



Séquence n°4

Transferts thermiques et échangeurs



Fiches de synthèse mobilisées :

Fiche n°4 Transferts thermiques et échangeurs



Sommaire des activités

ACTIVITÉ 1 :	Propriétés isolantes de quelques matériaux.....	1
ACTIVITÉ 2 :	Etude d'un chauffage au sol	3
ACTIVITÉ 3 :	Étude d'un circuit d'eau chaude sanitaire d'une piscine municipale	4
ACTIVITÉ 4 :	Choix d'un échangeur thermique.....	8
ACTIVITÉ 5 :	Economie d'énergie dans le procédé d'une distillerie	12

ACTIVITÉ 1 : Propriétés isolantes de quelques matériaux

Le choix de la nature des matériaux est déterminant pour l'efficacité des matériaux isolants. Dans une démarche de développement durable des isolants végétaux sont apparus dans le bâtiment, depuis quelques années.

Le coton peut être par exemple utilisé comme isolant thermique, issu du recyclage de vêtements.

Tous les matériaux utilisés pour l'isolation sont qualifiés pour pouvoir les utiliser en respectant les réglementations thermiques dans le secteur de la construction et ainsi garantir l'efficacité énergétique des bâtiments.

Partie 1 : Mesure de la résistance thermique d'un matériau

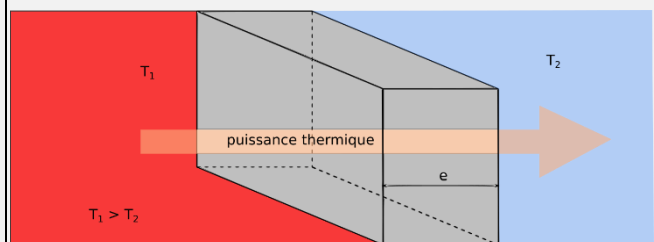
Document 1 : Puissance thermique à travers une paroi

La puissance thermique ϕ échangée à travers une paroi d'aire S est donnée par la relation :

$$\phi = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{th}}$$

T_1 et T_2 sont les températures des milieux de part et d'autre de la paroi et R_{th} est la résistance thermique de la paroi.

Dans l'exemple ci-contre $T_1 > T_2$



1. Pour limiter les déperditions thermiques, l'isolant doit-il avoir une grande ou faible résistance thermique ?
2. Est-il possible de maintenir un bâtiment très bien isolé à température constante sans chauffer l'hiver ?
3. Donner l'unité de la résistance thermique.
4. On dispose de plusieurs matériaux différents. Proposer un protocole expérimental pour mesurer leur résistance thermique.

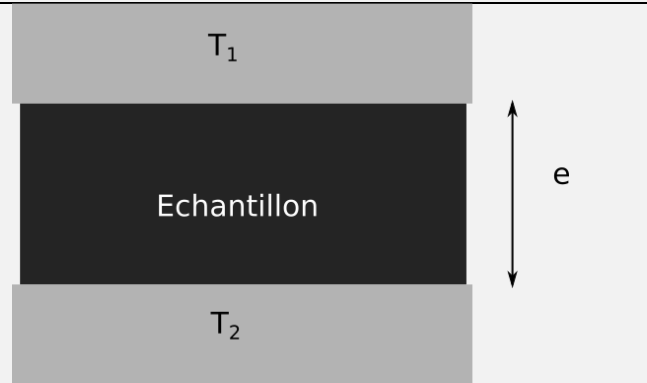
**Document 2 : Principe de la mesure de la résistance thermique**

L'échantillon dont on veut déterminer la résistance thermique est placé entre deux plaques d'aluminium de résistances thermiques négligeables et de dimensions 5×6 cm. L'ensemble est fermement serré. Les deux plaques sont suffisamment conductrices pour assurer une homogénéité de la température sur chaque face de l'échantillon.

La plaque du bas est au contact d'une source froide de température T_2 .

La plaque du haut est au contact d'une source chaude T_1 . La puissance thermique est ajustable grâce à une résistance électrique collée sur la face supérieure de la plaque aluminium du haut. La puissance thermique dissipée par la résistance est :

$$\phi = U \times I$$



Un système d'acquisition permet d'enregistrer les températures T_1 et T_2 en fonction du temps.

5. Régler la tension d'alimentation de la résistance chauffante pour que la température T_1 soit proche de la température ambiante.
6. Réaliser un enregistrement des températures T_1 et T_2 à l'aide d'un microcontrôleur ou d'un système d'acquisition et évaluer la durée nécessaire à l'établissement du régime permanent (les deux températures doivent être stables).
7. Une fois le régime permanent atteint, mesurer les températures T_1 et T_2 , la tension U et l'intensité I .
8. Calculer alors la résistance thermique de l'échantillon à l'aide des *Document 1* et *Document 2*.
9. Rechercher les sources d'erreur de mesure de la résistance thermique.
10. Estimer l'incertitude-type de mesure de la résistance thermique à l'aide d'un logiciel dédié.

Partie 2 : Association de deux matériaux

11. Mesurer la résistance thermique de deux matériaux différents puis celle de l'association des deux. Ajuster la tension d'alimentation de la résistance chauffante et attendre l'établissement de l'équilibre thermique pour chaque mesure.
12. Déterminer une relation entre les trois résistances thermiques en prenant compte des incertitudes estimées précédemment.

Partie 3 : L'ordre des différents matériaux a-t-elle une importance dans l'isolation des bâtiments ?

13. Selon vous l'ordre des matériaux a-t-il une importance lorsque l'on associe plusieurs matériaux entre eux ? Justifier.
14. Réaliser une mesure de la résistance thermique de l'association des deux matériaux précédents mais en changeant l'ordre de disposition.



ACTIVITÉ 2 : Etude d'un chauffage au sol

Une maison a une surface au sol $S = 92 \text{ m}^2$ avec une hauteur sous plafond $h = 2,50 \text{ m}$.

L'émetteur de chaleur pour compenser les pertes thermiques, est un plancher chauffant constitué de plusieurs boucles de canalisations d'eau chaude enfouie dans le sol (chape en béton).

La température intérieure est $\theta_i = 19^\circ\text{C}$ et la température extérieure moyenne sur une journée est $\theta_e = 9^\circ\text{C}$.

Données

- Capacité calorifique de l'air : $C = 1000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- Masse volumique de l'air : $\rho = 1,29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

1. Calculer les puissances dissipées par les différentes parois de la chambre 1 puis du séjour.

En déduire la puissance totale dissipée par la chambre 1 puis par le séjour.

Données Chambre 1

Nature des parois	Surface (m^2)	Résistance thermique ($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)	Puissance dissipée (W)
Mur extérieur	17,5	0,15	
Fenêtre	1,62	0,25	
Plancher	12,1	0,20	
Plafond	12,1	0,43	

Données Séjour

Nature des parois	Surface (m^2)	Résistance thermique ($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)	Puissance dissipée (W)
Mur extérieur	32	0,081	
Fenêtre	6,1	0,067	
Plancher	29	0,080	
Plafond	29	0,12	

2. Le volume d'air est renouvelé une fois toutes les deux heures par ventilation mécanique contrôlée.

Calculer l'énergie nécessaire pour réchauffer cet air renouvelé toutes les 2 heures et la puissance P_{air} nécessaire correspondante.

3. Calculer la puissance totale dissipée par l'ensemble de la maison. On donne les puissances dissipées dans les différentes pièces.

Pièce	Puissance dissipée (W)	Débit plancher chauffant Q_v
Chambre 1		1
Chambre 2	180	1
Chambre 3	160	1
Salle de bain/WC	115	2,5
Cuisine	200	2,4
Séjour		2,2
Salle à manger	270	2,3

4. Un système de chauffage par plancher chauffant permet de compenser les pertes thermiques afin de maintenir une température constante de 19°C dans l'ensemble de la maison. Le plancher chauffant joue le rôle d'un échangeur ; il est constitué de différentes boucles en dérivation. On note T_e la température d'entrée de chaque



boucle et T_s la température de sortie. On supposera que la température de sortie est identique pour chaque boucle.



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6b/Underfloor_heating_pipes.jpg

Exprimer la puissance thermique transférée par la boucle de la chambre 1 en fonction du débit, des températures T_E et T_s , de la capacité calorifique de l'eau et de la masse volumique de l'eau.

5. En déduire une expression de la puissance thermique totale transférée par le plancher chauffant de la maison en fonction du débit total $Q_{V,tot}$, des températures T_E et T_s , de la capacité calorifique de l'eau et de la masse volumique de l'eau.
6. Déterminer la différence de température $T_E - T_s$ pour que la puissance transmise par le plancher chauffant compense les pertes thermiques de la maison.

Données :

- Capacité calorifique de l'eau : $C_{eau} = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

ACTIVITÉ 3 : Étude d'un circuit d'eau chaude sanitaire d'une piscine municipale

On veut étudier le circuit d'eau chaude sanitaire d'une piscine (voir Document 1).

L'eau chaude sanitaire de la piscine provient du réseau d'eau de ville ①. L'eau est amenée à la température de 55°C par l'intermédiaire d'un échangeur à plaques à contre-courant ② puis stockée dans un ballon d'eau chaude ③, dont le niveau sera maintenu constant.

Ce réservoir de stockage permet d'alimenter les différents points de puisage de la piscine (douches...) ④.

Deux liquides circulent dans l'échangeur thermique :

- L'eau chaude primaire arrive à une température $\theta_1 = 75^\circ\text{C}$ avec un débit volumique Q_p égal à $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et ressort à une température θ_2 .
- L'eau chaude secondaire provient du réseau d'eau de ville. L'eau entre dans l'échangeur avec une température $\theta_3 = 10^\circ\text{C}$.

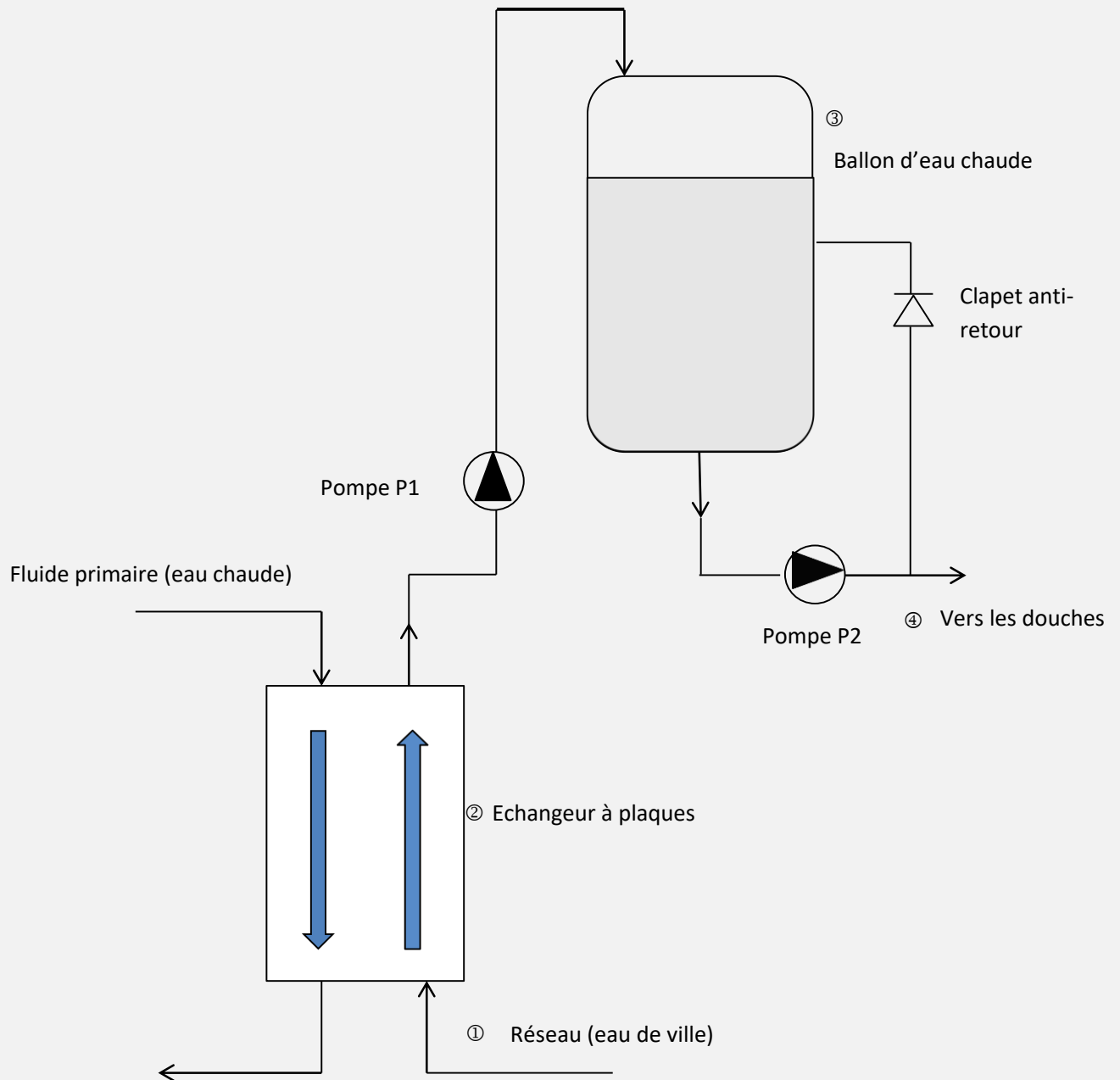
Le cahier des charges indique que la température à la sortie de l'échangeur doit être $\theta_4 = 55^\circ\text{C}$ et le débit volumique Q_s doit être égal à $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

L'échangeur peut être considéré comme parfaitement adiabatique, c'est-à-dire que l'on suppose qu'il n'échange pas d'énergie avec le milieu extérieur.



**Données :**

- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1\,000\text{ kg.m}^{-3}$
- Capacité thermique massique de l'eau : $C_{\text{eau}} = 4\,180\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

DOCUMENT 1 : Schématisation du circuit d'eau chaude sanitaire de la piscine municipale

1. Compléter le schéma de l'échangeur du Document 1 en indiquant les températures : θ_1 , θ_2 , θ_3 et θ_4 et les valeurs connues de ces températures.
2. Le schéma montre que les fluides circulent à contre-courant. Expliquez ce type de fonctionnement. Donner le nom de l'autre sens de circulation possible.



3. Montrer que la puissance thermique P_f reçue par l'eau froide est de 313,5 kW.
4. a. En déduire, en justifiant, la puissance thermique P_c fournie par l'eau chaude.
b. Calculer la température θ_2 de sortie du fluide primaire.
5. Montrer que l'écart de température moyen est $\Delta\theta_m = 33,3\text{ °C}$.

DOCUMENT 1 : Ecart de température moyen entre deux fluides

$$\Delta T_m = \frac{\Delta\theta_e - \Delta\theta_s}{\ln\left(\frac{\Delta\theta_e}{\Delta\theta_s}\right)}$$

$\Delta\theta_e$: différence de température à l'entrée de l'échangeur

$\Delta\theta_s$: différence de température à la sortie de l'échangeur

6. En déduire le coefficient global d'échange thermique U sachant que la surface nécessaire de l'échangeur à plaques est $S = 6,6\text{ m}^2$.
7. Calculer la nouvelle valeur de $\Delta\theta_m$ lorsque l'eau chaude et l'eau du réseau circulent dans le même sens dans l'échangeur, les valeurs des températures des deux fluides à l'entrée et à la sortie de l'échangeur restant inchangées.
8. Déterminer alors la nouvelle surface nécessaire de l'échangeur à plaques.
9. En déduire le mode de fonctionnement (sens de circulation des fluides dans l'échangeur thermique) le plus efficace.



ACTIVITÉ 4 : Choix d'un échangeur thermique

Un fournisseur d'échangeurs thermiques reçoit une demande d'étude d'un client potentiel.

Le cahier des charges imposé par le client est donné dans le document 1.

DOCUMENT 1 : cahier des charges du client

L'échangeur doit permettre le refroidissement d'un ester (éthanoate de butyle) de 122 °C à 30 °C afin de pouvoir le stocker. Obtenu après distillation, le débit volumique de cet ester est de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Deux liquides de refroidissement sont disponibles sur le site industriel : eau glycolée refroidie à 10 °C et eau du réseau à 20 °C en moyenne. Il y a deux contraintes particulières pour le liquide froid : son débit volumique doit rester inférieur à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour respecter les conditions d'utilisation de la pompe du circuit et sa température de sortie ne doit pas excéder 45 °C.

Données fournies :

	densité	Capacité thermique ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)
Eau glycolée :	1,040	3,50
Eau du réseau :	1,000	4,18
Ethanoate de butyle :	0,886	2,02

Trois types d'échangeurs sont commercialisés :

- Des échangeurs tubulaires à tubes en verre
- Des échangeurs tubulaires à tubes en inox
- Des échangeurs à plaques en inox

Le laboratoire d'essais de votre société dispose d'échangeurs de chaque type pour tester la meilleure solution pour le client. Les caractéristiques des échangeurs d'essai sont données dans le document 2.

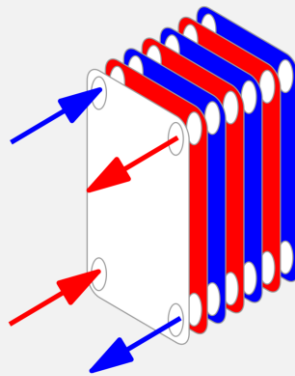
**DOCUMENT 2 : caractéristiques des échangeurs d'essai**

- **Les échangeurs tubulaires à tubes en verre ou inox ont une surface d'échange de 0,60 m².**
La conductivité thermique d'un matériau caractérise son aptitude dans le processus de transfert thermique. Plus elle est faible, plus le pouvoir isolant thermique du matériau est fort.

$$\lambda_{\text{verre}} : 0,90 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{inox}} : 16,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

- Echangeur platulaire (échangeur à plaques) : il est composé d'un grand nombre de plaques disposées l'une contre l'autre et séparées les unes des autres par un petit espace de quelques millimètres où circulent les liquides. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites.



https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur_de_chaleur#Echangeur_%C3%A0_plaques

L'échangeur platulaire d'essai a une surface d'échange de 0,50 m².

La démarche suivie pour une demande de client est la suivante :

- détermination du coefficient global d'échange de chacun des échangeurs
- choix d'un sens de circulation
- optimisation de l'échangeur thermique à construire

Partie 1 : détermination des coefficients globaux d'échange

L'étude avec les échangeurs d'essai est réalisée dans les conditions suivantes :

- Ethanoate de butyle : 122 °C à l'entrée et débit de 2 m³.h⁻¹
- Eau du réseau : 20 °C à l'entrée et débit de 2 m³.h⁻¹
- La circulation s'effectue à contre-courant dans les échangeurs.

Les températures de sortie des deux liquides sont indiquées dans le tableau suivant.

échangeur	Température de sortie (°C) Eau du réseau	Température de sortie (°C) Ethanoate de butyle
Echangeur à plaques	49,1	54,2
Echangeur tubulaire inox	34,5	89,2
Echangeur tubulaire verre	26,2	107,5



1. Pour l'échangeur à plaques, représenter sur un schéma les sens de circulation, les températures d'entrée et de sortie de chacun des liquides.
2. Comparer les performances de ces échangeurs d'un point de vue qualitatif en comparant les températures de sortie des deux liquides.
3. Remplir le tableau suivant en utilisant la démarche proposée ci-dessous :
 - Calculer des débits massiques des deux liquides à partir de leurs débits volumiques
 - Calculer la puissance thermique cédée par l'éthanoate de butyle.
 - Calculer la puissance thermique reçue par l'eau du réseau.
 - Calculer l'écart de température moyen entre les deux fluides à l'aide du document 3.
 - Calculer le coefficient global d'échange U en utilisant le fait que la puissance thermique transférée est égale à la puissance thermique reçue par le liquide froid.

DOCUMENT 3 : Ecart de température moyen entre deux fluides

$$\Delta T_m = \frac{\Delta \theta_e - \Delta \theta_s}{\ln \left(\frac{\Delta \theta_e}{\Delta \theta_s} \right)}$$

$\Delta \theta_e$: différence de température à l'entrée de l'échangeur

$\Delta \theta_s$: différence de température à la sortie de l'échangeur

échangeur	Débit massique (kg.s ⁻¹)	Puissance thermique cédée (Watt)	Puissance thermique reçue (Watt)	ΔT_m (°C)	Coefficient global d'échange U (W.m ⁻² .C ⁻¹)
Echangeur à plaques					
Echangeur tubulaire inox					
Echangeur tubulaire verre					

4. En déduire l'échangeur thermique d'essai le plus performant.
5. En vous aidant du document 2, justifier la différence observée sur le coefficient global d'échange U entre les deux échangeurs tubulaires.
6. Fournir une explication des petites différences de puissances thermiques cédées et reçues calculées (on raisonnera sur la valeur absolue de ces puissances).

Partie 2 : Choix d'un sens de circulation

Il est maintenant nécessaire de choisir le sens de circulation des liquides dans l'échangeur. Un essai avec l'échangeur à plaques est maintenant réalisé à co-courant dans les conditions précédentes de débits et de températures d'entrée. On compare les résultats expérimentaux dans le tableau suivant :

Echangeur à plaques	Température de sortie (°C) Eau du réseau	Température de sortie (°C) Ethanoate de butyle
Co-courant	46,0	61,3
Contre-courant	49,1	54,2



7. Proposer le sens de circulation souhaitable en calculant les puissances thermiques cédées par l'éthanoate de butyle.
8. Indiquer si cet échangeur à plaques d'essai satisfait la demande du client pour le sens de circulation choisi précédemment.

Partie 3 : optimisation de l'échangeur thermique

Après accord avec le client, la solution de l'échangeur platulaire est choisie. Il reste alors au fournisseur à proposer des conditions de fonctionnement optimales permettant de répondre au cahier des charges. Dans son laboratoire d'essai il peut choisir d'utiliser l'eau du réseau à 20 °C ou l'eau glycolée à 10 °C. Ces températures à l'alimentation de l'échangeur ne peuvent être modifiées. Il peut aussi faire varier les débits du liquide froid. Enfin des échangeurs platulaires de différentes surfaces d'échange sont utilisables.

Les résultats des expériences réalisées sont regroupés dans le tableau suivant. L'alimentation de l'échangeur en éthanoate de butyle s'effectue toujours à 122 °C avec un débit volumique de 2 m³.h⁻¹.

Liquide froid			Surface échangeur (m ²)	Température de sortie (°C) liquide froid	Température de sortie (°C) éthanoate de butyle
Nature	Température d'entrée (°C)	Débit volumique (m ³ .h ⁻¹)			
Eau du réseau	20	2,0	0,5	49,1	54,2
Eau du réseau	20	2,0	1	57,5	34,2
Eau glycolée	10	2,0	0,5	46,0	48,7
Eau glycolée	10	2,5	0,5	39,5	46,8
Eau glycolée	10	2,5	1	48,2	24,7
Eau glycolée	10	3	1	42,3	23,6

9. Compléter le tableau en calculant la puissance thermique reçue par le liquide froid.

Liquide froid			Surface échangeur (m ²)	Puissance thermique reçue (Watt)
Nature	Température d'entrée (°C)	Débit volumique (m ³ .h ⁻¹)		
Eau du réseau	20	2,0	0,5	
Eau du réseau	20	2,0	1	
Eau glycolée	10	2,0	0,5	
Eau glycolée	10	2,5	0,5	
Eau glycolée	10	2,5	1	
Eau glycolée	10	3	1	

10. Commenter les résultats obtenus en indiquant l'influence du débit de liquide froid ainsi que de la surface de l'échangeur.
11. Proposer un choix au client en indiquant les caractéristiques de l'échangeur, la nature du liquide froid ainsi que le débit de fonctionnement.



ACTIVITÉ 5 : Economie d'énergie dans le procédé d'une distillerie

Les sous-produits de la vinification sont traités en distillerie. La première étape consiste à augmenter la concentration en éthanol de ces sous-produits. Elle s'effectue dans une colonne de distillation continue.

Le coût principal dans le fonctionnement du procédé est le coût énergétique. Ce coût énergétique est principalement constitué par le chauffage au niveau du bouilleur de la colonne et par le chauffage de l'alimentation avant l'entrée dans la colonne. Une étude est réalisée afin de pouvoir examiner si une modification du procédé ne permettrait pas une substantielle économie d'énergie au niveau du chauffage de l'alimentation.

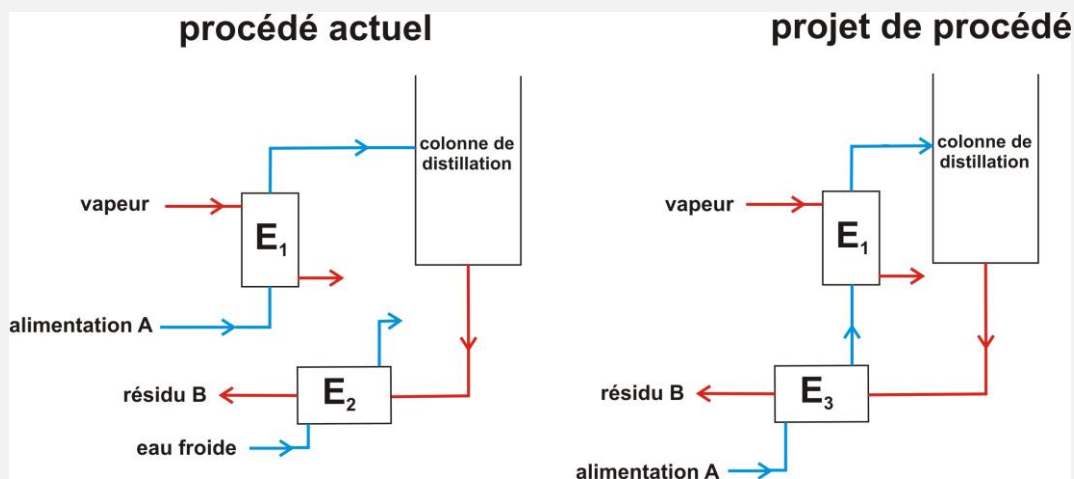
Le document 1 montre une partie du procédé actuel et le projet de modification de ce procédé (le bouilleur n'est pas représenté).

Dans le procédé actuel, l'alimentation A de la colonne est chauffée dans un échangeur thermique E_1 avec de la vapeur d'eau comme fluide chaud avant d'être introduit dans la colonne à sa température d'ébullition. Le résidu B, faiblement concentré en éthanol, est évacué au bas de la colonne et refroidi avant son élimination dans un échangeur thermique E_2 avec de l'eau comme fluide froid.

Le nouveau procédé envisage de récupérer l'énergie thermique du résidu B qui sort à une température élevée de la colonne. Au lieu de refroidir ce résidu, il est utilisé pour chauffer l'alimentation dans un échangeur thermique E_3 . L'échangeur thermique E_1 permet ensuite de chauffer le mélange à la température souhaitée à l'entrée de la colonne.

DOCUMENT 1 : procédés de distillation

Seule la partie inférieure de la colonne de distillation est représentée sur les schémas.



Les mélanges binaires A et B sont assimilables à des mélanges eau – éthanol.

$$M_{\text{eau}} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M_{\text{éthanol}} = 46 \text{ g.mol}^{-1}$$

Le débit massique d'alimentation A est de 7200 kg.h^{-1} . La fraction molaire en éthanol de A est x_A égale à 0,04. **La température de l'alimentation A à l'entrée des deux procédés est de 25°C .**

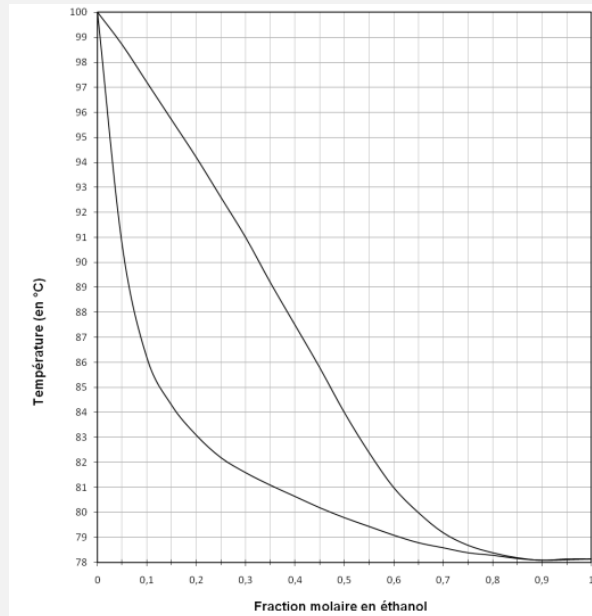
On donne également : $C_A = 4,00 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$

Le débit massique de résidu B est de 5800 kg.h^{-1} . **La température du résidu B à la sortie de la colonne de distillation est de 98°C .**

On donne également : $C_B = 4,10 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$

**Partie 1 : étude du procédé actuel**

1. La température de l'alimentation à l'entrée de la colonne est de 92 °C. Si le cours sur la distillation a déjà été réalisé, montrer que la température souhaitée est bien égale à 92°C, à l'aide du document 2.
2. Calculer la puissance thermique que doit fournir la vapeur pour le chauffage de l'alimentation.

DOCUMENT 2 : diagramme binaire isobare du mélange eau-éthanol à une pression de 1 bar**Partie 2 : étude du projet de nouveau procédé**

On souhaite pouvoir abaisser la température du résidu à 35 °C dans l'échangeur thermique E₃.

3. Calculer la puissance thermique cédée par le résidu dans cet échangeur.
4. Indiquer l'hypothèse à admettre pour justifier que la puissance thermique calculée à la question précédente est aussi égale, en valeur absolue, à la puissance thermique reçue par l'alimentation dans cet échangeur E₃.
5. En déduire la température de l'alimentation A à la sortie de cet échangeur E₃.
6. Calculer la puissance thermique nécessaire que doit fournir la vapeur d'eau dans l'échangeur thermique E₁.
7. En déduire le pourcentage d'économie réalisée en énergie thermique avec le nouveau procédé.

L'économie réalisée étant supérieure à 50 %, la modification du procédé est validée. Le dimensionnement de l'échangeur E₃ à installer nécessite de déterminer la surface de cet échangeur. Le coefficient global d'échange thermique de l'échangeur E₃ est de 2000 W.m⁻².°C⁻¹ et il fonctionnera à contre-courant.

8. Représenter sur un schéma les sens de circulation et les températures d'entrée et de sortie de chacun des liquides dans l'échangeur E₃.
9. Calculer la surface d'échange pour cet échangeur.