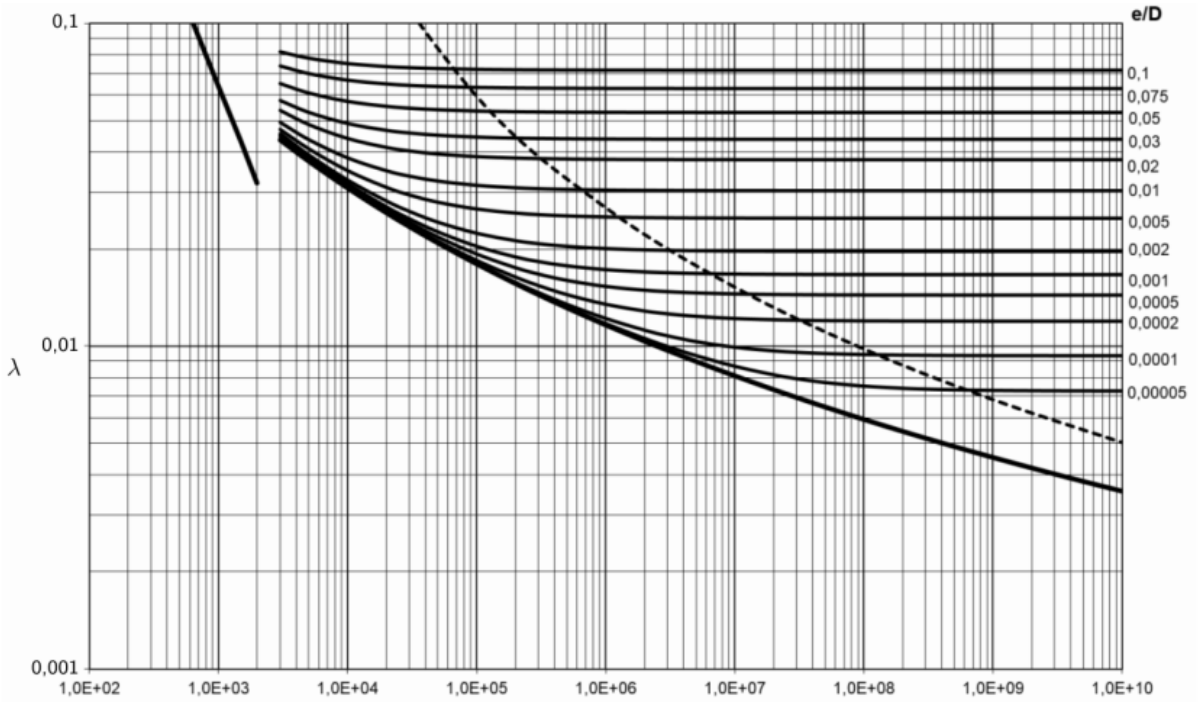


FIGURE 1 : ***abaque de Moody***

Le constructeur estime la valeur de λ pour ces calculs de perte de charge à 0,03.

Q.13 Quelle est la valeur de e/D correspondant à l'écoulement dans la conduite après confluence ? Que peut-on en déduire sur la valeur de e ? Commenter.

Q.14 Estimer littéralement le travail indiqué massique de l'ensemble turbine-alternateur de cette installation dans le cas d'un fonctionnement en régime maximum. Comparer numériquement à l'énergie massique disponible et conclure.

III) Centrale solaire thermique (environ 55% du barème)

Le soleil peut être utilisé pour la production d'énergie électrique, par le biais de panneaux photovoltaïques, de chauffe-eau solaires individuels ou en produisant de l'énergie électrique de manière thermique. Cette dernière production est marginale en France et dans le monde (0,04% de la production contre 2,1% pour le photovoltaïque) mais peut être adapté dans certaines circonstances et en certains lieux. On parle alors de centrale solaire thermodynamique à concentration (CSTC). Il en existe différents types, liés principalement à la forme des miroirs utilisés, à la forme de la partie de chauffe et aux fluides caloporteurs utilisés.
Une des premières CSTC à avoir été construite a été la centrale solaire Thémis, située dans les Pyrénées orientales. Elle a fonctionné pendant 3 ans avant d'être arrêtée en 1986 ; elle n'avait pas de réelle vocation industrielle. Ses technologies ont été utilisées dans de grandes centrales actuelles qui produisent en Espagne et aux États-Unis. Elle est maintenant utilisée comme instrument de recherche au niveau national et européen. On cherche en particulier à améliorer les performances des CSTC, surtout de petite capacité. Nous examinerons dans cette partie quelques tenants et aboutissants d'un projet de recherche actuel utilisant Thémis.

1) Centrale Thémis

Thémis utilisait lors de son exploitation N = 201 miroirs de surface individuelle S = 54 m^2, appelés héliostats. Ceux-ci ont été rénovés pour être utilisés à nouveau. La puissance moyenne reçue durant la journée normalement aux rayons solaires au niveau du sol par temps clair sera prise égale à Φ_S = 1,0 kW.m^{-2}. Les miroirs orientaient l'énergie solaire vers la chaudière, située en haut d'une tour, où l'échange thermique avec le fluide caloporteur pouvait s'effectuer. C'est toujours le principe utilisé par les centrales à tour exploitées à l'heure actuelle à travers le monde.



FIGURE 2 : vue de la tour depuis le champ d'héliostats

Q.15 Les héliostats suivent la course du soleil pour ramener le maximum de puissance solaire vers la chaudière. On note Φ_h la puissance maximale captée par un héliostat au cours de la journée. Il se produit cependant une perte de surface efficace lorsque le miroir n'est pas pratiquement aligné avec la tour et le soleil. Cet effet est appelé *effet cosinus*. Expliquer ce nom.

Q.16 La puissance électrique maximale que pouvait produire Thémis était indiquée à P_e = 2,5 MW. Déterminer une expression littérale pour le rendement r_{max} qu'avait alors la centrale.

Q.17 En quoi l'utilisation de sels fondus à haute température ou de fluides utilisés avec leur phase solide à haut point de fusion peut pallier l'intermittence de la source d'énergie utilisée dans les centrales solaires ?

Sur le site de Thémis ont été expérimentés, et sont encore expérimentés différents projets de production d'énergie à base solaire. L'un d'entre eux, toujours actif et impliquant le laboratoire CNRS PROMES, est le projet POLYPHEM qui va servir de support à la fin de ce problème. Il s'agit d'un projet expérimental de centrale solaire de petite capacité pour des régions ensoleillées et loin des réseaux majeurs de fourniture d'électricité. Ce projet n'utilise qu'une partie des héliostats du site.
Le flux solaire reçu par les miroirs est renvoyé vers la tour au niveau d'un récepteur solaire qui joue le rôle de chaudière (source chaude). À ce niveau, le fluide chauffé est de l'air qui est utilisé dans une turbine de type « Brayton » (cycle haut) entraînant un alternateur et qui sert aussi, après passage dans la turbine, à chauffer une huile organique qui est stockée dans un réservoir et utilisée dans un cycle de Rankine (cycle bas).

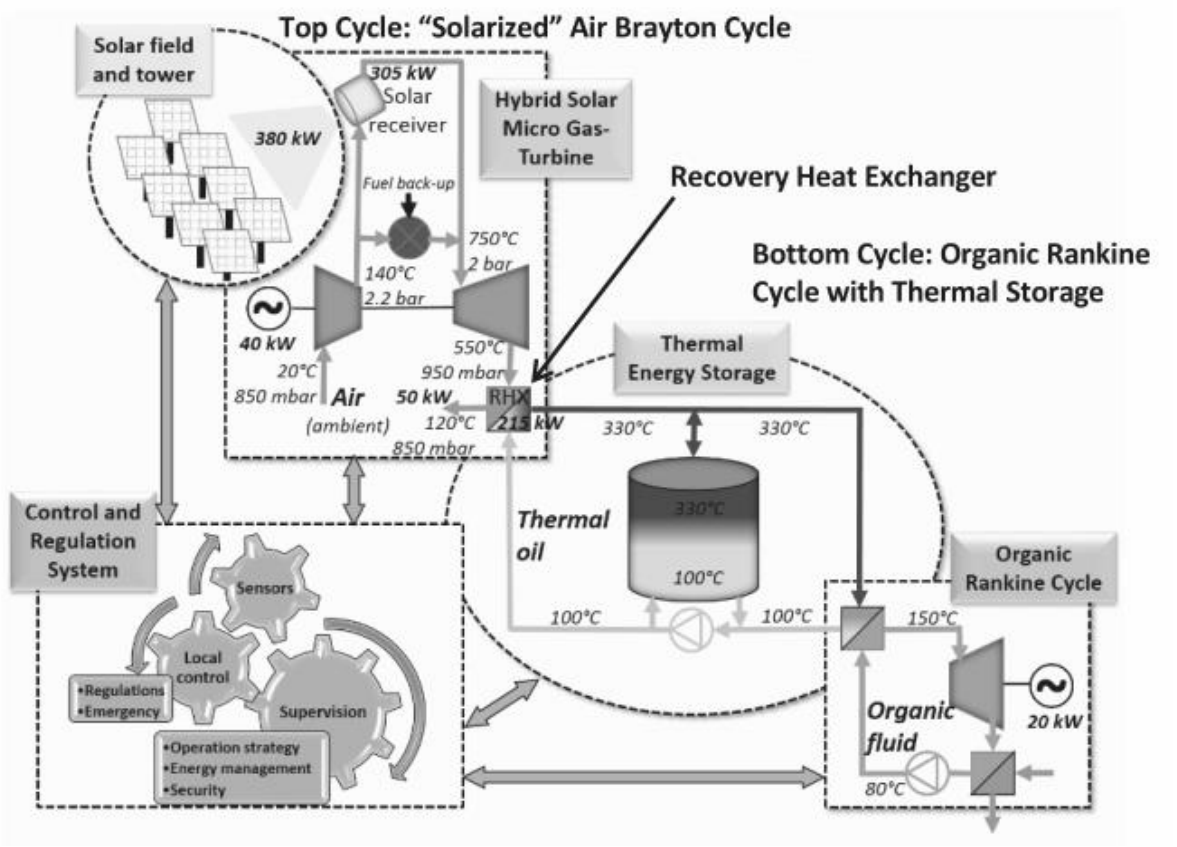


FIGURE 3 : schéma de principe au début du projet POLYPHEM (stade recherche)

L'air ambiant à P_a = 0,85 bar et T_a = 20°C est admis dans le compresseur (point 1) et ressort sous une pression P_2 = 2,2 bar (point 2) avant d'être chauffé, soit dans le récepteur solaire, soit dans une chaudière à fuel d'appoint (cogénération) et ressort à T_3 = 750°C (point 3). Il arrive alors dans la turbine qui entraîne le compresseur et l'alternateur. L'air ressort à T_4 = 550°C (point 4) pour alimenter l'échangeur avec l'étage de stockage.

2) Cycle de Brayton idéal

On va étudier dans cette sous-partie un cycle idéal de Brayton fonctionnant entre les même pressions que le cycle réel. Dans ce cycle idéal, la compression dans le compresseur et la détente dans la turbine sont isentropiques et l'étape de chauffe et celle de refroidissement sont isobares à P_2 et P_a. Il n'y a pas de récupération d'énergie par échangeur. L'air est traité comme un gaz parfait caractérisé par γ = 1,4 et la masse molaire M_{air} = 29 g.mol^{-1}.

Q.18 Pourquoi la pression d'admission P_a n'est-elle pas prise égale à 1 bar dans le projet POLYPHEM (voir **Figure 3**) ?

Q.19 En se servant du modèle du gaz parfait, établir l'expression de la capacité massique de l'air c_{pa} en fonction de R, M_{air} et γ.

Q.20 Dessiner l'allure du cycle de Brayton idéal dans les coordonnées de Clapeyron (p,v) et dans les coordonnées entropiques (T,s). On fera aussi figurer sur chaque diagramme une courbe isotherme, une isobare et une isentropique. Les échelles seront respectées au mieux. On notera $T_{i1} = T_a$, T_{i2}, T_{i3} et T_{i4} les températures atteintes au cours du cycle idéal à la fin de chaque transformation. On rappelle que l'entropie molaire d'un gaz parfait est $S_m(T,p) = C_{pm}.\ln(T)+R.\ln(P)+\text{cte}$.

On note le débit massique de l'air lors du fonctionnement en régime permanent D_m.

Q.21 Déterminer la puissance thermique $\mathcal{P}_{ich}$ reçue depuis la source chaude durant le cycle en fonction de D_m, γ, R, M_{air} et des températures caractérisant le cycle.

Q.22 Déterminer de même la puissance thermique $\mathscr{P}_{fr}$ reçue depuis la source froide durant le cycle.

Soit $\mathscr{P}_{u}$ la puissance mécanique produite et transformée en puissance électrique durant le cycle idéal (rendement de l'énergie mécanique à électrique supposé idéal de 1).

Q.23 Quelle est la relation entre les trois puissances qui ont été définies ? Quelle est l'origine physique de cette relation ?

Q.24 Donner l'expression du rendement du cycle idéal r_i en fonction des puissances définies plus haut.

Q.25 Déterminer r_i en fonction des températures du cycle.

Q.26 Exprimer T_{i2} en fonction de T_{i1}, P_a et P_2 puis T_{i3} en fonction de T_{i4}, P_a et P_2.

Q.27 Déterminer alors l'expressions de r_i en fonction des pressions P_a *et* P_2. Donner la valeur numérique de r_i.

Données : $R = 8{,}314$ J.K^{-1}.mol^{-1} ;

$(0{,}85/2{,}2)^{(0{,}4/1{,}4)} = 0{,}76$.

3) Échangeur avec l'étage de stockage

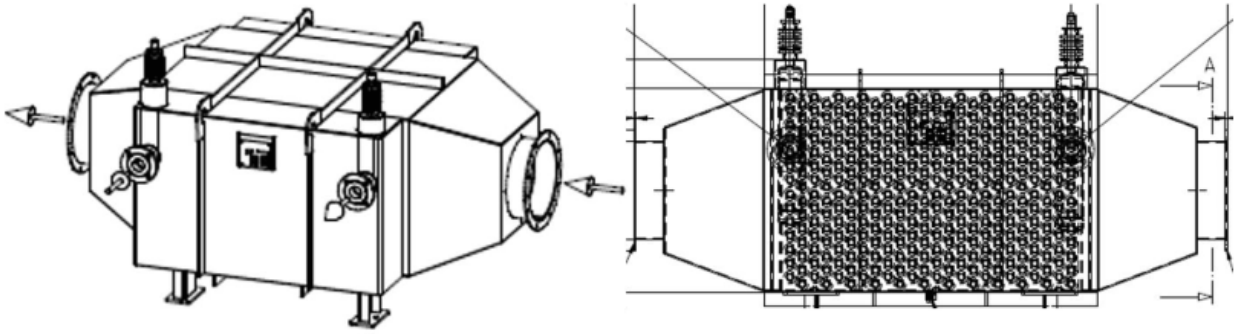


FIGURE 4 : schéma de l'échangeur (AALBORG)

L'air chaud en sortie de compresseur passe au travers d'une chambre d'échange contenant de multiples tubes dans lesquelles circule le fluide de stockage de chaleur qui sert de source chaude pour l'étage du cycle organique de Rankine.

Q.28 Pourquoi utilise-t-on de très nombreux petits tubes pour faire passer l'huile et pas un seul gros tuyau dans la chambre d'échange ? Quel est l'inconvénient en terme de perte de ce grand nombre de tubes ?

On donne les valeurs suivantes, légèrement différentes de celle du projet de recherche schématisé **FIGURE 3** (*Sources POLYPHEM WP4)* :

	Huile thermique (passant dans les tubes)	Air (passant dans la coque contenant les tubes)
Débit massique	$D_{mh} = 0{,}6$ kg/s	$D_{ma} = 0{,}82$ kg/s
Température d'entrée	T_{eh} = ?	$T_{ea} = 495$°C
Température de sortie	$T_{sh} = 350$°C	T_{sa} = ?
Capacité thermique massique	$c_{ph} = 2{,}1$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}	$c_{pa} = 1{,}0$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}

Q.29 En estimant l'échangeur sans perte, lier les différentes grandeurs du tableau.

Q.30 En déduire l'expression de la température T_{eh} puis, dans le cas où l'air sortant de l'échangeur est aux environs de T_{sa} =100°C, estimer sa valeur numérique.

Fin d'épreuve

IMPRIMERIE NATIONALE – 23 1021 – D'après documents fournis

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de PT chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Grandeurs, unités, analyse dimensionnelle et ordres de grandeur

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière :
écrire sur WhatsApp

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/banque-pt/pt