
TRAVAUX PRATIQUES

DE
TROISIÈME ANNÉE

2^{ème} semestre (S6)

*Semestre S6
Année Universitaire 2024/2025*

Organisation des rotations de TP du semestre S6 (2^e semestre – 3^e Année)

<i>C. Mariani responsable TPs 3A S6</i>	<i>J. Vicente responsable 3A</i>
<i>Tel: +33 4 12 23 13 89 (bureau 329)</i>	<i>Tel: +33 4 12 23 14 03 (bureau 228)</i>
<i>Email: christian.mariani@univ-amu.fr</i>	<i>Email: jerome.vicente@univ-amu.fr</i>

Document du 17/01/2025

Liste des TPs de troisième année - Semestre S6

Salles 109-110-111

TP du semestre S6 : 12 séances de 4h			
Nom (sigle)	Groupe	N°	N° Salle
Moteur Asynchrone Triphasé (MAT)	TP 1.3	3.1	110
Tour de refroidissement (TR)		3.2	110
Moteur Stirling (MS)		3.3	110
Pompe à chaleur mécanique (PAC)		3.4	111
Acoustique (AC)		3.5	110
Anémométrie Laser Doppler (ALD)		3.6	110
Conduction thermique dans une barre (CT)	TP 1.4	4.1	109
Rayonnement thermique (RT)		4.2	109
Caméra IR (CIR)		4.3	109
Sillage et traînée (ST)		4.4	111
Convection forcée - Effet d'ailettes (CFEA)		4.5	109
Spectrophotométrie et pyrométrie (SP)		4.6	109

Les TP 3.3, 3.5, 3.6, 4.4, 4.5 compteront dans le module de Mécanique II, les autres dans le module de Physique II.

Début des séances : manips « paires » (en grisé) → **13h30**
manips « impaires » → **14h00**

Déroulement d'une séance de TP

Les TPs se rapportent aux différentes spécialités du programme de 3^e année. Ils sont répartis en séances de 4 heures. L'ensemble des 12 manipulations proposées est divisé en 2 groupes : TP1.3, TP1.4. Vous effectuerez une rotation sur chaque groupe (TP1.3, TP1.4) selon une permutation circulaire qui durera 6 semaines à raison d'une séance par semaine. Le matériel nécessaire à la réalisation du TP se trouve sur la table en début de séance et il est interdit de le déplacer d'une table à une autre. Avant de commencer une manipulation bien lire la fiche de « recommandation » s'il y en a une sur la table. Les calculs seront effectués au fur et à mesure des expériences et les courbes tracées immédiatement afin que l'expérimentation soit guidée par l'interprétation des résultats acquis. Des ordinateurs sont à votre disposition pour vous assister dans vos calculs et présentations de résultats.

La préparation ainsi que les tableaux de mesure devront être déposés dans AMETICE.

Les comptes rendus de TP (fichiers pdf) seront à déposer par l'un des étudiants dans le dossier de l'enseignant qui a assuré l'encadrement de la séance, et dans la soirée suivant le TP (dépôt jusqu'à 23h59)



Les noms des fichiers doivent être de la forme suivante, sous peine de perdre des points : « date_N°groupe_N°binome_NOMAA-NOMAB_sigleTP.pdf ».

Exemple : 21-01-2025_Gr1_B02_MARIANI -VICENTE_PAC.pdf »

(pour le sigle du TP voir tableau des bancs d'expériences ci-dessus)

Afin d'effectuer un travail sérieux en séance de TP, il est obligatoire de préparer les TPs avant la séance (travail théorique notamment + questions sur AMETICE). Le rapport de TP doit avoir une structure logique et il faut intégrer une analyse de chacun des résultats. Ainsi, **une courbe ou un tableau de mesures ne sert à rien sans une analyse**. Évitez les banalités du style : « ça monte », « ça descend ». Également, le texte de TP ne doit pas être vu comme un questionnaire mais comme un guide dans votre réflexion.

Pour une structure cohérente et rigoureuse, les élèves peuvent se baser sur la méthodologie IMRAD (Introduction, Méthode, Résultats, Analyse, Discussion), avec en plus une Conclusion. Un exemple de compte-rendu de bonne qualité et un exemple de mauvaise qualité sont donnés sur AMETICE.

L'introduction et la conclusion sont des éléments essentiels qui ne doivent pas être négligés. L'introduction explique l'intérêt du système physique étudié, décrit brièvement l'appareil de mesure et le protocole expérimental. La conclusion doit rappeler les principaux résultats et les discussions associées, puis éventuellement finir par une ouverture. Il est bien plus apprécié d'écrire le compte-rendu comme un rapport scientifique impersonnel plutôt qu'un descriptif des tâches effectuées. On évitera le « nous » et le « on » et on leur préférera les phrases à la forme passive. *Exemple : Il vaut mieux écrire « Les échantillons sont pesés puis placés dans l'appareil » plutôt que « Nous avons pesé puis placé les échantillons dans l'appareil »*

Le protocole expérimental ne doit rassembler que les actions les plus pertinentes en termes de reproductibilité scientifique (inutile d'écrire que l'on branche un appareil). Il est également indispensable de mettre dans le compte-rendu l'ensemble des mesures brutes et relevés expérimentaux, même en annexe, afin que les enseignants puissent comprendre les analyses et résultats que vous présentez. **Attention : l'expression écrite et les fautes d'orthographe ne doivent pas être négligées, sous peine d'être sanctionnées.**

Règles d'évaluation

La note du compte rendu tient compte à la fois du comportement pendant la séance (réactivité, autonomie, ingéniosité, sens critique face aux mesures), du travail de préparation et de la rédaction. Une séance pour débriefer la rédaction de votre premier CR aura lieu la seconde semaine afin de pouvoir vous améliorer.

À la fin du semestre chaque étudiant possède un ensemble de 12 notes. Chacune des notes est prise en compte dans le module théorique associé, soit le module de mécanique 2, soit le module de physique 2 (voir répartition

des TPs dans les modules, page 2 de ce préambule). De plus chaque étudiant est évalué au cours de deux examens oraux de 20 min. environ portant chacun sur les 6 derniers TP vus. Deux TP seront tirés au sort au chapeau de votre main ; vous devrez être capable d'expliquer entièrement les expérimentations réalisées, les grandeurs mesurées, les lois mises en évidence et pouvoir dire quelles sont les applications industrielles. **La note moyenne issue de ces deux oraux compte pour 20% de la note finale de chaque UE.**

Absences

Les séances de TP étant obligatoires, toute absence devra être justifiée auprès de l'encadrant de la séance, du responsable TP ou de la scolarité. Une absence non justifiée se traduira par un 0 au compte-rendu et au travail en salle. Les TP ratés seront faits lors de la séance de rattrapage de fin d'année, prévue à cet effet.

Liste des binômes

groupe G3.1 : séance le lundi :

NOMS Prénoms			Binômes, Trinôme N°
ABDALLAH Chaimata	DUTRIEUX Zoé	GIRARD Auriane	1
ARIS Tayma	SAO JOAO Thibault		2
AZZOUG Kenny	MENAGNI Romuald		3
BELLI Andrea	BENAISSE Yassine		4
CHABAB Ali	M'BAE Fitratallah		5
DABO Mouhamadou	MOURCHID Imad		6
DALPHIN Gabriel	WAHBI Salma		7
DESJOBERT François	PELAZZA Esteban		8
GAUDUCHEAU Antoine	LAPORTE Antoine		9
LOPEZ Louis-Paul	SICSIC Thylane		10
MONKERHEY Gabriel	TARRACCA Thomas		11
			12

groupe G3.2 : séance le mardi :

NOMS Prénoms			Binômes, Trinôme N°
AMBROSINO Laurent	GOMBERT Timothé	LHUISSIER Adrien	1
BALESTRA Valentina	GARRO Pauline		2
BALLASTEGUIN Abygaëlle	YAKHLEF Adem		3
BERGE Paul	POCACHARD Jérémy		4
DAUPHINE Julian	GARCIA Nicolas		5
DESSEZ Gaian	ESPOSITO Quentin		6
FANGET Baptiste	PEZARD Léo		7
FRANCOIS Mathieu	GUY Antonin		8
LE BRIS Julien	PAYRASTRE Julien		9
MORIN Léo	TREHIN Nathan		10
ORTUZAR Alexandre	YAHYAOUI Salim		11
			12

groupe G3.3 : séance le mercredi :

NOMS Prénoms		Binômes N°
ALLARD Mathilde	FURNON Philippe	1
BICHAUT Julien	GUIMONT Odysséas	2
BONNENFANT Carla	JUPIN Maxence	3
DAID Yanis	TOUFALI Luna	4
DESPREZ Lise	PARE Louis	5
ESSAID Badr	HURON Lucas	6
JEANNE Gilles-Alain	LACHAU Clément	7
LEBRACHE Djebrial	REY Mathis	8
LEFEVRE Titouan	PELADAN Paul	9
PILLET Corentin	RIFFARD Mélie	10
RERIOUEDJ Yassine	SAURAT Gaël	11
		12

Planning :

		N° de séance											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N° binôme	1	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
	2	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.1
	3	3.3	3.4	3.5	3.6	3.1	3.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.1	4.2
	4	3.4	3.5	3.6	3.1	3.2	3.3	4.4	4.5	4.6	4.1	4.2	4.3
	5	3.5	3.6	3.1	3.2	3.3	3.4	4.5	4.6	4.1	4.2	4.3	4.4
	6	3.6	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	4.6	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
	7	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
	8	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.1
	9	4.3	4.4	4.5	4.6	4.1	4.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.1	3.2
	10	4.4	4.5	4.6	4.1	4.2	4.3	3.4	3.5	3.6	3.1	3.2	3.3
	11	4.5	4.6	4.1	4.2	4.3	4.4	3.5	3.6	3.1	3.2	3.3	3.4
	12	4.6	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	3.6	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5

N° séance	G3.1	G3.2	G3.3
1	ven. 24 Jan.	mar. 21 Jan.	mer. 22 Jan.
2	lun. 27 Jan.	mar. 28 Jan.	mer. 29 Jan.
3	lun. 03 Fév.	mar. 04 Fév.	mer. 05 Fév.
4	lun. 03 Mars	mar. 04 Mars	mer. 05 Mars
5	lun. 10 Mars	mar. 11 Mars	mer. 12 Mars
6	lun. 17 Mars	mar. 18 Mars	mer. 19 Mars
Oral 1/2	lun. 24 Mars	mar. 25 Mars	mer. 26 Mars
7	lun. 31 Mars	mar. 01 Avr.	mer. 02 Avr.
8	lun. 14 Avr.	mar. 15 Avr.	mer. 16 Avr.
9	mar. 22 Avr.	jeu. 24 Avr. 8h	mer. 23 Avr.
10	lun. 28 Avr.	mar. 29 Avr.	mer. 30 Avr.
11	lun. 05 Mai	mar. 06 Mai	mer. 07 Mai
12	lun. 12 Mai	mar. 13 Mai	mer. 14 Mai
rattrapage	ven. 09 mai. 8h-12h30		
Oral 2/2	lun. 19 Mai	mar. 20 Mai	mer. 21 Mai



Des modifications d'emploi du temps sont susceptibles de se produire en cours de semestre. Il est donc impératif de vérifier sur l'emploi du temps en ligne les dates des séances

Initiales	Encadrant	E mail
CM	Christian MARIANI	christian.mariani@univ-amu.fr
CP	Chantal PELCE	chantal.pelce@univ-amu.fr
FR	Fabrice RIGOLLET	fabrice.rigollet@univ-amu.fr
LB	Laurence BERGOUGNOUX	laurence.bergougnoux@univ-amu.fr
LL	Lionel LARCHEVEQUE	lionel.larcheveque@univ-amu.fr
HB	Hafida BENOSMAN	hafida.benosman@univ-amu.fr

Moteur asynchrone triphasé

1 Introduction

Le moteur asynchrone, dont la puissance varie de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus répandu et le plus utilisé de tous les moteurs électriques en raison de sa robustesse, de sa simplicité de construction et de sa facilité d'entretien. Par rapport à un moteur synchrone il présente un rapport coût/puissance plus faible.

Le fonctionnement de ce type de moteur est basé sur le principe de l'action d'un champ magnétique tournant sur un enroulement en court-circuit. Il est constitué d'une partie fixe, le stator qui comporte le bobinage, et d'une partie rotative, le rotor qui est bobiné en cage d'écureuil.

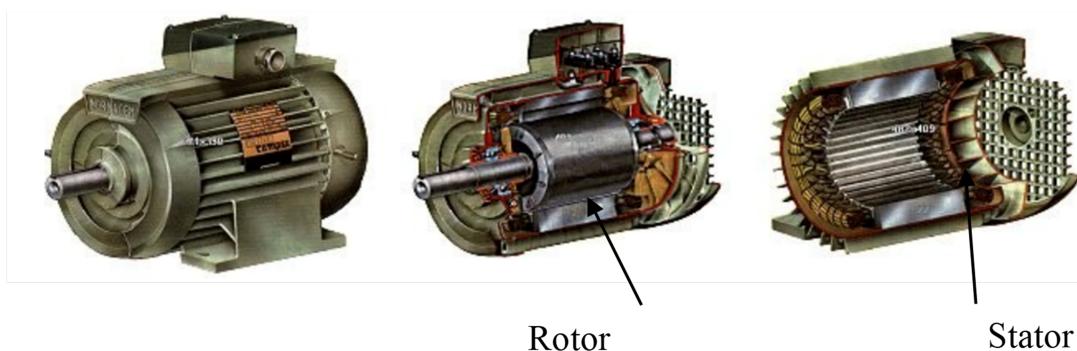


FIGURE 1 – Éléments principaux d'un moteur asynchrone

Le banc de charge disponible en TP permet l'étude d'un moteur asynchrone triphasé dont les caractéristiques sont : 230/400V-1500 W (voir Figure 2 et Annexe A.3).

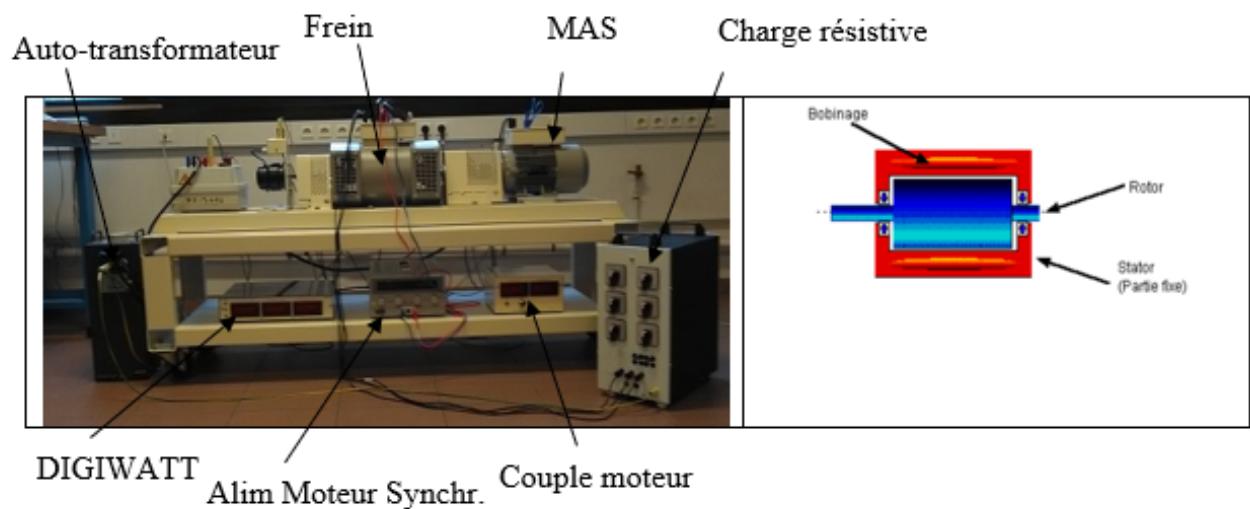


FIGURE 2 – Banc de charge et modules associés / Éléments du moteur

2 Présentation du matériel

Les différents éléments accompagnant le moteur asynchrone triphasé sont montés sur un banc dit « banc de charge », le tout sur un châssis à roulettes, voir Figure 2.

Le moteur est chargé par un frein (machine synchrone triphasée (alternateur), 1500 W) et est commandé par un autotransformateur qui est directement branché sur un réseau triphasé équilibré. Par ailleurs, on trouve aussi sur le banc divers modules de commande, de mesure (capteur de couple rotatif sans balais, dynamo-tachymétrique, modules d'affichage de grandeurs telles que couple, courant, tension, vitesse du moteur, puissance, etc.)

2.1 Le moteur asynchrone

Le moteur asynchrone dont nous disposons est un moteur triphasé SIEMENS. Selon le réseau électrique dont nous disposons en TP, le moteur peut être connecté en étoile ou bien en triangle (voir plaque signalétique au-dessus du moteur (Annexe A.1)) et Annexe A.3). Dans notre cas, nous disposons d'un réseau EDF triphasé 400 V.

2.2 Contrôle du moteur asynchrone

2.2.1 L'autotransformateur

Le moteur asynchrone est alimenté par un auto-transformateur triphasé, placé en amont. Celui-ci est directement branché sur le réseau EDF. Il permet de fixer la tension d'entrée et de la maintenir constante, quelque soit la tension fournie par le réseau EDF. La fréquence ne change pas, elle est celle du réseau 50 Hz.

Dans ce dispositif, on fera varier la vitesse de rotation du moteur en lui imposant un couple de freinage. On n'utilisera pas un variateur de vitesse, qui aurait permis, en faisant varier la fréquence des courants statoriques, de faire varier la vitesse du champ magnétique tournant. Cette dernière est la vitesse de synchronisme N_s et donc la vitesse du rotor.

2.3 Le freinage

2.3.1 Description du frein

Le freinage est effectué par un alternateur, entraîné par le moteur asynchrone lui-même. L'alternateur débite un courant dans une charge résistive variable (5%, 10%, 15%, 20%, 25%). Le courant continu débité dépend de la charge fixée. Ce courant alimente le stator de la machine synchrone et le champ magnétique tournant créé (proportionnel au courant injecté) impose une force contre-électromotrice qui s'oppose au mouvement du rotor. C'est ainsi que le moteur asynchrone est freiné par l'intermédiaire de son axe. On peut donc faire varier le freinage et donc le couple résistant T_r appliqué par le frein sur l'arbre de transmission en modifiant la charge résistive. On modifie de ce fait le couple utile T_u déployé par le moteur.

2.3.2 Commande de l'alternateur

L'alternateur ne tourne que si sa bobine d'induction est alimentée. La tension appliquée devra être proche de 45 V (le courant correspondant est de 2.5 A).

2.4 Les appareils de mesures électriques

2.4.1 Le wattmètre numérique TRMS. REF. DIGIWATT

DIGIWATT est un multimètre numérique, à entrées flottantes, affichant simultanément sur sa face AVANT les 3 grandeurs électriques : tension entre phases ou tension composée, courant d'une ligne, puissance totale. Il mesure les valeurs efficaces vraies de ces grandeurs U, I et W, cf. Figure 3.

Sur sa face ARRIERE se trouvent des sorties de « recopie » de U, I, W. Il s'agit en réalité de sorties délivrant un signal d'origine, mais isolé galvaniquement de celui-ci. Ces sorties de recopie 0 V - 10 V permettent l'acquisition des trois grandeurs électriques par un PC ou tout autre système d'acquisition.

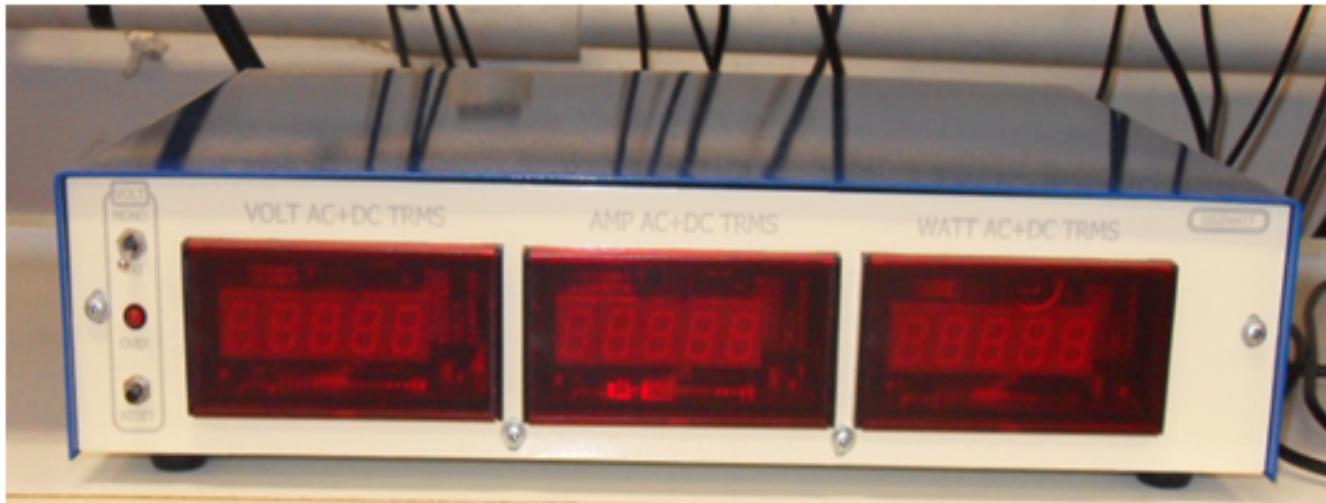


FIGURE 3 – Le module DIGIWATT

3 Préparation du TP (à faire avant d'arriver en séance)

A partir des caractéristiques nominales du moteur, données en Annexe A.1, et des équations données en Annexe A.2) répondre aux questions suivantes :

- A quoi correspondent les grandeurs nominales ?
- Quel montage (étoile ou triangle) devra-t-on utiliser pour brancher le moteur ? Justifier.
- A partir de la plaque signalétique, indiquer en les nommant, les données nominales qui nous concernent.
- Donner la vitesse de synchronisme, (valeur standard).
- Déterminer le nombre p de paires de pôles du moteur.
- Calculer le glissement.
- Calculer le couple utile.
- Calculer les puissances active, réactive et apparente. Que représentent ces puissances ?
- Calculer le rendement nominal η_n du moteur.

4 Procédure de mise en route et procédure d'arrêt : Voir la fiche en salle

5 Manipulations

5.1 Mesures

Les mesures seront faites à deux tensions d'alimentation différentes : 230 V et 400 V et les résultats obtenus seront comparés entre eux. Dans les deux cas, le montage est en étoile.

5.1.1 Essai à vide

Afin d'évaluer les pertes constantes du moteur asynchrone, il est nécessaire d'effectuer un essai à vide, c'est-à-dire sans imposer de couple résistant, (moteur libre de toute charge mécanique). On supposera que les pertes fer sont égales aux pertes mécaniques. De plus, la résistance de chaque enroulement r, sera prise égale à 2Ω .

1. Relever la puissance active absorbée à vide par le moteur P_{a0} . Comparer avec le résultat obtenu à partir des données de la plaque signalétique.
2. Relever le courant en ligne et évaluer les pertes Joule au stator P_{JS_0} .
3. En déduire les pertes constantes P_C . (On considérera les pertes P_{fer} comme négligeables et on montrera que les pertes constantes sont bien égales à la puissance absorbée à vide moins les pertes Joule au Stator à vide).

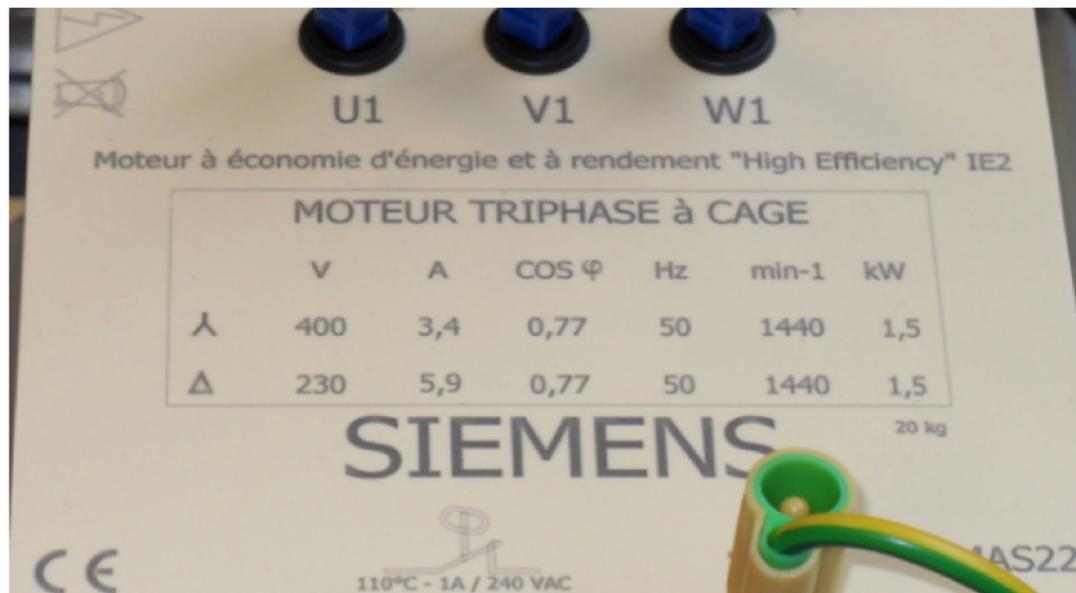
5.1.2 Essai en charge

Pour différentes valeurs du couple utile T_u , déterminer les paramètres caractérisant le fonctionnement du moteur. Pour cela, agir sur la charge résistive contrôlant le freinage. Reporter l'ensemble des mesures et des calculs dans un tableau. (On considérera toujours que les pertes Fer sont nulles).

1. Pour la tension la plus faible (230 V), faire varier la charge résistive de 5% à 20% ou 25% de manière à ne pas dépasser 5 N.m pour T_u .
2. Pour la tension la plus élevée (400 V), faire varier la charge de 5% à 90% ou 95%. de manière à ne pas dépasser 10 N.m pour T_u . Relever l'ensemble des grandeurs disponibles (P_a , U, I, n, T_u). Déterminer $\cos(\Phi)$, Q_r , S.
3. En déduire, pour chaque valeur du couple, la puissance utile P_u , le glissement g et le rendement du moteur η . Détailier les calculs pour un couple donné.
4. Calculer aussi la puissance transmise à l'entrefer P_{tr} ainsi que les pertes Joule au rotor P_{JR} et au stator P_{JS} .
5. Tracer la courbe $T_u(n)$.
6. Tracer sur le même graphe (lorsque c'est possible) η , g, $\cos(\Phi)$ en fonction de P_u .
7. Tracer sur le même graphe (pour 230 V et 400 V) I et Q_r en fonction de P_u .
8. Commenter tous les graphes précédents. Comparer les résultats obtenus pour les deux tensions d'alimentation.

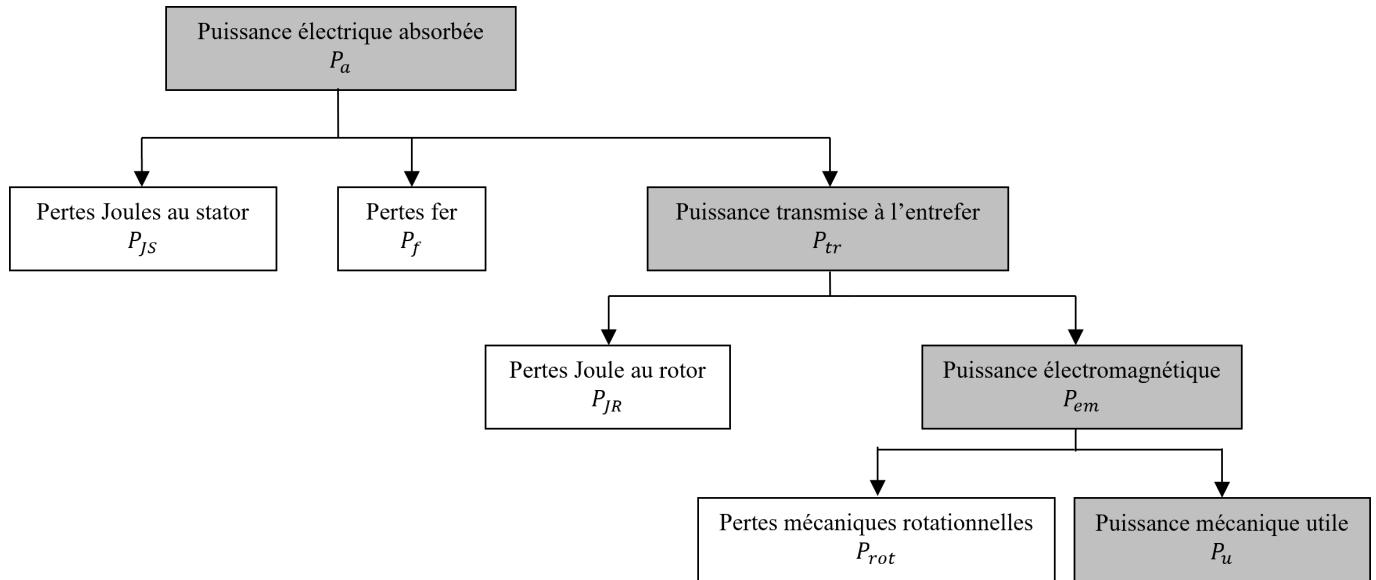
A Annexes

A.1 Caractéristiques du moteur MAS22 - Fiche signalétique



A.2 Bilan des puissances et des pertes (Rappel)

Le bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la figure ci-dessous. Le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée P_a .



- Puissance absorbée ou **puissance active électrique** : $P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi$
- Pertes par effet Joule au stator : $P_{JS} = \frac{3}{2} \cdot R \cdot I^2$
- Puissance transmise dans l'entrefer : $P_{TR} = P_a - (P_{JS} + P_f)$
- Pertes Joule au rotor : $P_{JR} = g \cdot P_{TR}$
- Puissance électromagnétique : $P_{em} = P_{TR} - P_{JR} = (1-g) \cdot P_{TR}$ et aussi $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$
- Moment du couple électromagnétique : $T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{TR}}{\Omega_S}$
- Puissance mécanique et couple utiles : $P_u = T_u \cdot \Omega$
- Rendement $\eta = \frac{P_u}{P_a}$ ou encore $\eta = \frac{P_a - \text{pertes}}{P_a} = \frac{P_a - P_{JS} - P_f - P_{JR} - P_{rot}}{P_a}$
- Pertes constantes ou collectives $P_{u_0} = P_{a_0} - P_{JS_0} - P_C - P_{JR_0}$
à vide, $g = 0 \Rightarrow P_{JR_0} = 0$ et $P_{u_0} = 0 \Rightarrow P_C = P_{a_0} - P_{JS_0}$

A.3 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

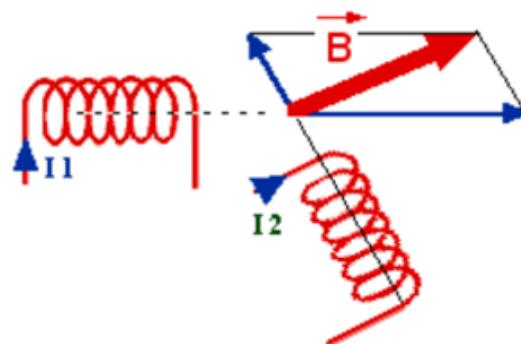
A.3.1 Champ magnétique tournant et cage d'écureuil

Le principe des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives. La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique B . Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont fonction du courant I .

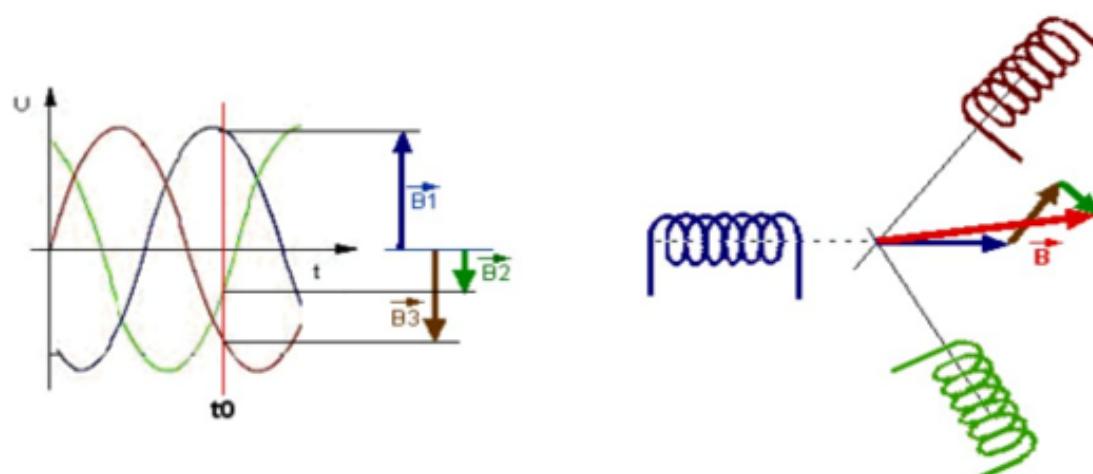


C'est une grandeur vectorielle. Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à la même fréquence que le courant. Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle des deux autres.

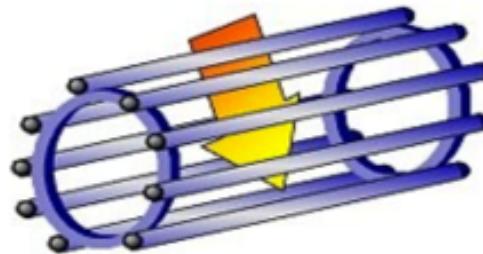
Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés.



Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés (chacun à son tour passe par un maximum). Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit $50 \text{ tr/s} = 3000 \text{ tr/min}$. Les 3 enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, elle va tourner à cette vitesse de synchronisme.



Le rotor est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une "cage d'écureuil".



Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance. Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. D'après la loi de Lenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier. Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone. Prenons l'exemple d'un moteur dont la fréquence de rotation nominale relevée sur la place signalétique est de 2840 tr/min, ce moteur étant alimenté en courant de 50 Hz, la fréquence de rotation du champ magnétique est donc de 50 tr/s soit 3000 tr/min. Le rotor est donc balayé par un champ magnétique qui tourne à une fréquence de rotation relative de $\Omega_{rel} = 3000 - 2840 = 160 \text{ tr/min}$.

A.3.2 Le bobinage

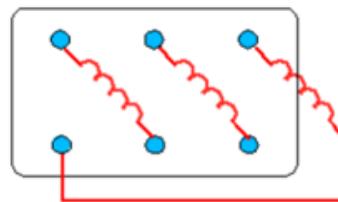
Les bobines sont logées dans les encoches du stator. S'il y a une paire de pôles magnétique pour chacune des trois phases, la fréquence de synchronisme est alors de 3000 tr/min. Si on augmente le nombre de paires de pôles, il est possible d'obtenir des moteurs avec des fréquences de rotation différentes.

1 paire de pôles → 3000 tr/min

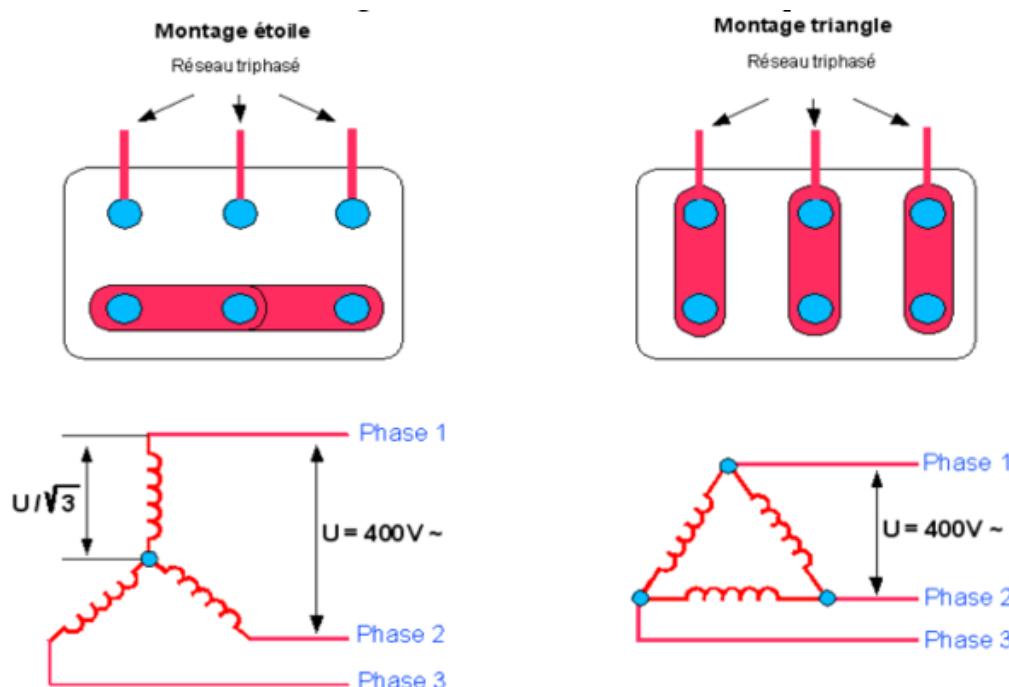
2 paires de pôles → 1500 tr/min



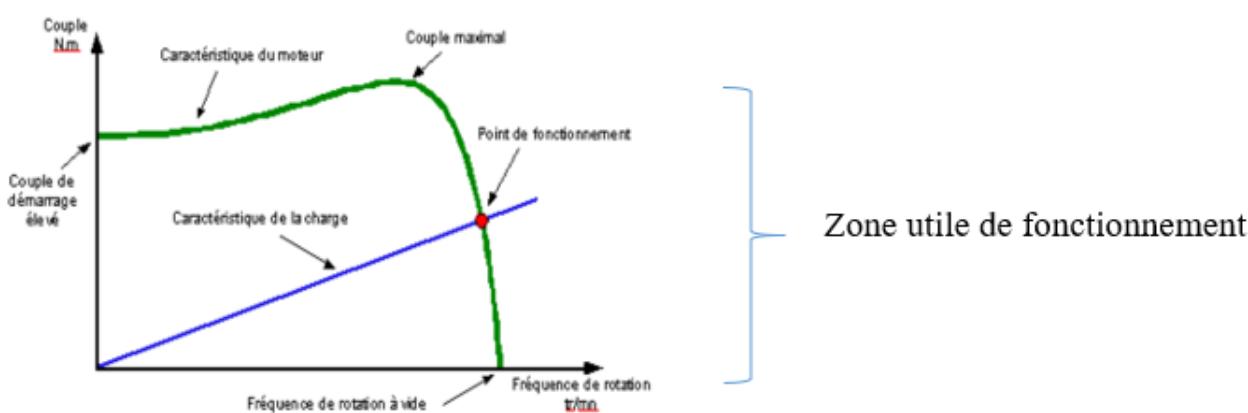
Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située sur le dessus du moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon le schéma ci-dessous.



Il y a deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé. Le montage en étoile et le montage en triangle. Avec un branchement en étoile, la tension aux bornes de chacune des bobines est d'environ 230 V. Dans le montage en triangle, chacune des bobines est alimentée avec la tension nominale du réseau (400 V). On utilise le montage étoile si un moteur de 230 V doit être relié sur un réseau 400 V ou pour démarrer un moteur à puissance réduite dans le cas d'une charge avec une forte inertie mécanique.



A.3.3 Courbe caractéristique du moteur asynchrone



Tour de refroidissement

1 Éléments de théorie

1.1 Les échanges de chaleur par évaporation

Considérons la surface d'une gouttelette ou pellicule d'eau chaude en contact avec un courant d'air. Si l'on suppose que l'eau est plus chaude que l'air, l'eau se refroidira :

- Par rayonnement - Cet effet est très faible dans les conditions normales et peut être négligé.
- Par conduction et convection - ceci dépend de la différence de température, de la surface, de la vitesse de l'air, etc.
- Par évaporation - ceci constitue, de loin, le facteur le plus important. Le refroidissement a lieu lorsque les molécules de H₂O diffusent de la surface dans l'air environnant. L'énergie requise (chaleur latente de vaporisation) pour ce processus est soustraite au liquide restant (cf. Figure 1) ce qui provoque une diminution de l'énergie interne du liquide donc de sa température.

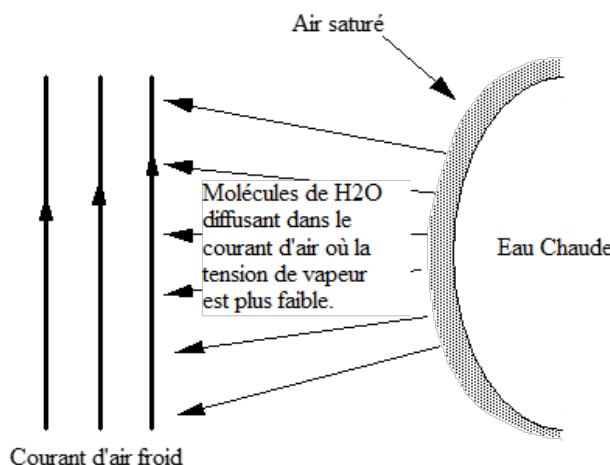


FIGURE 1 – Schématisation des échanges lors de l'évaporation

Le débit d'évaporation depuis une surface mouillée, vers l'air environnant, est déterminé par la différence entre la tension de vapeur à la surface du liquide, c'est-à-dire la pression de saturation correspondant à la température de la surface, et la tension de vapeur dans l'air environnant. Cette dernière dépend de la pression totale de l'air et de son humidité absolue. Dans un espace clos, l'évaporation peut continuer jusqu'à ce que les deux tensions de vapeur soient égales, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'air soit saturé et à la même température que la surface. Toutefois, s'il existe une circulation constante d'air non saturé, la surface mouillée atteindra une température d'équilibre, à laquelle l'effet de refroidissement dû à l'évaporation est égal au transfert de chaleur vers le liquide, par conduction et convection à partir de l'air, qui, dans ces conditions, sera à une température plus élevée. La température d'équilibre atteinte par la surface, dans des conditions adiabatiques est la température du bulbe humide qui est bien connue en hygrométrie.

Dans une tour de refroidissement de dimensions infinies, avec un débit d'air approprié, l'eau quittant la tour serait à la température du bulbe humide d'air d'entrée.

C'est pourquoi la différence entre la température de l'eau quittant la tour et la température locale du bulbe humide est une indication de l'efficacité de la tour de refroidissement. Cette différence de températures est donc l'un des paramètres les plus importants pour l'essai, la spécification, la conception et le choix des tours de refroidissement. Les conditions existantes dans un garnissage de tour de refroidissement sont complexes, par suite des variations des températures de l'air, d'humidité et de température de l'eau, lorsque les deux fluides traversent la tour à contre-courant.

Principalement, quatre facteurs affectent les caractéristiques d'une tour de refroidissement :

- La température d'eau (imposée par la charge de refroidissement)
- Le débit d'air
- Le débit d'eau
- Le garnissage de la tour, conditionnant la surface d'échange entre l'eau et l'air

Dans ce TP, nous nous proposons de faire varier uniquement les deux premiers paramètres de façon à obtenir une idée générale des caractéristiques d'une tour de refroidissement.

1.2 Propriétés caractéristiques de l'air humide

1.2.1 Humidité absolue (r) ou teneur en vapeur d'eau de l'air humide

La quantité de vapeur d'eau susceptible d'être contenue dans l'air humide varie avec la température et croît avec celle-ci. La valeur de la teneur en humidité est généralement exprimée en kilogramme de vapeur par kilogramme d'air sec (kg/kg_{as}). Le rapport moléculaire eau/air sec s'écrit $\frac{P_v}{P_t - P_{Pv}}$ avec P_t la pression totale de l'air et P_v la pression partielle de la vapeur d'eau. En appliquant la loi d'état des gaz parfaits à une masse de vapeur m_v , et une masse d'air sec m_{as} , l'humidité absolue $r = \frac{m_v}{m_{as}}$ se transforme en :

$$r = \frac{M_{eau}}{M_{air}} \cdot \frac{P_v}{P_{atmo} - P_v} = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P_{atmo} - P_v} \quad (1)$$

avec $M_{eau} = 18 \text{ g/mol}$ et $M_{air} = 29 \text{ g/mol}$ les masses molaires de l'eau et de l'air, respectivement.

1.2.2 Air saturé

Lorsqu'à une température donnée Θ , la pression partielle de vapeur est égale à la pression de vapeur saturante P_{vs} de l'eau, on dit qu'il y a saturation ou que l'air est saturé. Au-delà, il y a formation de brouillard si $\Theta > 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ou formation de givre (neige) si $\Theta < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.2.3 Degré hygrométrique ou humidité relative : ϕ

On définit l'hygrométrie relative ϕ par la relation :

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2)$$

avec :

- P_v la pression partielle de vapeur du mélange atmosphérique en (Pa) ;
- P_{vs} la pression de vapeur saturante à la température Θ .

On notera que ϕ représente un état par rapport à la saturation, donc c'est une fonction implicite de la température Θ . On peut relier ϕ avec l'humidité absolue r par la relation :

$$r = 0.622 \cdot \frac{P_v \cdot \phi}{P_{atmo} - \phi \cdot P_v} \quad (3)$$

Soit :

$$\phi = \frac{r \cdot P_{atmo}}{(r + 0.622) \cdot P_{vs}} \quad (4)$$

1.2.4 Températures

La connaissance de la température usuelle repérée avec un thermomètre ne suffit pas à caractériser l'état particulier de l'air humide. Il faut définir trois températures caractéristiques :

- la température sèche Θ : c'est celle qui est lue sur un thermomètre ordinaire agité dans l'air, à l'ombre et à l'abri de tout rayonnement thermique. On l'appelle aussi température sèche ou température de bulbe sec ;
- la température humide Θ_h : c'est celle que nous indique un thermomètre ordinaire dont le bulbe est recouvert de gaze saturée d'eau et placé dans un flux d'air suffisamment rapide ($v > 1 \text{ m/s}$) pour assurer une évaporation adiabatique de l'eau. Dans ces conditions, on constate une baisse de température sur le thermomètre, puis une fixation de celle-ci à une valeur Θ_h qui est fonction de la température sèche Θ et de la teneur en vapeur d'eau. On l'appelle aussi température de bulbe humide ;
- la température de rosée Θ_r : c'est celle à laquelle l'air humide refroidi lentement, à humidité absolue constante, arrive à saturation. A cette température un refroidissement de l'air, aussi faible soit il, provoque l'apparition de brouillard qui se dépose sous forme de rosée..

Ces différentes températures peuvent être lues sur le diagramme psychrométrique présenté en AN-NEXE.

1.2.5 L'enthalpie spécifique de l'air humide

L'enthalpie spécifique est supposée être zéro au point triple ($0,01^\circ\text{C}$ et $0,00611 \text{ bar}$), qui est considéré comme base de référence. L'enthalpie spécifique de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, notée h_v , est donnée par la formule de Rankine :

$$h_v = 2490 + 1.96 \cdot \Theta \quad (5)$$

où h_v est exprimée en kJ/kg_{vap} et Θ est la température sèche en $^\circ\text{C}$. L'expression de l'enthalpie spécifique de l'air sec, notée h_{as} et exprimée en kJ/kg_{as} , est donnée par :

$$h_{as} = Cp \cdot \Delta\Theta \quad (6)$$

où $Cp = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$ correspond à la chaleur spécifique de l'air et $\Delta\theta$ à la différence de température par rapport à la référence en $^\circ\text{C}$. Cette formule devient donc :

$$h_{as} = \Theta \quad (7)$$

où Θ est exprimée directement en $^\circ\text{C}$. Pour un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, l'enthalpie H du mélange a donc pour expression :

$$H = m_{as} \cdot h_{as} + m_v \cdot h_v = m_{as} \cdot \Theta + m_v \cdot (2490 + 1.96 \cdot \Theta) \quad (8)$$

c'est-à-dire :

$$H = m_{as} \cdot \left(\Theta + \frac{m_v}{m_{as}} \cdot (2490 + 1.96 \cdot \Theta) \right) = m_{as} \cdot (\Theta + r \cdot (2490 + 1.96 \cdot \Theta)) \quad (9)$$

avec H exprimée en kJ . En exprimant cette dernière relation par unité de masse d'air sec, on obtient :

$$h = \frac{H}{m_{as}} = \Theta + r \cdot (2490 + 1.96 \cdot \Theta) \quad (10)$$

où h est l'enthalpie spécifique de l'air humide donnée en kJ/kg_{as} .

1.2.6 Volume spécifique de l'air humide

En considérant la vapeur d'eau comme un gaz parfait, on montre que le volume spécifique de l'air humide s'exprime selon la relation suivante :

$$v = 462 \cdot (0.622 + r) \cdot \frac{\Theta}{P_{atmo}} \quad (11)$$

avec :

- v le volume spécifique de l'air humide en m^3/kg_{gas} ;
- Θ la température sèche en Kelvin ;
- P_{atmo} la pression atmosphérique en Pascal.

1.2.7 Mesure de l'hygrométrie

Les hygromètres sont des instruments pour mesurer la teneur en eau de l'atmosphère. Il existe de nombreux types d'hygromètres différents, mais notre tour de refroidissement utilise le type bien connu avec bulbes "sec" et "humide" pour lequel un grand nombre de données sont déjà disponibles. Dans cet hygromètre, le bulbe du thermomètre humide est enfermé dans une gaine en tissu mouillée par de l'eau. L'évaporation depuis cette gaine provoque un abaissement de la température indiquée par le thermomètre à bulbe humide, en dessous de celle indiquée par le thermomètre à bulbe sec. L'observation de ces températures, combinée avec les diagrammes, permet de déterminer l'humidité et d'autres propriétés de l'air.

En variante, la pression de la vapeur d'eau dans l'atmosphère peut être obtenue par substitution dans l'équation (due initialement à Regnault, August et Apjohn).

$$p_v = p_{vs} - 6.666 \cdot 10^{-4} \cdot p_{atmo} \cdot (\Theta - \Theta_h) \quad (12)$$

avec :

- p_v la pression partielle de l'eau dans l'air en $mbar$;
- p_{vs} la pression de saturation de la vapeur d'eau à la température du bulbe humide Θ_h en $mbar$;
- P_{atmo} la pression totale de l'air (pression atmosphérique : 1013,25 mbar) ;
- Θ la température sèche de l'air en $^{\circ}C$;
- Θ_h la température du bulbe humide en $^{\circ}C$.

2 Présentation du matériel expérimental

Un schéma de présentation du matériel proposé est présenté en Figure 2. Une photo avec légende est proposée en Figure 3.

2.1 Circuit d'eau

L'eau chaude est pompée depuis le réservoir de charge par la vanne de commande et le débitmètre d'eau, vers la tête de la colonne. Après mesure de sa température, l'eau est répartie uniformément sur les plaques supérieures du garnissage et à mesure qu'elle se disperse sur les plaques, une large et mince pellicule d'eau est ainsi exposée aux courants d'air. Pendant sa descente à travers le garnissage, l'eau se refroidit, essentiellement par suite de l'évaporation d'une faible partie du débit total. L'eau refroidie tombe des plaques inférieures du garnissage dans la cuve d'où elle coule, en passant sur un thermomètre, dans le réservoir de charge où elle est réchauffée avant recirculation. Par suite de l'évaporation, le niveau de l'eau dans le réservoir de charge tend à baisser. Ceci provoque l'ouverture de la vanne à pointeau, commandée par le flotteur, et fait passer de l'eau du réservoir d'eau d'appoint vers le réservoir de charge. Dans des conditions d'équilibre, le débit d'eau sortant du réservoir d'appoint est égal au débit d'évaporation, plus la perte par entraînement de gouttelettes dans l'air évacué.

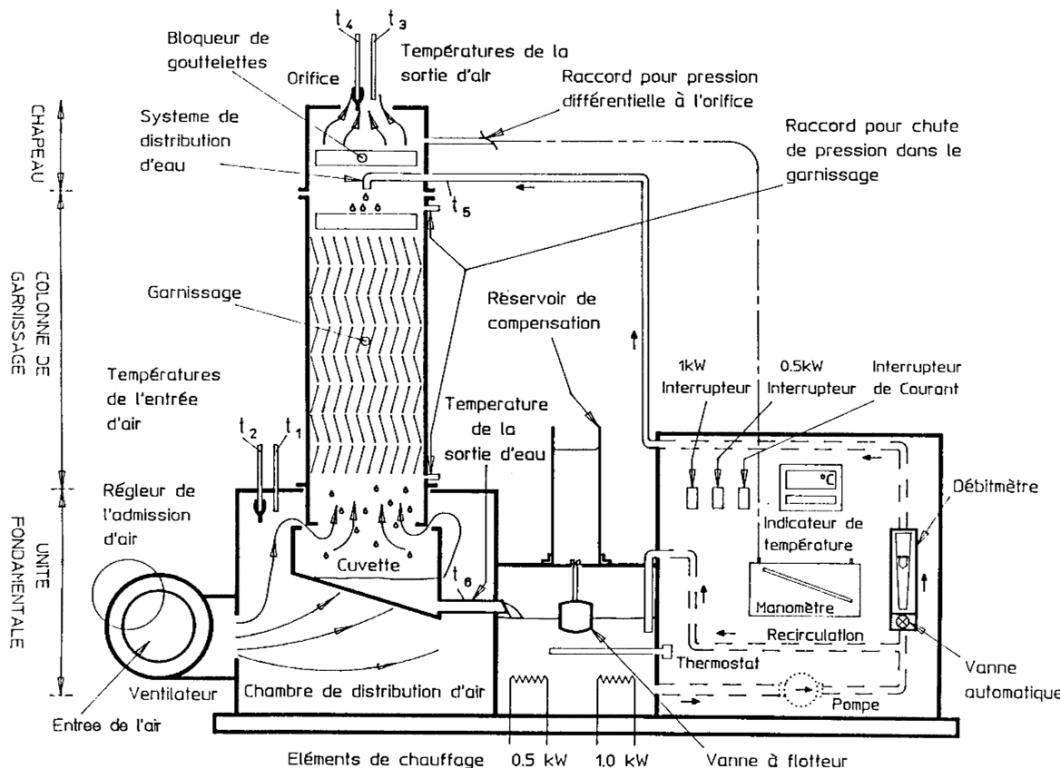


FIGURE 2 – Schéma du banc expérimental utilisé dans cette séance de travaux pratiques : l'air circulant dans la tour de bas en haut évapore une partie de l'eau circulant de haut en bas et refroidit ainsi le reste de celle-ci.

2.2 Circuit d'air

L'air atmosphérique pénètre dans le ventilateur à un débit qui est contrôlé manuellement par le réglage du registre d'entrée (par effet d'obstruction). L'air sortant du ventilateur passe dans la chambre de distribution et sur les thermomètres à bulbes sec et humide, avant de pénétrer dans la colonne garnie. Au cours de la montée de l'air à travers le garnissage, sa teneur en humidité augmente, tandis que l'eau se refroidit. Au moment de quitter la tête de la colonne, l'air passe par un capteur de gouttelettes qui retient la majeure partie des gouttelettes entraînées et les ramène au garnissage. L'air est ensuite évacué à l'atmosphère, par le diaphragme de mesure de débit d'air et en passant sur d'autres thermomètres à bulbes sec et humide. La température du bulbe humide utilisée dans les diagrammes psychrométriques et dans les tableaux, est celle indiquée par un thermomètre à bulbe humide, placé dans un courant d'air, ayant une vitesse de $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ ou plus. Lorsque l'humidité relative est élevée, l'erreur commise est faible même si le thermomètre est placé dans un courant d'air à plus faible vitesse. Néanmoins si l'humidité relative à mesurer est faible, une erreur appréciable peut en résulter. A la sortie de notre tour de refroidissement, les thermomètres sont placés dans de l'air ayant une humidité relative très élevée et où la vitesse de l'air est élevée. La température du bulbe humide indiquée est, par conséquent, très fiable. Le thermomètre à bulbe humide de la chambre à air se trouve dans une zone où la vitesse est plus faible et où l'humidité relative est moindre. Il convient donc de confirmer la lecture au bulbe humide, de la manière suivante :

- Détacher le presse étoupe fixant le thermomètre à bulbe humide du dessus de la chambre à air.
- Soulever le thermomètre, jusqu'à ce que l'air s'échappe entre la douille et la gaine. La vitesse de l'air sur la gaine est alors d'environ 10 m/s et la température humide sera vite indiquée par le thermomètre.
- Comparer la lecture de température humide avec la lecture précédente - la discordance éventuelle peut alors être prise en compte lors des observations ultérieures dans les mêmes conditions.

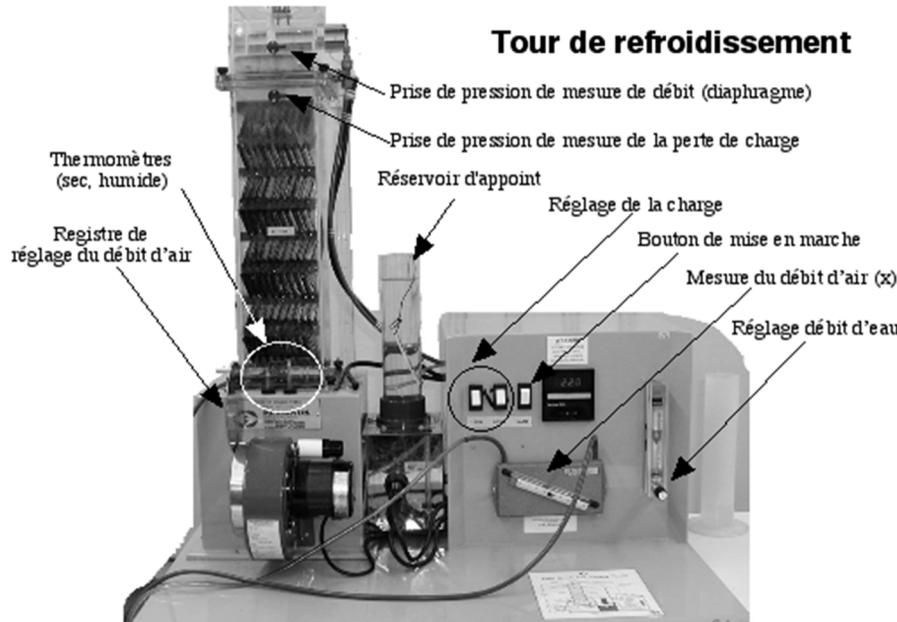


FIGURE 3 – Photographie légendée du banc expérimental

2.3 Procédure de mise en fonction

Le système étant rempli d'eau déminéralisée jusqu'au niveau de fonctionnement normal, le ventilateur est enclenché et le registre d'entrée est réglé de façon à obtenir le débit d'air désiré (indiqué par la pression différentielle du diaphragme). La pompe est enclenchée et le débit d'eau est réglé à la valeur désirée par la vanne située sur le débitmètre. Le mouillage du garnissage provoque la rétention d'une certaine quantité d'eau, si bien que le niveau dans le réservoir de charge diminue légèrement, ce qui provoque l'ouverture de la vanne à flotteur. L'eau sort alors du réservoir d'appoint, jusqu'à ce que le niveau soit rétabli. Le réservoir d'appoint doit être rempli de temps en temps.

Le réservoir ne doit en aucun cas être vide.

Si le niveau est correct on peut imposer une "charge de refroidissement", c'est-à-dire des éléments de chauffe dans le réservoir, dont la puissance s'échelonne de 0,5 kW à 1,5 kW.

2.4 Procédure de mise à l'arrêt

Pour arrêter le système, il faut :

1. Couper tous les éléments de chauffe ;
2. Après environ 2 minutes, couper toutes les alimentations de courant.

2.5 Informations utiles

Les informations techniques relatives à la mesure du débit d'air, aux sections de passage etc ... sont disponibles en annexe à la fin de ce document.

3 Bilans massiques et thermiques appliqués au système

Des bilans massiques et thermiques vous seront demandés dans plusieurs configurations. Avant d'effectuer ces bilans, il convient de définir le système à proprement parler. On peut définir plusieurs systèmes en fonction de l'instrumentation que l'on souhaite utiliser. Ainsi on peut définir :

- un système F dit fermé (*cf.* Figure 4-a) constitué par tout le châssis du banc expérimental ;

- un système O dit ouvert (*cf.* Figure 4-b) constitué par la tour seule.

Les bilans d'énergie et de masse doivent être effectués à l'aide des grandeurs directement mesurables sur la boucle : débits, températures. Le diagramme psychrométrique permettra d'obtenir des informations sur les grandeurs liées à l'air humide aux points A et B (notamment l'obtention de r et h). Bien entendu, toutes les grandeurs doivent être mesurées lorsque le système est en régime permanent. On peut s'en assurer en visualisant par exemple la température de l'eau à l'entrée de la tour.

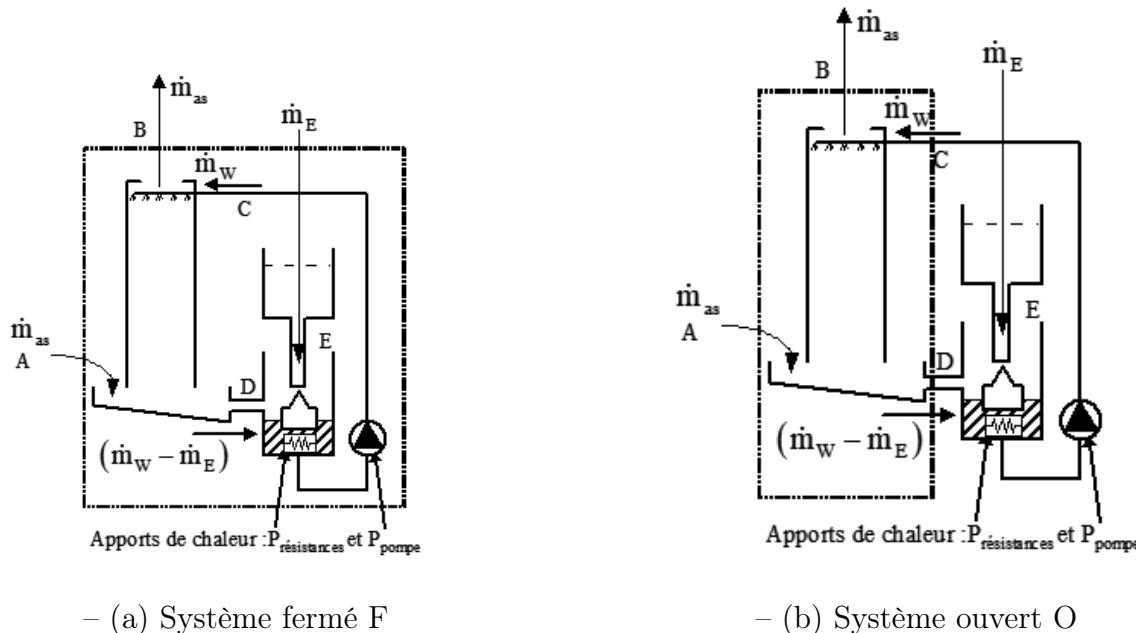


FIGURE 4 – Schématisation des entrées/sorties du système ouvert O et du système fermé F (pointillés)

3.1 Bilan de masse

Le débit massique d'air sec (\dot{m}_{as}) à travers une tour de refroidissement est une constante, tandis le débit massique d'air humide augmente par suite de l'évaporation d'une partie de l'eau. La conservation de la masse, en régime permanent, implique que le débit massique d'air sec et de l'eau (sous forme de liquide ou de vapeur) soit le même à l'entrée et à la sortie du système. Par conséquent on va chercher à relier les entrées/sorties en masse de l'eau sous forme liquide ou vapeur selon la formule :

$$\sum_{\text{entrées}} \dot{m}_{eau} = \sum_{\text{sorties}} \dot{m}_{eau} \quad (13)$$

L'humidité absolue r est connue pour les points de condition initiale (point A) et finale (point B) sur le diagramme psychrométrique dès la connaissance des températures sèches et humides. On peut donc définir un débit de vapeur d'eau selon la formule suivante : $(\dot{m}_v)_A = \dot{m}_{as} \cdot r_A$ et $(\dot{m}_v)_B = \dot{m}_{as} \cdot r_B$. Les débits de vapeur ainsi que \dot{m}_E seront à comparer dans un bilan de masse car chacune peut être mesurée indépendamment de l'autre.

3.1.1 Bilan d'énergie pour le système fermé (F)

Pour le système F représenté par la ligne pointillée (*cf.* Figure 4-a), la chaleur est transférée au niveau du réservoir de charge, c'est à dire la charge due à l'opération industrielle et éventuellement, dans une faible mesure, au milieu ambiant. Sur notre installation, les puissances apportées sont : la puissance thermique P_p transférée par la pompe et la puissance P_r des résistances chauffantes. Ces deux variables doivent être intégrées dans un bilan faisant intervenir les fluides entrant/sortant du système « F », à savoir : l'air à faible humidité (point d'entrée en A), l'air à humidité élevée (point de sortie en B) et l'eau liquide d'appoint (point d'entrée en E). Le bilan d'énergie dit du Système fermé

peut se résumer sous la forme d'une équation faisant intervenir le débit enthalpique et les puissances P_p et P_r dans une équation du type :

$$\sum_{entres} \dot{H} + \sum_{entres} P = \sum_{sorties} \dot{H} \quad (14)$$

Le débit enthalpique \dot{H} peut être défini comme le produit de l'enthalpie spécifique et du débit de fluide considéré \dot{m} soit : $\dot{H} = \dot{m} \cdot h$. Sa dimension est celle d'une puissance.

3.2 Bilan d'énergie pour le système ouvert (O)

Le système peut être redéfini comme indiqué à la Figure 4-b. Dans ce cas, la chaleur de la transformation et le travail de la pompe ne traversent pas la limite du système, mais il y a maintenant de l'eau chaude qui pénètre dans le système (au point C) et de l'eau refroidie qui le quitte (au point D). Si l'on applique le bilan d'énergie en régime permanent sur le système ouvert (pointillés) ouvert, on doit obtenir :

$$\sum_{entres} \dot{H} = \sum_{sorties} \dot{H} \quad (15)$$

Expérimentalement on peut constater une différence, essentiellement à cause des transferts de chaleur entre l'appareil et le milieu environnant. Cet essai permet de comparer la fiabilité de l'instrumentation sur l'air humide et celle sur l'eau et d'évaluer les pertes de chaleur par les parois de la tour.

4 Travail préliminaire

4.1 Propriétés de l'air humide

Sous une pression totale de 1,013 bar avec des températures au bulbe sec et au bulbe humide, respectivement de 20 °C et 14 °C, déterminer :

- l'enthalpie spécifique (relative à 0,01 °C) ;
- le volume spécifique ;
- la teneur en humidité de l'air.

On utilisera ici les lois définies par les équations du paragraphe 1 ainsi que la table thermodynamique de l'eau donnée en annexe à la fin de ce texte.

4.2 Diagramme psychrométrique

Les calculs effectués ci-dessus sont plutôt fastidieux, et il est généralement bien plus commode d'utiliser un diagramme psychrométrique pour la pression atmosphérique appropriée. Un diagramme est donné en ANNEXE, dont la première page présente un résumé des différentes variables que l'on peut en déduire. Si on utilise les données du paragraphe précédent, c'est-à-dire une température sèche de 20 °C, une température au bulbe humide de 14 °C, une pression totale égale à 1,013 bar, l'enthalpie spécifique, le volume spécifique et l'humidité absolue peuvent être obtenus facilement.

1. Retrouver et placer ce point sur le diagramme psychrométrique ;
2. Comparer à celles obtenues précédemment, les variables suivantes :
 - l'enthalpie spécifique ;
 - le volume spécifique ;
 - l'humidité relative de l'air.

5 Manipulations à effectuer

On se propose d'agir sur les différents paramètres pouvant influer sur les performances d'une tour de refroidissement. Nous examinerons successivement les points suivants :

1. Détermination des propriétés de l'air et de l'eau à partir des diagrammes et des tables afin d'établir les bilans d'énergie et de masse.
2. L'effet de la charge de refroidissement sur les conditions de sortie de l'eau
3. L'effet de la vitesse de l'air en entrée et influence sur la pression au sein de la tour.
4. Le rapport entre la charge de refroidissement et la gamme de refroidissement.

ATTENTION : Le manomètre de mesure (en mm de colonne d'eau) n'est peut-être pas à 0 lorsque le débit est nul, il faudra donc tenir compte de cette valeur à débit nul et interpréter le "Différentiel de pression" comme une différence et non pas une valeur absolue.

5.1 Diagrammes et tables - Bilans d'énergie et de masse

5.1.1 Détermination de l'apport de chaleur (P_p) de la pompe

Avant d'effectuer toutes ces manipulations il faut déterminer l'apport P_p d'énergie du circulateur intervenant dans le bilan du système fermé (*cf.* § 3.1.2). Pour cela mettre en route la tour avec les conditions suivantes :

- Différentiel de pression x : débit max ($\sim 16 \text{ mm}_{CE}$);
- Débit d'eau : 40 g.s^{-1} ;
- Pas de charge de refroidissement (0 kW).

Une fois le régime permanent atteint (environ une dizaine de minutes!), effectuer un relevé des paramètres expérimentaux permettant de déterminer P_p selon un bilan d'énergie du système fermé avec $P_r = 0$. Le débit massique d'air sec \dot{m}_{as} est déterminé à partir de la mesure de pression différentielle x et de l'équation d'étalonnage proposée en Annexe (Informations utiles). Le débit d'eau d'appoint \dot{m}_E est obtenu de la façon suivante. En régime permanent, il faut remplir le réservoir de réserve jusqu'au repère, au moyen d'eau déminéralisée. Après un certain temps mesuré à l'aide d'un chronomètre, il faut remplir à nouveau ce réservoir, à partir d'une quantité d'eau distillée connue, contenue dans une éprouvette graduée. Par différence, on peut déterminer le volume d'eau d'appoint qui a été fourni pendant un intervalle de temps déterminé ce qui conduit au calcul de \dot{m}_E . On peut également obtenir la puissance de la pompe à partir des mesures effectuées sur le circuit d'eau uniquement. Il faut pour cela 'mélanger' les bilans d'énergie obtenus avec les systèmes ouvert et fermé. Comparez ce calcul au résultat précédent. Conclusion ?

5.1.2 Bilans de masse et d'énergie

La tour de refroidissement doit être maintenant laissée en fonctionnement dans les conditions proposées suivantes :

- Différentiel de pression : débit max ($\sim 16 \text{ mm}_{CE}$)
- Débit d'eau : 40 g.s^{-1}
- Charge de refroidissement : 1.0 kW Au régime permanent effectuer un relevé sur une colonne du tableau de mesure pour cet essai.
- Placer sur le diagramme psychrométrique les points d'entrée et de sortie de la tour.
- Par rapport aux systèmes décrits au paragraphe 3, établir les bilans d'énergie relatifs aux systèmes ouvert et fermé en tenant compte maintenant de la charge de refroidissement.
- Appliquer ces bilans aux relevés expérimentaux et comparer les valeurs calculées à celles mesurées directement. Ici on utilisera les données de P_r (1000 W) et P_p . Conclusions.
- Effectuer le bilan massique sur l'eau et comparer la valeur obtenue de \dot{m}_E à la mesure directe.
- Conclusions

5.2 Effets de la Charge de Refroidissement sur les conditions de sortie

5.2.1 Essais

Dans cette partie, les paramètres à garder constants sont :

- Débit d'eau : 40 g.s^{-1}
- Différentiel de pression : débit max ($\sim 16 \text{ mm}_{CE}$)

L'objet de cette partie est de faire varier la charge de refroidissement. Dans la mesure où les essais avec une charge de refroidissement de 0 kW et 1 kW ont déjà été effectués, effectuer les essais avec les autres charges restantes disponibles sur l'appareil. Dans chaque cas, lorsque le régime permanent est atteint, on effectue un relevé complet de toutes les grandeurs.

5.2.2 Exploitation des mesures

- Placer les différents points sur le diagramme psychrométrique, commenter le déplacement des points.
- Tracer $(\theta_D - \theta_{ah})$ (ou encore $\theta_6 - \theta_2$) en fonction de la charge de refroidissement
- Peut-on refroidir l'eau à une température inférieure à celle de l'air à l'entrée de la tour ?
- Commentaires et conclusions. A partir de cette courbe, peut-on définir parfaitement les conditions de fonctionnement d'une tour de refroidissement, i.e. à partir d'une puissance à évacuer peut-on définir un point de fonctionnement lorsque Θ_2 est fixée par les conditions climatiques externes ?

5.3 Effet de la vitesse de l'air

5.3.1 Essais

Dans cette partie, les paramètres à garder constants sont :

- La charge de refroidissement de 1,0 kW ;
- le débit d'eau est de 40 g.s^{-1} .

L'objet de cette partie est de faire varier la vitesse du vent, c'est-à-dire la différence de pression au diaphragme. Pour cela, vous prendrez successivement les valeurs suivantes : $x = 12 \text{ mm}_{CE}$, $x = 8 \text{ mm}_{CE}$, $x = 4 \text{ mm}_{CE}$ (L'essai correspondant à $x = 16 \text{ mm}_{CE}$ a déjà été effectué à ce stade). A nouveau, effectuer des relevés de mesures en régime permanent dans chaque cas.

5.3.2 Exploitation des mesures

En prenant comme abscisse la vitesse de l'air dans la tour calculée à partir du débit massique et de la section de la tour (cf. Annexe/Informations utiles), on tracera sur un graphique à "double axe des ordonnées" les courbes :

- de perte de charge dans la colonne (en mm CE) ;
- de différence de température $(\theta_D - \theta_{ah})$ (ou encore $(\theta_6 - \theta_2)$).

Attention : étant donné le faible nombre de points (4) veillez à ne pas dilater les échelles de façon exagérée et à lisser vos courbes.

N.-B. : Pour mesurer la perte de charge à travers les garnissages, il est nécessaire de déconnecter temporairement le tube en plastique du point de prise de pression du diaphragme. Le tube doit être reconnecté au point de prise de pression situé juste en dessous du garnissage et un autre tube doit être connecté entre la prise droite du manomètre et le point de prise de pression située au-dessus des garnissages.

- Conclusions sur les limites d'utilisation d'une tour de refroidissement ;

- Conclusions sur une éventuelle optimisation entre les coûts de fonctionnement et d'équipement.
Y a-t-il un optimum ?
- A partir de cette courbe et de celle du §5.2, peut-on définir parfaitement les conditions de fonctionnement de la tour, i.e. quelle est la variable d'ajustement lorsque puissance (Pr) et température humide à l'entrée sont fixées ?

5.4 Rapport entre la charge de refroidissement et la gamme de refroidissement

Dans cette partie, aucun essai supplémentaire n'est demandé. Avec comme axe des abscisses la charge de refroidissement, on tracera sur un même graphique :

- La température de l'eau entrant (Θ_5), la température de l'eau quittant la tour (Θ_6) ;
- La température moyenne de l'eau $(\Theta_5 + \Theta_6)/2$
- La différence de température d'eau entrée - sortie $(\Theta_5 - \Theta_6)$;
- Conclusions sur l'évolution de la température moyenne, cette évolution était elle prévisible ?
- Conclusion générale sur l'utilisation industrielle d'une tour de refroidissement ;
- Qu'apporteraient des mesures à l'intérieur de la tour pour sa caractérisation ?

A Annexes

A.1 Présentation d'un tableau de mesure

- Ligne 1 : type de garnissage installé ;
- Ligne 2 : densité de garnissage (*cf.* notice technique ou colonne) ;
- Ligne 3 : Θ_1 température sèche de l'air à l'entrée en °C (Θ_A) ;
- Ligne 4 : Θ_2 température au bulbe humide de l'air à l'entrée en °C (Θ_{Ah}) ;
- Ligne 5 : Θ_3 température sèche de l'air à la sortie en °C (Θ_B) ;
- Ligne 6 : Θ_4 température au bulbe humide de l'air à la sortie en °C (Θ_{B_h}) ;
- Ligne 7 : Θ_5 température de l'eau à l'entrée en °C (Θ_C) ;
- Ligne 8 : Θ_6 température de l'eau à la sortie en °C (Θ_D) ;
- Ligne 9 : Θ_E température de l'eau d'appoint en °C (Θ_E) ;
- Ligne 10 : x différentiel de pression au diaphragme de sortie en mm_{CE} ;
- Ligne 11 : \dot{m}_W : débit d'eau en $g.s^{-1}$;
- Ligne 12 : puissance de refroidissement aux résistances électriques en kW ;
- Ligne 13 : quantité d'eau d'appoint en litres ;
- Ligne 14 : intervalle de temps en s pour la mesure de \dot{m}_E ;
- Ligne 15 : chute de pression à travers le garnissage en mm_{CE} ;

N.-B. : En fonction de l'essai demandé certains calculs ne sont pas nécessaires.

A.2 Nomenclature

Symboles	Quantité	Unité
c_p	Chaleur Spécifique ($\partial h / \partial \theta$)	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
h	Enthalpie Spécifique	$J.kg^{-1}$
H	Enthalpie = $m \cdot h$	J
\dot{H}	Enthalpie par unité de temps = $\dot{m} \cdot h$	W
m	Masse	kg
\dot{m}	Débit massique	$kg.s^{-1}$
M	Masse Molaire	$kg.mol^{-1}$
p	Pression	Pa ou mm_{CE}
P	Puissance thermique, électrique	W
R	Constante des gaz parfaits	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
Θ	Température (Celsius)	C
T	Température (Absolue)	K
v	Volume Spécifique	$m^3.kg^{-1}$
x	Différentiel de pression au diaphragme	mm_{H_2O}
r	Humidité Spécifique	$kg.kg_{as}^{-1}$
ϕ	Humidité Relative	%
Δ	Variation Finie	

Indices	Grandeur ou point	Mesures
A	Air à l'entrée à la base de la colonne	Θ_1 et Θ_2
B	Air à la sortie en tête de la colonne	Θ_3 et Θ_4
C	Eau à l'entrée en tête de la colonne	Θ_5
D	Eau à la sortie de la cuve	Θ_6
E	Eau dans le réservoir d'appoint	Θ_E
sans suffixe	Bulbe sec	
h	Bulbe humide	
v et vs	Vapeur d'eau et vapeur d'eau à saturation	
as	Air sec	
t	Total	

A.3 Tables thermodynamiques de l'eau : liquide et vapeur saturés (extrait)

T (K)	P (kPa)	v_l (m^3/kg)	v_g (m^3/kg)	h_l (kJ/kg))	L_v (kJ/kg)	v_g (kJ/kg)	s_l (kJ/(kg.K))	s_g (kJ/(kg.K))
273.16	0.6113	0.001	206.1	0	2500.9	2500.9	0	9.1555
275	0.698	0.001	181.7	7.5	2496.8	2504.3	0.0274	9.1066
280	0.9912	0.001	130.3	28.1	2485.4	2513.5	0.1015	8.978
285	1.388	0.001001	94.67	48.8	2473.9	2522.7	0.1749	8.8552
290	1.919	0.001001	69.67	69.7	2462.2	2531.9	0.2475	8.7378
295	2.62	0.001002	51.9	90.7	2450.3	2541	0.3193	8.6254
300	3.536	0.001004	39.1	111.7	2438.4	2550.1	0.39	8.5179
305	4.718	0.001005	29.78	132.8	2426.3	2559.1	0.4598	8.4149
310	6.23	0.001007	22.91	153.9	2414.3	2568.2	0.5285	8.3163
315	8.143	0.001009	17.8	175.1	2402	2577.1	0.5961	8.2216
320	10.54	0.001011	13.96	196.2	2389.8	2586	0.6626	8.1308
325	13.53	0.001013	11.04	217.3	2377.6	2594.9	0.728	8.0436
330	17.21	0.001015	8.809	238.4	2365.3	2603.7	0.7924	7.9599
335	21.71	0.001018	7.083	259.4	2353	2612.4	0.8557	7.8793
340	27.18	0.001021	5.737	280.5	2340.5	2621	0.918	7.8018
345	33.77	0.001024	4.68	301.5	2328	2629.5	0.9793	7.7272
350	41.66	0.001027	3.844	322.5	2315.4	2637.9	1.0397	7.6553
355	51.05	0.00103	3.178	343.4	2302.9	2646.3	1.0991	7.586
360	62.15	0.001034	2.643	364.4	2290.1	2654.5	1.1577	7.5192
365	75.21	0.001037	2.211	385.3	2277.3	2662.6	1.2155	7.4546
370	90.47	0.001041	1.86	406.3	2264.3	2670.6	1.2725	7.3923
375	108.2	0.001045	1.573	427.3	2251.2	2678.5	1.3288	7.332
380	128.8	0.001049	1.337	448.3	2237.9	2686.2	1.3843	7.2737

A.4 Autres informations utiles

- Constante de diaphragme pour la mesure du débit d'air. Le débit massique d'air sec est donné par la formule ($K = 0.0137 \text{ SI}$) :

$$\dot{m}_{as} = K \cdot \sqrt{\frac{x}{(1 + r_b) \cdot v_{aB}}} \quad (16)$$

et :

$$\dot{q}_{vB} = \dot{m}_{as} \cdot v_{aB} \quad (17)$$

soit si on néglige r_B devant 1 :

$$\dot{m}_{as} = K \cdot \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{v_{aB}}} \quad (18)$$

et :

$$\dot{q}_{vB} = K \cdot \sqrt{x} \cdot \sqrt{v_{aB}} \quad (19)$$

avec :

- \dot{m} le débit massique d'air sec (kg.s^{-1}), q_{vB} le débit volumique d'air sec ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) ;
- x la différence de pression (mm CE) au diaphragme ;
- v_{aB} le volume spécifique de l'air sec quittant le sommet de la colonne ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$) ;
- r_B la teneur en humidité de l'air sec quittant la colonne (kg.kg_{as}^{-1})

- Puissance transférée à l'eau par la pompe de l'ordre de 100 W (à vérifier lors du premier essai)
- Dimensions de la colonne : 150 mm x 150 mm x 600 mm de hauteur ;
- Caractéristiques des garnissages

Colonne	B
Nombre de plaques par couche rangée	10
Surface totale du garnissage (m^2)	1,19
Hauteur de garnissage (m)	0,48
Densité de garnissage surface/volume (m^{-1})	110

5. Constantes

- Chaleur spécifique de l'eau (c_p) : $4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$
- Chaleur spécifique de l'air (c_{pas}) : $1,005 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$
- Pour l'air, $M = 9 \text{ g.mol}^{-1}$ Pour la vapeur (H_2O), $M = 18 \text{ g.mol}^{-1}$
- Constante des gaz parfaits : $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1}.K^{-1}$
- Température de référence pour le calcul des enthalpies : $\Theta_0 = 0,01 \text{ C}$

A.5 Diagramme psychrométrique

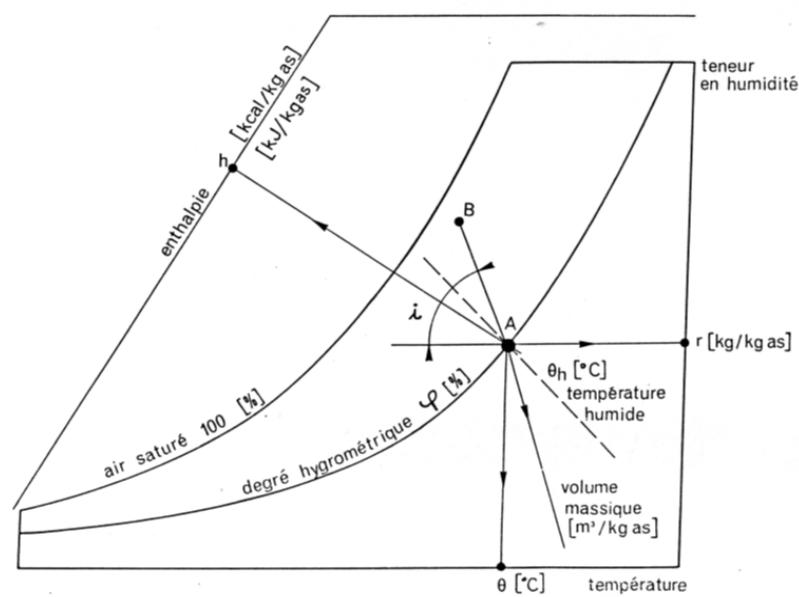
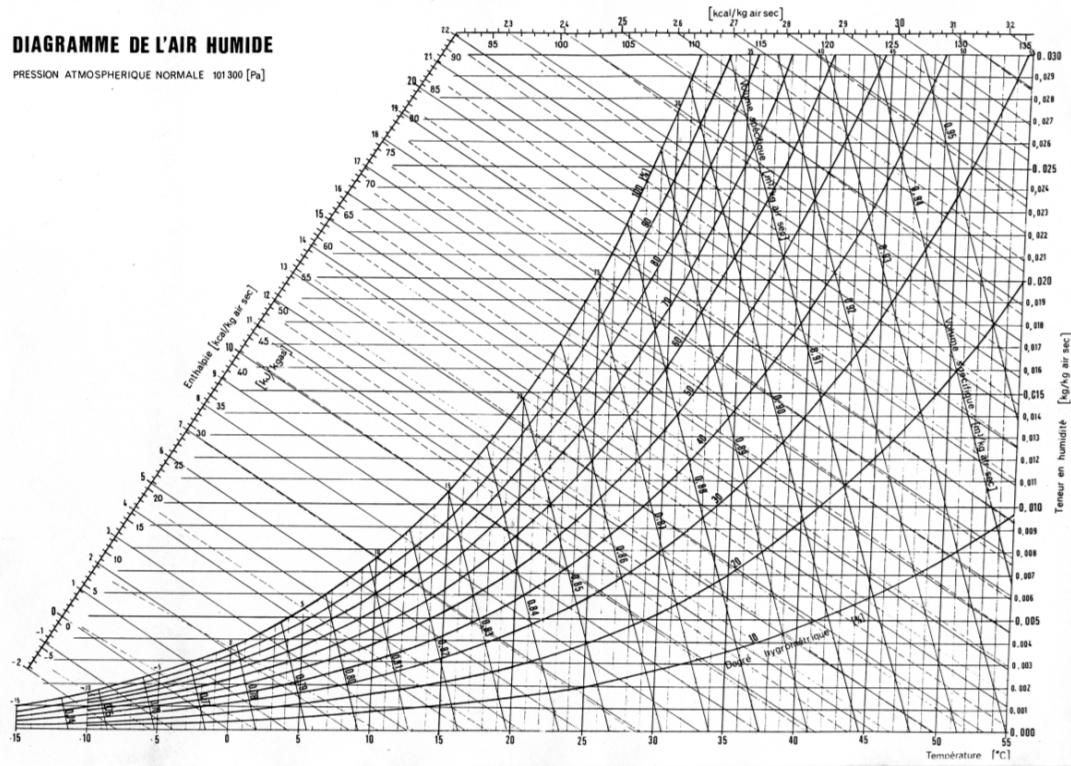


DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

PRESSION ATMOSPHERIQUE NORMALE 101300 [Pa]



Moteur Stirling

1 Objectif de la manipulation

L'objectif de cette manipulation est d'étudier le cycle de Stirling dans les différentes configurations suivantes, soit en moteur thermique « à combustion externe », soit en machine frigorifique ou en pompe à chaleur. L'appareillage dont on dispose, permet tout d'abord de visualiser les courbes $P = f(V, T)$ et de déterminer les rendements des cycles pour les différents modes de fonctionnement.

2 Dispositif expérimental

Le moteur à air chaud qui constitue notre dispositif de travail en TP, cf. Figure 1, est une simulation optimisée du moteur à air chaud de Stirling ; il est constitué d'un cylindre en verre très résistant à l'intérieur duquel se déplacent deux pistons, cf. Figure 2-a. Ce cylindre est entouré par un autre cylindre. Entre les deux, s'effectue une circulation d'eau (c'est la source froide pour le moteur thermique et la pompe à chaleur, et la source chaude pour la machine frigorifique). Dans la partie supérieure du cylindre on peut fixer soit une résistance chauffante (fonctionnement en moteur thermique), soit un thermocouple (ou éprouvette contenant de l'eau) pour les deux autres fonctionnements.

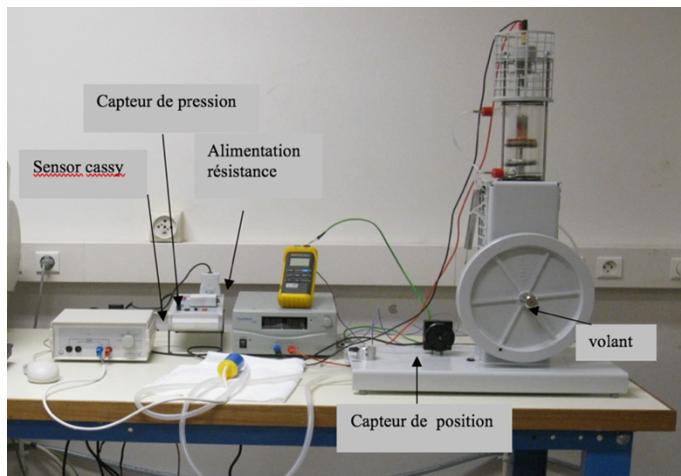
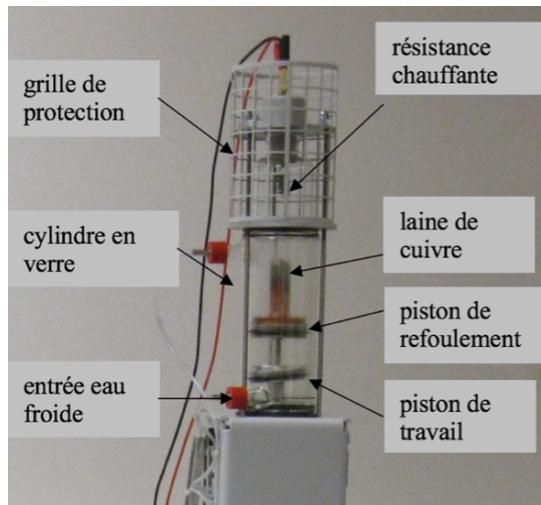


FIGURE 1 – Banc du moteur Stirling et Schéma Pistons-volant

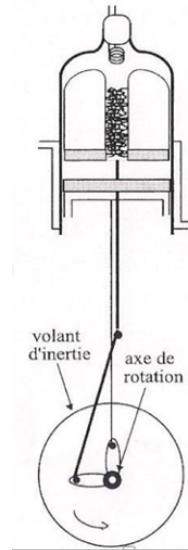
2.1 Les pistons

Toute l'ingéniosité du système repose sur le déphasage de $\pi/2$ de 2 pistons :

- **Le piston de refoulement** (piston supérieur) possède une cavité axiale remplie de laine de cuivre (cela permet l'amélioration du rendement). Dans sa partie inférieure, il possède une plaque de métal, munie de fentes radiales qui laissent passer le gaz de la partie inférieure à la partie supérieure et inversement. Son rôle est donc de forcer le gaz à passer d'un côté à l'autre.
- **Le piston de travail (ou piston moteur)** (piston inférieur), en métal, isole le volume du cylindre de l'extérieur, et permet de fournir ou de prélever du travail.



– (a) Composants du moteur Stirling



– (b) Composants du moteur Stirling

FIGURE 2 – Schématisation des entrées/sorties du système ouvert O et du système fermé F (pointillés)

Les deux tiges des pistons (Figure 2-b) se terminent par deux coussinets montés excentriquement sur un volant (de 25 cm de diamètre environ). Ce volant doit assurer une marche uniforme de la machine. Par l'intermédiaire de ce volant, on peut entraîner les pistons par un moteur auxiliaire pour le fonctionnement en pompe à chaleur ou en machine frigorifique.

2.2 Les capteurs

Deux capteurs, un de pression et un de déplacement, permettent de fournir les informations (respectivement P_{B1} et s_{A1}) à une carte d'acquisition - par l'intermédiaire du module (Sensor-Cassy)-couplée à un logiciel (Cassy-Lab2) et d'obtenir ainsi le diagramme de Clapeyron (P , V) l'ordinateur.

3 Rappel de thermodynamique sur le fonctionnement d'une machine thermique

Une machine thermique est un dispositif permettant au milieu extérieur d'agir sur un gaz qui décrit un cycle. La machine thermique la plus simple fonctionne entre deux réservoirs de chaleur à des températures différentes. Pendant un cycle, le système subit une suite de transformations qui le ramène à son état initial. L'énergie interne étant une fonction d'état, sa variation est nulle au cours d'un cycle et par le premier principe, on a : $Q = -W$.

La chaleur échangée est donc égale au travail échangé, qui s'obtient en mesurant l'aire limitée par l'intérieur du cycle dans un diagramme de Clapeyron. Si le cycle est effectué dans le sens des aiguilles d'une montre, le système fournit du travail à l'extérieur et reçoit de la chaleur et la machine thermique fonctionne comme un moteur. Inversement, si le cycle est effectué dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, le système reçoit du travail et l'utilise pour faire passer la chaleur du réservoir de chaleur à basse température au réservoir de chaleur à haute température. On parle alors de machine frigorifique ou de pompe à chaleur.

On peut résumer les trois fonctionnements précédents par les schémas de la Figure 3. Par convention, on prendra positif ce qui est fourni au système et négatif ce qui est cédé à l'extérieur.

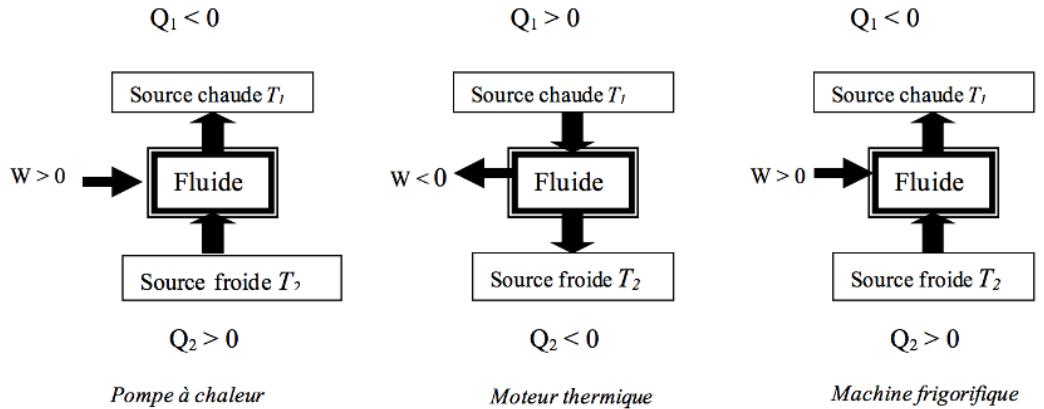


FIGURE 3 – Description des 3 fonctionnements décrits précédemment

4 Le cycle de Carnot

En pratique, quand on parle de moteur cyclique ditherme, on pense plutôt instantanément à celui de Carnot constitué de deux isothermes et de deux adiabatiques. Or ces transformations sont des cas limites, irréalisables en pratique. Le cycle de Carnot représente donc le cycle d'une machine thermique théorique idéale, cyclique, réversible, fonctionnant avec deux sources thermiques, dont le rendement serait maximal et égal à :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

T_2 étant la température de la source froide et T_1 la température de la source chaude.

5 Le cycle de Stirling

5.1 Description du cycle de Stirling

Le dispositif utilisé dans cette manipulation fonctionne suivant le cycle thermodynamique de Stirling, cf. Figure 4. Ce cycle est la suite des évolutions d'un gaz parfait entre 2 sources de chaleur de températures constantes et uniformes T_1 et T_2 séparées par un échangeur parfait qui travaille en isochore. Il comporte 2 isothermes et 2 isochores. Nous admettrons, pour la compréhension du fonctionnement, que les parties supérieure et inférieure du cylindre sont en contact thermique avec deux réservoirs de chaleur de capacité calorifique infinie, à des températures T_1 et T_2 , respectivement. Le cycle peut se décomposer en 4 phases :

- **Phase 1 :** tout le gaz se trouve quasiment dans la zone froide, à température T_2 . Le piston de travail le comprime à cette température (contact thermique avec le réservoir froid) jusqu'au volume V_2 minimum. Comme c'est une compression isotherme, le gaz cède la chaleur Q_2 au réservoir froid. Le travail à fournir est inférieur au travail récupéré lors de la phase 3, car la température du gaz est plus faible. Ce travail est fourni par l'inertie de la roue couplée au moteur. Sans cette roue (volant) on ne disposerait pas d'énergie mécanique pour assurer cette compression et le moteur ne pourrait fonctionner.
- **Phase 2 :** le volume total occupé par le gaz est V_2 (minimum). Le gaz est transféré, sous l'effet du piston de refoulement, de la zone où il règne la température T_2 à la zone chaude à T_1 en traversant la laine de cuivre. Le volume ne change pas, le processus est isochore.
- **Phase 3 :** tout le gaz se trouve quasiment dans la zone chaude, où il reçoit la chaleur Q_1 , ce qui provoque sa détente à l'isotherme T_1 . Au cours de ce processus les deux pistons sont poussés vers le bas, et l'on récupère un travail dit « moteur » W_r plus grand que W_f . La différence entre les deux sert à la phase 1 et pour faire tourner la machine. Le volume final total occupé par le gaz est le volume maximum V_1 .

- **Phase 4 :** le volume total occupé par le gaz est égal à $V_{max} = V_1$. Le piston de refoulement constraint le gaz à se déplacer dans la partie inférieure du cylindre en cédant de la chaleur Q_c au régénérateur (laine de cuivre). Ce qui évite une surchauffe du circuit de refroidissement de la partie froide. La température du gaz s'abaisse donc à la température froide T_2 , c'est un refroidissement isochore. Les calories cédées au régénérateur Q_r (échangeur-accumulateur de calories) durant cette phase, seront restituées lors de la phase 2, quand le gaz est renvoyé dans la zone chaude. Dans le cas idéal, cette phase ne consomme pas de travail mécanique, puisqu'il n'y a pas de variation de volume (ou encore : l'inertie du gaz étant très faible, le travail à fournir pour le pousser d'un côté à l'autre est négligeable).

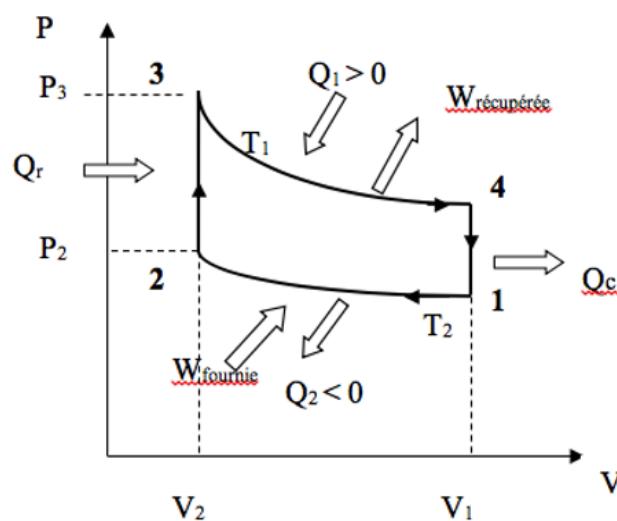


FIGURE 4 – Cycle de Stirling

5.2 Cycle de Stirling : machine thermique

Le rendement du cycle thermodynamique théorique de Stirling est égal au rendement thermodynamique théorique de Carnot, aux mêmes températures de fonctionnement. Ces deux rendements sont indépendants de la masse et de la nature physico-chimique du système évoluant. Par contre, si on compare le rendement du cycle de Carnot par rapport à celui du cycle de Stirling réel, le premier est plus favorable car, dans le cas du cycle de Stirling, il faut apporter de la chaleur au gaz pendant l'échauffement isochore. Cette chaleur sera dégagée sans travail au cours du refroidissement isochore. Le cycle de Stirling est donc tributaire comme une infinité de cycles de l'existence d'un parfait échangeur de chaleur. Seul le cycle de Carnot échappe à cette contrainte. Afin d'améliorer le rendement, dans la pratique, on s'arrange pour récupérer la chaleur produite au cours du refroidissement isochore pour s'en servir pour l'échauffement isochore. C'est pourquoi, dans le moteur utilisé, le gaz passe à travers un générateur de chaleur en laine de cuivre. Il est à noter que dans les installations industrielles, on peut atteindre avec un moteur de ce type, le rendement d'un moteur fonctionnant suivant le cycle de Carnot.

5.3 Cycle de Stirling : pompe à chaleur et machine frigorifique

Ce cycle thermodynamique est un cycle de Stirling inverse. La machine frigorifique extrait une quantité de chaleur Q_2 de la source froide en recevant un travail W alors que la pompe à chaleur extrait la quantité de chaleur Q_2 de la source froide et cède une quantité de chaleur Q_1 à la source chaude en recevant un travail W .

6 Tracé du diagramme de Clapeyron (P,V). Calcul de l'aire du cycle

Le tracé du cycle nécessite d'étalonner les deux capteurs de pression et de déplacement. Ceci se fait à l'aide du logiciel CASSY LAB2. [Cette opération un peu délicate s'effectuera en présence de l'enseignant.]

6.1 Étalonnage du volume, de la pression, tracé du cycle et calcul de l'aire du cycle

Pour l'étalonnage du volume et de la pression, suivre les informations disponibles en annexe, de même que pour le tracé du cycle et le calcul de l'aire.

7 Manipulations

7.1 Fonctionnement en moteur thermique

Dans ce fonctionnement, l'air contenu dans la partie supérieure du cylindre est chauffé par la résistance chauffante et se trouve donc porté à une température élevée. Il se détend alors (à température constante). Le piston moteur est poussé vers le bas et le gaz passe dans la partie inférieure. Ceci correspond au seul « temps moteur ». On récupère ainsi un travail au niveau du volant. Au cours de ce fonctionnement comme dans celui de la machine frigorifique ou pompe à chaleur, des pertes par frottement vont intervenir. Ces pertes proviennent soit du frottement du piston dans le cylindre soit dans les paliers. Seuls les frottements du piston peuvent être déterminés quantitativement étant donné qu'ils occasionnent un réchauffement de l'eau de refroidissement.

7.1.1 Mise en route du moteur pour le fonctionnement en "moteur thermique"

Recommandations importantes : Ne jamais faire fonctionner le moteur sans circulation d'eau et couper l'alimentation électrique si le moteur s'arrête de tourner.

Procédure de mise en route (en présence de l'enseignant) :

- Mettre l'eau en ouvrant la vanne rouge située sur le mur ;
- Régler le débit à 100 CCM environ ($1CCM = 1cm^3.mn^{-1}$) ;
- Mettre sous tension le boîtier d'alimentation de la résistance chauffante. Pour le démarrage se mettre aux environs de 11 V ;
- Dès que la résistance chauffante se met à rougir, attendre environ une minute et lancer vigoureusement le moteur en faisant tourner le volant dans le sens horaire, lâcher. Si l'air est suffisamment chaud, alors la détente va se produire et le moteur démarrer. S'il ne démarre pas, recommencer l'opération.

7.1.2 Mesures : suivre les indications données en annexe

a) *Moteur non freiné*

Faire varier la tension de 9 à 15 V par pas de 2V. Entre deux mesures, attendre impérativement au moins 5 mn, pour que la vitesse du moteur soit bien stabilisée. Relever toutes les données disponibles qui permettront de :

- tracer le cycle dans le diagramme de Clapeyron (ceci se fera sur l'ordi par le logiciel Cassy Lab)
- calculer les diverses pertes
- calculer le rendement de la machine. Comparer avec le rendement de Carnot.

Remarques : pour la tension 13 V (uniquement), enregistrer les données PV et P sur un tableau Excel. Elles seront utilisées pour diverses questions ultérieures.

b) **Moteur freiné**

Pour une valeur de la tension choisie, effectuer trois freinages à l'aide du dispositif adéquat. Relever toutes les données nécessaires, judicieuses à l'étude de ce fonctionnement.

Lorsque toutes les mesures sont terminées, ramener la tension à 0 et couper l'alimentation. Le moteur s'arrête. Attendre quelques minutes que le haut du cylindre soit suffisamment refroidi pour couper la circulation d'eau.

7.1.3 Exploitation des mesures

A partir des données obtenues, exploiter au mieux les différents fonctionnements.

Autres questions complémentaires :

- A partir de l'allure théorique du diagramme de Clapeyron, donner l'allure du diagramme d'Amagat : $PV = f(P)$. Montrer comment l'on peut en déduire les deux températures T_{min} et T_{max} .
- A partir des conditions atmosphériques et en supposant l'air comme un gaz parfait, calculer le nombre de moles enfermées dans le moteur.
- A partir des données obtenues pour la tension 13 V, essayer de calculer les deux températures précédentes.
- Calculer le rendement théorique de Carnot.

7.2 Fonctionnement en machine frigorifique et en pompe à chaleur

Pendant le déplacement du piston de travail, l'air subit une transformation isotherme en échangeant de la chaleur avec l'eau de circulation. Pendant le déplacement du piston de refoulement, l'air subit une transformation isochore, la laine de cuivre servant à absorber ou à céder de la chaleur. Le travail extérieur W est fourni par le moteur auxiliaire. Suivant qu'il tourne dans un sens ou dans l'autre les processus dans les volumes supérieur et inférieur sont inversés. Si le moteur tourne dans le sens horaire on aura affaire à une machine frigorifique. Si le moteur tourne dans le sens trigonométrique on aura affaire à une pompe à chaleur. C'est-à-dire que si on place un thermocouple en partie haute du cylindre, il détectera soit une chute de température (machine frigo), soit une élévation (pompe à chaleur). Il est ainsi possible de refroidir bien en dessous de 0 °C ou de réchauffer bien au-delà de 100°C. Suite à d'importants incidents (fissure du cylindre en verre), on ne peut désormais faire fonctionner le moteur Stirling ni en pompe à chaleur, ni en machine frigorifique. Cependant, en travail préparatoire, et d'après les explications données dans le texte TP, il est demandé de déterminer l'efficacité ou le coefficient de performance COP dans les deux fonctionnements. Pour cela, il faudra bien voir où et vers quoi est transférée la chaleur et exprimer l'expression du travail mécanique à mettre en œuvre par cycle pour transférer la chaleur du réservoir froid vers le plus chaud. Donner la puissance mécanique correspondante. (On tiendra compte de la convention de signe, voir la section 3. Dans le cas de la machine frigo, réfléchir au dispositif expérimental qui permettrait de connaître la puissance « froide » produite ?

8 Travail à réaliser avant d'arriver en séance

1. Exprimer le volume V en fonction du déplacement sB_1 du piston de travail. A partir de la représentation du cycle, Fig. 5, écrire pour chaque transformation, l'expression du travail et de la chaleur fournis ou reçus par le système. Donner la somme des travaux et des quantités de chaleur sur le cycle. Donner l'expression du rendement.
2. Dans le cas où le moteur Stirling possède un régénérateur qui récupère la chaleur et la retransmet au fluide froid (rôle de la laine de cuivre dans ce dispositif) et en supposant que cela soit fait de manière idéale, de sorte que Q_{total} soit égale à Q_{34} , montrer que l'on obtient alors un rendement équivalent à celui de Carnot. Conclusion.
3. Sachant que le diamètre intérieur du cylindre de travail est de 60 mm, calculer la section du piston de travail. Donner l'expression de V que l'on rentrera dans le logiciel CASSY-LAB2.
4. Vérifier, à l'aide des équations aux dimensions que le produit pV est équivalent à un travail.
5. Exprimer le travail fourni par un tour de moteur. Le logiciel l'affiche en $hPa.cm^3$. Donner le en Nm.
6. Déduire du travail, la puissance fournie par le moteur.
7. Ecrire le bilan énergétique par cycle, à partir de la figure 5.
8. Donner l'expression littérale du rendement η dans le cas du fonctionnement en moteur thermique et montrer qu'il est toujours inférieur à 1. Donner l'expression du rendement de Carnot.
9. Répondre aux questions de la section 7.2
10. Chercher les utilisations actuelles du moteur Stirling.

A Annexes : Procédure à suivre pour la manipulation

A.1 Étalonnage du volume

a) A partir de la fenêtre « Modules CASSY », activer les canaux correspondants aux voies d'acquisition : position sB_1 et pression pA_1 . Au cours de l'activation, les points noirs se mettent en rouge et bleu, et les fenêtres correspondantes apparaissent sur l'écran. L'activation de la voie « position » donne l'angle α_{B1} , or ce qui nous intéresse ici est le déplacement sB_1 , il est donc possible de l'obtenir en l'activant dans la fenêtre « paramétrages » située à droite de l'écran. Toutefois les canaux activés inutiles doivent être désactivés dans la fenêtre « paramétrages ».

b) A partir du déplacement sB_1 , il est possible d'obtenir le volume puisqu'une relation simple les relie. Une nouvelle grandeur à rentrer est donc le volume V : Fenêtre « paramétrages » → Calculatrice → Formule → Nouveau → Nouvelle Grandeur « Volume », symbole V, unité cm^3 , de 0 à 200 cm^3 (valeurs min et max du volume occupé par le gaz à l'intérieur du cylindre). Pour calculer V : rentrer la formule que vous aurez obtenue au cours de la préparation du TP !

Pour faire apparaître la fenêtre correspondante, cliquer sur la barre des menus en haut de l'écran sur l'icône V^* . Faire tourner le volant du moteur. Quand le piston de travail est au point mort haut, le volume affiché doit être environ 50 cm^3 . Si ce n'est pas le cas, régler la position du capteur de déplacement (potentiomètre correspondant) en tirant un peu sur le fil maintenant le ressort. Vérifier que le volume max est d'environ 185 $cm^3 < 200 cm^3$. A ce V_{max} doit correspondre un déplacement sB_1 de l'ordre de ~6cm. Si $V < 0$, aller dans la fenêtre « paramétrages » à « déplacement » et cliquer sur la fenêtre suivante : $s < - - - > -s$. Le déplacement doit toujours être > 0 .

c) Rentrer la durée de l'acquisition (commencer avec 0,25 s) et le temps entre deux acquisitions soit 2 ms. Le nombre de points relevés s'affiche automatiquement ! Si le temps choisi est trop petit, c'est-à-dire que le cycle ne peut pas être tracé complètement, alors augmenter ce temps.

A.2 Étalonnage de la pression

Vérifier que la voie correspondant à la pression est bien activée dans la fenêtre « paramétrages ». La fenêtre correspondante doit être ouverte sur l'écran de même la boîte de dialogue. Pour travailler en pression absolue il est impératif d'effectuer une correction de l'offset. Il sera pris égal à 1 bar. Utiliser la touche « Correction », « Corriger l'offset ». Faire de même avec le facteur qui doit être -1. La plage de mesure du capteur de pression doit être +/-2000 hPa. Vérifier qu'au point mort haut, la pression est max et atteint environ 1600 hPa.

A.3 Tracé du cycle

Fermer la fenêtre « Modules CASSY » afin de visualiser le graphe qui se trouve en dessous. Dans la barre des menus, sous « standard » cliquer droit sur t/s (temps en seconde), puis : → changer l'assignation des colonnes : sur la fenêtre « courbe » mettre V en x et pA1 en y. Pour changer la valeur d'origine de l'axe des ordonnées et l'imposer à 0, cliquer droit dessus. Pour obtenir le tracé du cycle, déclencher l'acquisition en cliquant sur la montre située sur la barre des menus.

A.4 Aire du cycle

L'aire s'obtient directement après avoir cliqué droit sur le graphique puis :

→ Calcul de l'intégrale → surface de crête

Ensuite, amener le curseur sur le sommet du graphe et cliquer gauche pour faire apparaître un point que l'on déplacera sur le contour du cycle de façon à ce que celui-ci se colorie. La valeur de l'aire en $hPa.cm^3$ s'affiche alors en bas de l'écran à gauche. Il n'est pas nécessaire de faire un enregistrement des données à chaque manipulation. Relever simplement la valeur de l'aire correspondante.

Pour relancer une nouvelle acquisition cliquer de nouveau sur la montre.

POMPE À CHALEUR MÉCANIQUE

1 Introduction

Il s'agit d'étudier un cycle frigorifique obtenu sur une pompe à chaleur mécanique fonctionnant avec le fluide frigorigène R134a. Les cycles thermodynamiques théoriques seront tracés à partir de mesures de température et de pression sur l'installation. L'influence d'un échangeur de chaleur sur la quantité de froid produite dans l'évaporateur sera également étudiée. On comparera entre eux les différents régimes de fonctionnement de l'unité expérimentale de réfrigération : température de condensation fixée et température d'évaporation fixée. Le but est ici de relier l'évolution des puissances thermiques à l'évaporateur et condenseur, et mécaniques/électriques au compresseur en fonction de la température d'évaporation ou de condensation. Les notations et appellations utilisées dans ce texte correspondent entre autres au cours de thermodynamique.

2 Rappels théoriques

2.1 Aspects thermodynamiques

La seconde loi de la thermodynamique implique qu' « *il est impossible de faire un transfert de chaleur d'une zone à basse température vers une autre, à plus haute température, sans avoir recours à un agent externe* ». Les réfrigérateurs et les pompes à chaleur sont des exemples de machines à transfert de chaleur d'une zone à basse température vers une autre à haute température, « *l'agent externe* » utilisé étant soit du travail, soit de la chaleur de haute qualité. La première loi de la thermodynamique établit que, dans un cycle, le transfert de chaleur net est égal au transfert de travail net. Dans le cas d'un réfrigérateur (ou d'une pompe à chaleur), qui utilise un apport de travail (i.e le cycle de compression de vapeur), on établit que :

Apport de chaleur à basse température + apport de travail = Rejet de chaleur à haute température

2.2 Cycles thermodynamiques

2.2.1 Cycle idéal

Le cycle idéal du R134a est représenté Figure 1 sur un diagramme (P, h) à l'aide des notations empruntées à notre manipulation (cf. Figure 6). Dans un premier temps, le fluide frigorigène en phase vapeur est aspiré à la sortie de l'évaporateur puis passe dans le compresseur où il subit une compression adiabatique réversible ($\delta Q = 0$ et $\Delta S = 0$). Sa pression augmente ainsi que son enthalpie, si la transformation est réversible elle s'effectue à entropie spécifique constante ($s = \text{cste}$). Dans la pratique c'est rarement le cas évidemment.

Il passe ensuite dans le condenseur (circuit HP) où il subit un refroidissement à pression constante ($P_{\text{condenseur}}$). Dans la zone de mélange liquide+vapeur on a une zone isotherme suivie d'un sous refroidissement par rapport à la saturation. Le sous refroidissement s'effectue en phase liquide et représente la différence de température entre la sortie du condenseur et la température de saturation à la pression sortie compresseur.

Le fluide frigorifique subit une détente adiabatique par une vanne de détente dans le cas présent : baisse de pression, mais pas de récupération de travail ni d'échange de chaleur ($\delta Q = 0$ et $\delta W = 0$). Lors de cette détente le fluide repasse en basse pression (BP) en phase liquide + vapeur. Sous l'action d'un apport de chaleur, ici représenté par une résistance électrique, il reprend sa forme vapeur toujours à pression constante. A la sortie de la zone diphasique la vapeur est surchauffée par rapport à la saturation. Cette surchauffe est nécessaire au bon fonctionnement du compresseur, elle permet entre autre chose d'éviter le « coup de liquide » qui consiste en la compression de gouttelettes liquides ce qui peut provoquer la détérioration prématuée des clapets à l'entrée du compresseur. Selon le cycle présenté en Figure 1, on a les relations suivantes :

- Puissance apportée au condenseur $Q_{COND} = \dot{m}_{R134} \cdot (h_2 - h_4)$
- Puissance extraite à l'évaporateur $Q_{EVAP} = \dot{m}_{R134} \cdot (h_1 - h_4)$
- Puissance fournie par le compresseur $W_{COMP} = \dot{m}_{R134} \cdot (h_2 - h_1)$

Selon le premier principe (bilan de conservation de l'énergie) on a : $W_{COMP} + Q_{EVAP} = Q_{COND}$. Dans les équations précédentes le symbole « \dot{m} » représente le débit massique de fluide en kg/s.

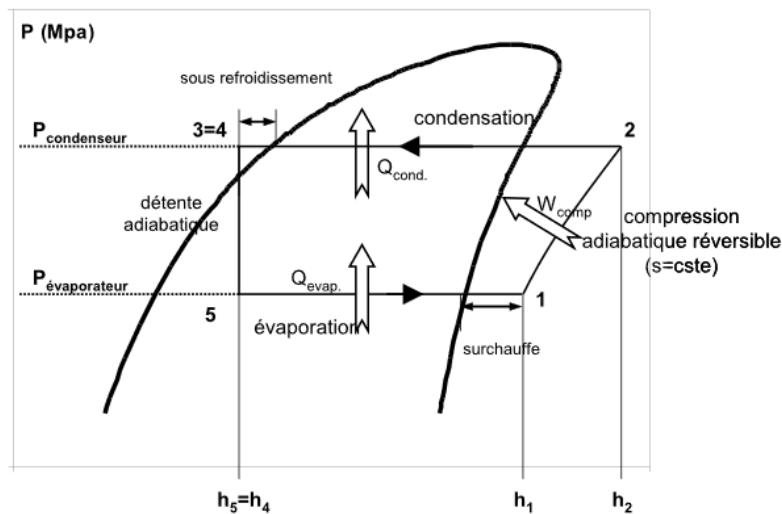


FIGURE 1 – Cycle frigorifique idéal sur diagramme (P-h)

2.2.2 Cycle réel

La description précédemment faite est celle d'un cycle idéal. Il est donc clair que pendant la séance de TP, les résultats vont légèrement différer pour différentes raisons :

- A cause du frottement, il se produit une petite chute de pression entre la sortie du compresseur, et l'entrée à la vanne de détente d'un côté et la sortie de celle-ci, puis l'aspiration du compresseur de l'autre.
- La détente dans la vanne est certes irréversible mais certainement pas adiabatique, l'enthalpie spécifique du fluide augmente mais le point d'arrivée n'est pas discernable car il se trouve dans la zone d'équilibre liquide-vapeur du diagramme.
- Le processus de compression n'est ni adiabatique, ni réversible. La différence d'enthalpie sera plus importante à cause des irréversibilités, on peut alors définir un rendement isentropique de compression :

$$\eta_{isen.} = \frac{(h_2 - h_1)_{isen.}}{(h_2 - h_1)_{rel}} \quad (1)$$

Attention : à cause de pertes de chaleur au niveau du compresseur, non quantifiable avec notre instrumentation, il se peut que l'on obtienne une valeur irréaliste. La vapeur qui sort de l'évaporateur est généralement surchauffée. Cette surchauffe est réglée par la vanne de détente, elle évite les

problèmes de coup de liquide au niveau du compresseur et améliore ses performances. Le liquide qui sort du condenseur est généralement sous-refroidi, c'est-à-dire qu'il est au-dessous de sa température de saturation correspondant à la pression condenseur. On améliore ainsi la puissance frigorifique de l'installation. Il peut y avoir un faible apport de chaleur, non souhaitable, dû à l'environnement, envers les parties du circuit qui fonctionnent au-dessous de la température ambiante.

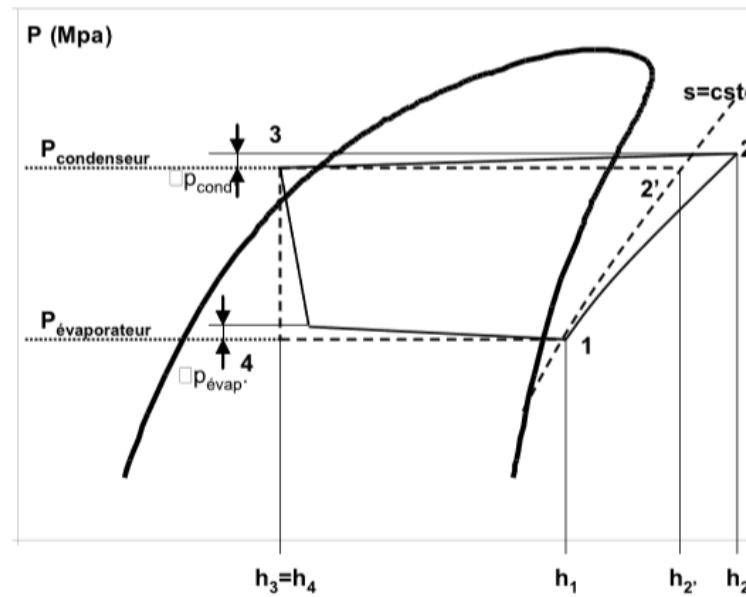


FIGURE 2 – Cycle frigorifique réel (traits pleins) comparé au cycle théorique (pointillés)

2.2.3 Cycle idéal avec échangeur de chaleur : liquide sortie condenseur/vapeur sortie évaporateur

La boucle de réfrigération utilisée contient également un échangeur à tubes concentriques en circulation contre-courant (i.e. l'entrée de fluide froid se fait du côté de la sortie du fluide chaud), placé du côté de la vapeur surchauffée (Figure 3), et associée à une vanne 4 voies. L'échangeur permet au fluide frigorigène liquide sortie condenseur d'être :

- dirigé directement au débitmètre R134 liquide et à la vanne de détente, donnant une configuration correspondant à la Figure 4 ,
- sous-refroidi par la vapeur froide sortie évaporateur en le faisant passer par l'échangeur de chaleur, cf. Figure 5.

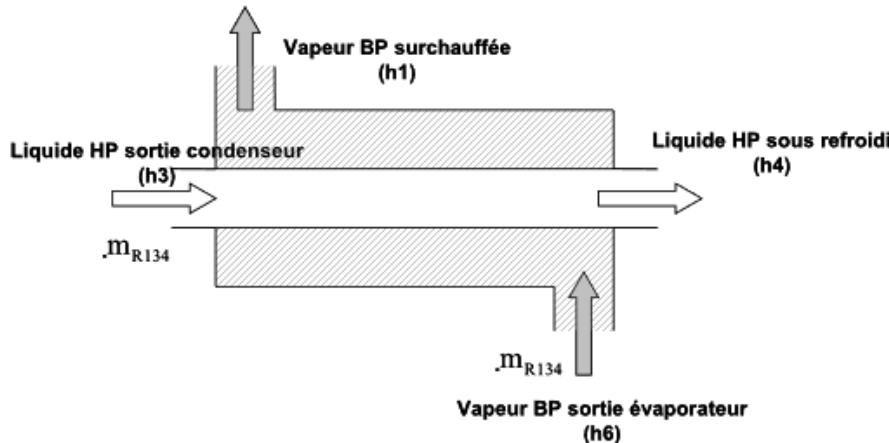


FIGURE 3 – Échangeur de chaleur en circulation parallèle inversée, à deux fluides.

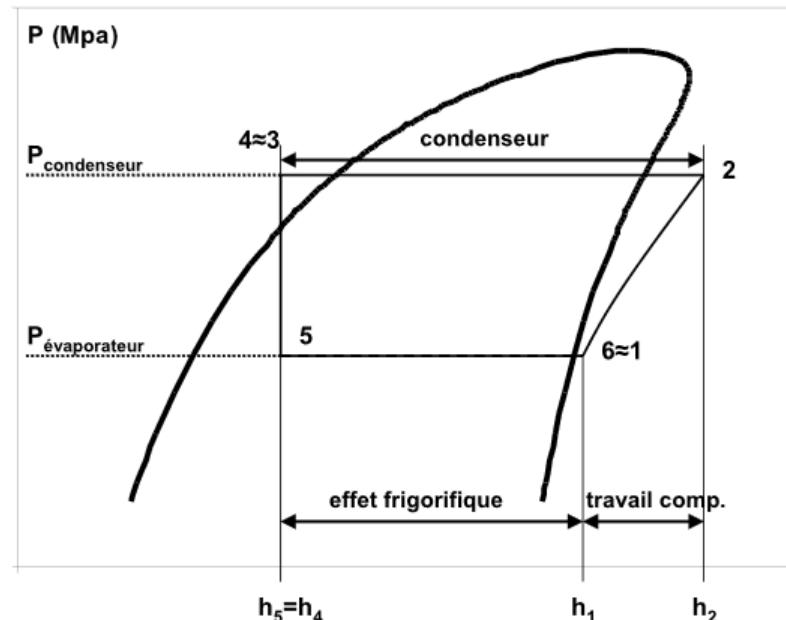


FIGURE 4 – Cycle frigorifique idéal sans échangeur

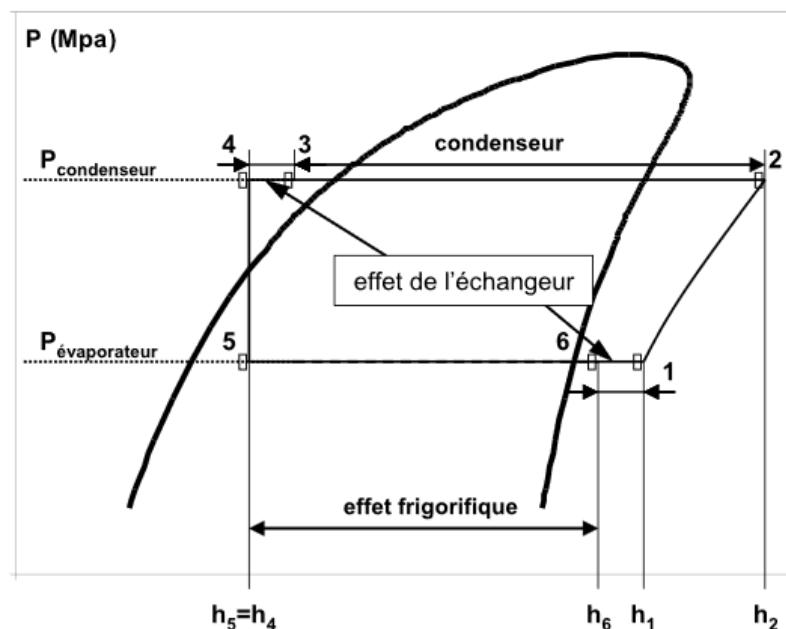


FIGURE 5 – Cycle frigorifique idéal avec échangeur.

On notera que même s'il y a une augmentation de l'effet frigorifique avec l'échangeur, les avantages principaux sont d'ordre pratique :

- un débit plus faible de fluide frigorigène pour une même puissance frigo
- une meilleure assurance de sous-refroidissement au condenseur
- l'élimination des gouttes de liquide à l'entrée du compresseur

3 Machine frigorifique : présentation

3.1 Description technique et Schémas de principe

Le banc expérimental, présenté à la Figure 6, est constitué des éléments suivants :

- un compresseur alternatif bi-cylindre, entraîné par courroie par un moteur asynchrone
- un condenseur à eau, dont le débit d'eau est contrôlé et mesuré par un debitmètre et une vanne
- un échangeur R134a/R134a, afin de sous-refroidir le liquide sortie condenseur et de surchauffer la vapeur sortie évaporateur
- un débitmètre pour le fluide frigorigène (R134a) en phase liquide
- une vanne de détente réglée pour assurer 5 °C de surchauffe en sortie évaporateur
- un évaporateur. La puissance nécessaire pour évaporer le fluide frigorigène est ici fournie par une résistance électrique alimentée à l'aide d'un auto-transformateur (cf. régulateur d'apport de chaleur sur la Figure 6).

Le fluide frigorigène utilisé dans l'installation est le R134a. Il est conforme à la législation en vigueur concernant la protection de la couche d'ozone, tout en possédant des qualités thermodynamiques (courbe de saturation et enthalpie), proches de celles du R12 qu'il a remplacé. Les courbes caractéristiques, ainsi qu'un diagramme complet, sont présentées en Annexes A.2.

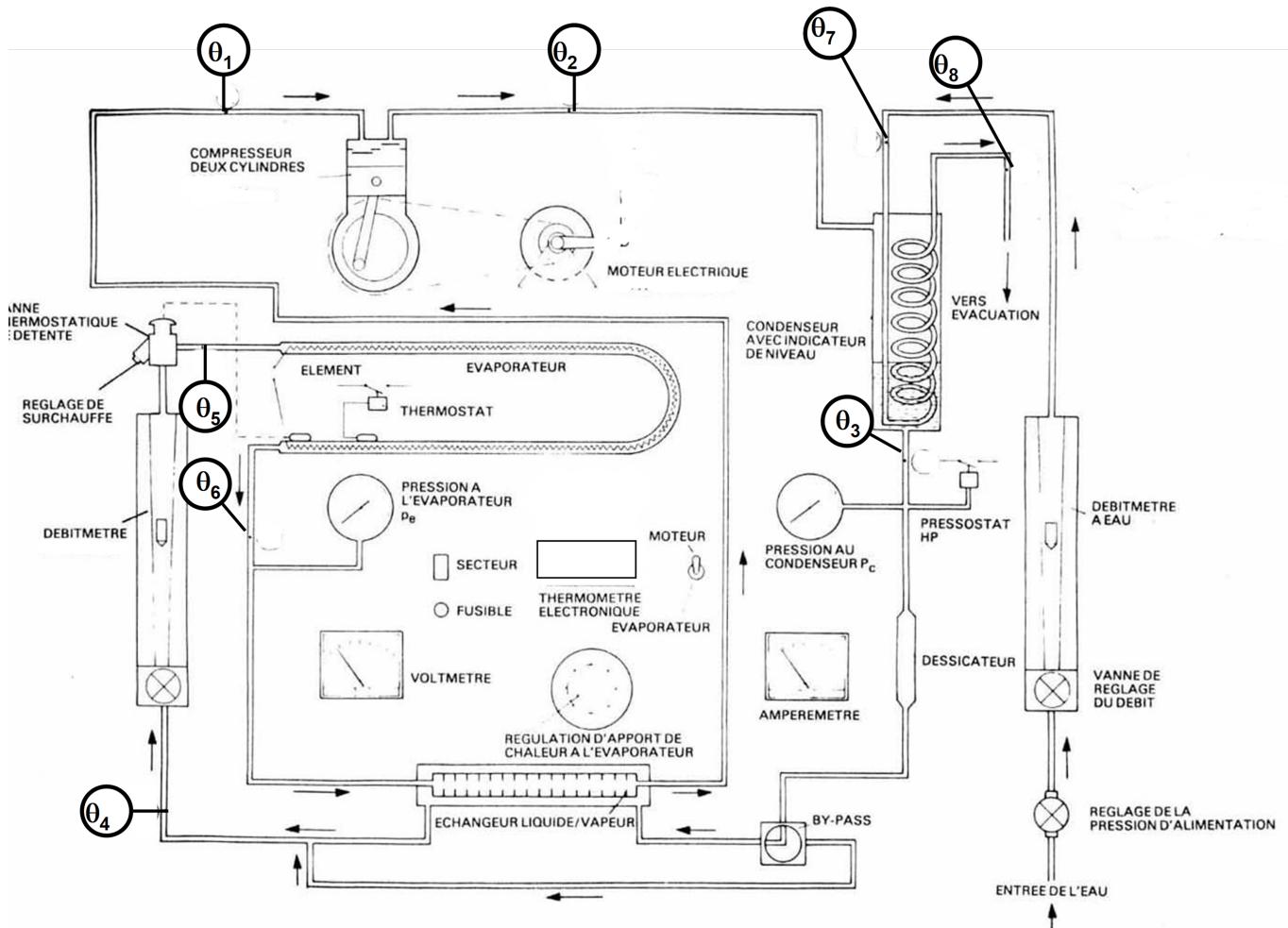


FIGURE 6 – Schéma de principe de l'installation.

L'instrumentation est quand à elle composée de :

- 8 thermocouples de type K implantés selon la Figure 6 et reliés à un sélecteur rotatif
- un indicateur pour thermocouples K au $1/10^{ime}$ de °C, compensé en température
- des manomètres, haute pression (HP) en rouge et basse pression (BP) en bleu, gradués en pressions relatives et en température de saturation pour le R134a
- un voltmètre et un ampèremètre. Un commutateur permet de mesurer la tension (U) et l'intensité (I) aux bornes de la résistance (évaporateur) ou du moteur électrique
- un tachymètre permettant de mesurer la vitesse de rotation du moteur, celle-ci permettra de déterminer le $\cos\phi$ du moteur électrique à chaque essai
- un débitmètre de fluide frigorigène étalonné pour le R134a.

Une vanne trois voies (cf. by-pass sur la Figure 6) permet de passer ou non par un échangeur R134 liquide/R134 vapeur. Cet échangeur, dont on testera l'efficacité, permet de surchauffer la vapeur sortie évaporateur et de sous refroidir le liquide sortie condenseur. Le sens de passage est indiqué par le sens d'orientation de la vanne.

Sur cette installation, il existe deux modes de fonctionnement : avec et sans échangeur. Lors du fonctionnement sans échangeur le schéma de principe de l'installation est celui décrit en Figure 7 - (a). On retrouve alors le cycle thermodynamique décrit à la Figure 4. Lorsque l'échangeur est en fonction on obtient le schéma de principe donné à la Figure 7 - (b). Dans ce cas nous n'avons plus $\theta_3 = \theta_4$ ni $\theta_6 = \theta_1$ et le cycle décrit est alors celui présenté à la Figure 5.

Compte tenu de la difficulté de mesurer une pression de refoulement du compresseur il nous sera très difficile d'estimer les pertes de charge au refoulement et dans le condenseur. Les différentes prises de pression et de température sont indiquées sur ce schéma de principe de l'installation frigorifique en symboles normalisés.

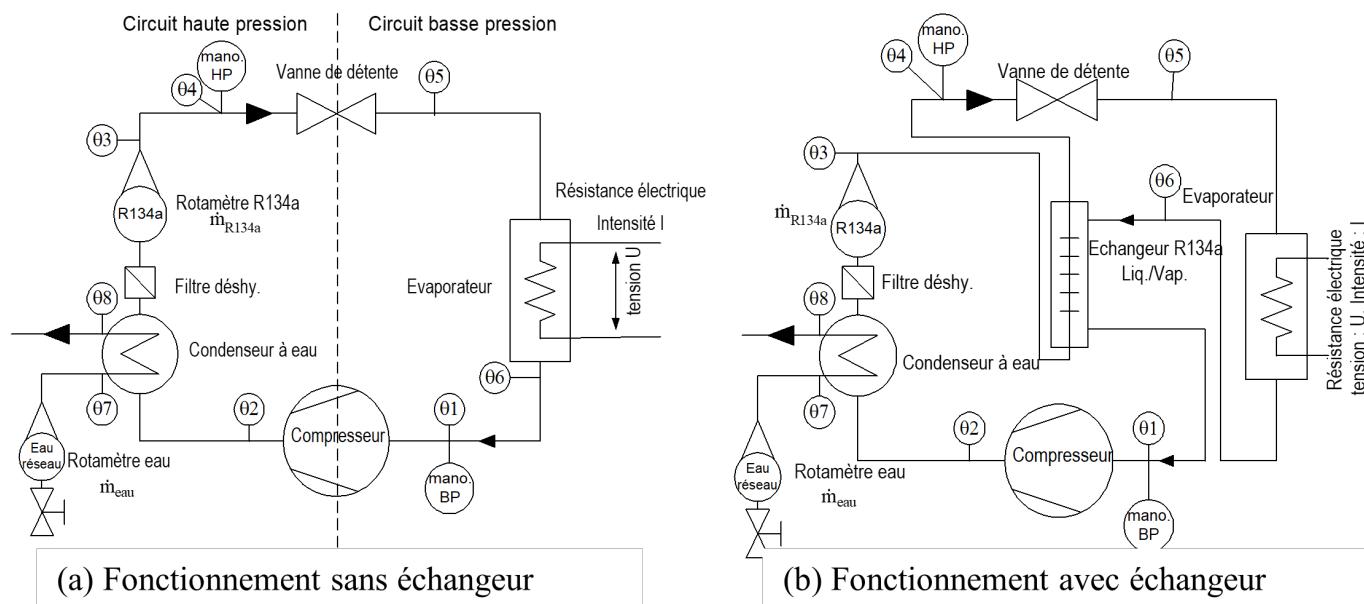


FIGURE 7 – Deux modes de fonctionnement de l'installation

3.2 Détermination des puissances et coefficients de performance (COP)

Sur l'installation on dispose de deux moyens pour déterminer les puissances mises en jeu : la mesure directe des puissances et le tracé du cycle thermodynamique sur un diagramme. Cette dernière option nécessite la connaissance du débit de fluide frigorigène.

3.2.1 Puissances « théoriques » à partir du diagramme [Log(P)-h]

En prenant l'hypothèse que la détente dans la vanne est isenthalpique ($\Delta h = 0$) et que la condensation/évaporation est isobare, on peut tracer les cycles thermodynamiques sur le diagramme de Mollier du R134a. A partir de la mesure du débit de R134a on peut obtenir la puissance avec un bilan enthalpique (attention cette puissance est reçue pour l'évaporateur et le compresseur, et elle est cédée pour le condenseur) :

$$P_{enth} = \dot{m}_{R134} \cdot (h_{sortie} - h_{entrée}) \quad (2)$$

3.2.2 Puissances expérimentales

Le banc à disposition est équipé de différents organes permettant la mesure presque directe des différentes puissances :

- bilan enthalpique sur l'eau de refroidissement pour la puissance au condenseur ;
- mesure de U et I aux bornes de la résistance pour la puissance à l'évaporateur ;
- mesure de la tension et de l'intensité aux bornes du moteur électrique entraînant le compresseur.

La valeur de ces puissances peut être différente de celle calculée à partir du cycle thermodynamique, néanmoins l'ordre de grandeur doit être respecté.

3.2.2.1 Condenseur (bilan enthalpique sur l'eau de refroidissement)

Pour un système ouvert sans changement de phase, l'eau de refroidissement, en régime permanent on a : $Q = \Delta H = m \cdot c_p \cdot (\Theta_s - \Theta_e)$. Dans cette dernière expression, Q est la quantité de chaleur en J, m la masse en kg, c_p la chaleur spécifique du fluide à pression constante en $J.kg^{-1}.K^{-1}$ et $\Theta_s(\Theta_e)$ la température du fluide à la sortie (entrée). La puissance P peut être obtenue en dérivant Q par rapport au temps, si le système est en régime permanent on obtient le résultat suivant :

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{\dot{m}}{\Delta t} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta \Theta = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\theta_s - \theta_e) \quad (3)$$

avec \dot{m} le débit massique de fluide en kg/s. Ce bilan enthalpique donne la puissance échangée entre le R134 et l'eau de refroidissement dans le condenseur, équipé d'un débitmètre à eau (cf. Figure 6). La chaleur spécifique de l'eau est donnée en Annexes A.1

3.2.2.2 Évaporateur (résistance électrique)

Aux pertes de chaleur près, la puissance à l'évaporateur est intégralement fournie par la résistance chauffante, dont la puissance est donnée par :

$$P_{résistance} = U_{résistance} \cdot I_{résistance} \quad (4)$$

3.2.2.3 Compresseur (moteur)

La puissance électrique consommée par le moteur est différente de la puissance appelée sur la ligne ; l'évaluation de la puissance « active » nécessite la connaissance du $\cos(\phi)$, cf. l'équation 5. Ce facteur de puissance est généralement donné en fonction du régime moteur sous la forme d'une

courbe $\cos(\phi) = f(N)$ avec N vitesse de rotation du moteur électrique. Cette variation correspond au glissement de la fréquence de rotation par rapport au réseau à 50 Hz.

$$P_{moteur} = U_{moteur} \cdot I_{moteur} \cdot \cos(\phi) \quad (5)$$

En l'absence de cette courbe, on prendra ici une valeur de $\cos(\phi)$ de 0.96. On pourra toutefois discuter de la pertinence de cette valeur constante selon les différents régimes de fonctionnement du moteur.

3.2.3 Coefficients de performance (COP)

Le Coefficient de Performance (COP) est le rapport de la puissance utile et de la puissance dépendue :

$$COP = \frac{P_{utile}}{P_{dépendue}} \quad (6)$$

Le COP est un réel positif pouvant être supérieur à 1, car il ne s'agit pas d'un rendement mais d'une performance par rapport à une certaine puissance dépendue. Pour les PAC mécaniques à compression de vapeur on peut définir 2 COP, l'un relatif au fonctionnement en réfrigérateur (production de froid à la puissance $P_{évap}$), l'autre est relatif au fonctionnement en pompe à chaleur (production de chaleur à la puissance P_{cond}). Le COP maximum est obtenu à partir du cycle idéal de Carnot composé de deux isothermes et deux isentropes et se calcule à partir des températures de source chaude et de source froide, i.e. Θ_{SC} et Θ_{SF} . L'expression des différents COP est donnée au Tableau 1.

Application (Exemple)	Froid (Climatisation)	Chaud (Pompe à Chaleur)
COP diagramme	$COP_{f,diag} = \frac{P_{évap}}{P_{comp}}$ (7)	$COP_{c,diag} = \frac{P_{cond}}{P_{comp}}$ (8)
COP expérimental	$COP_{f,TP} = \frac{P_{résistance}}{P_{élec,moteur}}$ (9)	$COP_{c,TP} = \frac{P_{cond}}{P_{élec,moteur}}$ (10)
COP Carnot	$COP_{f,C} = \frac{\Theta_{SF}}{\Theta_{SC} - \Theta_{SF}}$ (11)	$COP_{c,C} = \frac{\Theta_{SC}}{\Theta_{SC} - \Theta_{SF}}$ (12)

TABLE 1 – Expression des Coefficients de Performance (COP)

3.3 Procédure de mise en route

1. Ouvrir l'eau du réseau par l'intermédiaire de la vanne $\frac{1}{4}$ de tour.
2. Régler le débit d'eau à une valeur de l'ordre de 20 g/s.
3. Placer le commutateur de mesure de tension et d'intensité sur la position évaporateur.
4. Vérifier que l'autotransformateur se trouve bien en butée à gauche ($U = 0V$).
5. Démarrer l'installation à partir de l'interrupteur principal.
6. Aussitôt après avoir démarré l'installation vous devez introduire une charge au niveau de l'évaporateur telle que $U \sim 180$ V. En cas de non respect de cette consigne la pression à l'évaporateur continuerait à baisser et on risquerait de déclencher le pressostat BP. On risquerait aussi d'envoyer du liquide directement dans le compresseur ce qui serait dramatique.
7. Une fois un fonctionnement stable atteint, vous pouvez procéder à vos réglages.

3.4 Procédure en cas d'arrêt de sécurité BP ou HP - thermostat

En cas de déclenchement des pressostats de sécurité BP ou HP, il faut modifier les conditions expérimentales de manière à redémarrer dans de bonnes conditions. Il faut noter que le réarmement des pressostats après la disparition du défaut est automatique mais pas immédiat. Il faut attendre un certain temps que la pression s'éloigne de la valeur de déclenchement (curseur ΔP de droite) pour que le système redémarre. En cas de déclenchement des pressostats, il faut couper l'installation et reprendre la procédure de mise en route de manière à ne pas remonter trop haut en HP et ne pas descendre trop bas en BP.

En cas de déclenchement de la sécurité thermostatique sur la résistance chauffante (25°C), cela ne coupe que l'alimentation de la résistance. Néanmoins une absence de chauffage peut entraîner une coupure BP. Si la résistance chauffe trop il suffit simplement de diminuer la puissance imposée.

3.5 Procédure d'arrêt

1. Diminuer la tension aux bornes de la résistance à une valeur d'environ 150 V.
2. Diminuer le débit d'eau à une valeur d'environ 20 g/s.
3. Couper l'interrupteur général de mise en marche.
4. Après l'arrêt de la machine placer l'autotransformateur sur 0 % et couper l'eau.

4 Préparation - A faire avant d'arriver en séance

1. Sur le diagramme de phase fourni dans ce fascicule, repérer la courbe de saturation. Préciser quels domaines elle délimite. Tracer l'isobare $P_{abs} = 8$ bars. A cette pression, dire à quelle température se fait le changement d'état du fluide (du liquide au gaz). Conclusion. Dans la zone liquide et proche de la saturation, quelle est l'allure approximative des isothermes ?
2. Si le gaz R134a est à la pression relative $P_{rel} = 0,7\text{bars}$ et si sa température est de 20°C , quelle est son enthalpie spécifique ?
3. Donner l'expression littérale des coefficients de performance décrits au Tableau 1 . Selon les différentes expressions indiquez quels sont les paramètres, thermodynamiques, thermiques, électriques qui peuvent influer sur la valeur des COP. Pour faire cette rédaction (1/2 page max) on pourra s'appuyer sur le cours de thermodynamique.

5 Manipulations

5.1 Mise en route initiale

Pour la mise en route initiale, vous devez maintenir la boucle en marche avec des conditions imposées. Ce point initial vous permettra de vous familiariser avec l'appareillage et son comportement dynamique. Vous devez obtenir les conditions expérimentales suivantes :

- Fonctionnement en régime permanent **sans échangeur** ;
- $P_{cond.} = P_{HP} = 11$ bars (**pression absolue**) en jouant sur le débit d'eau du condenseur ;
- $P_{évap} = P_{BP} = 2.5$ bars (**pression absolue**) en jouant sur la puissance électrique de l'évaporateur.

Remarque : les manomètres installés sur les installations frigorifiques sont généralement gradués en pression relative. On peut vérifier s'il s'agit d'une pression absolue ou relative en consultant la correspondance entre la pression indiquée et la température de saturation du fluide, ici le R134a.

5.2 Travail à réaliser

5.2.1 Tracé des cycles – Fonctionnement avec et sans échangeur

A partir des conditions indiquées ci-dessous, effectuer un relevé complet de toutes les grandeurs mesurables listées dans le tableau fourni en salle de TP.

5.2.1.1 Conditions expérimentales

- Fonctionnement stable en régime permanent **sans échangeur** ;
- $P_{cond.} = 11 \text{ bars}$ (**pression absolue**), $P_{évap.} = 2.5 \text{ bars}$ (**pression absolue**).

Renouveler l'expérience et effectuer un relevé complet en régime permanent **avec échangeur**. Il est important que les pressions condenseur/évaporateur soient identiques à l'essai **sans échangeur**.

5.2.1.2 Exploitation des mesures sur les deux essais

- Sur le même diagramme [Log(P)-h] tracer les deux cycles thermodynamiques ;
- Dans les deux cas quel est le rendement isentropique de compression ? Pourquoi cette valeur est elle fausse ?
- Calculer les différentes puissances théoriques à l'aide du cycle (cf. section 3.2.1) et de la mesure du débit de R134 ;
- Calculer les COP frigo et PAC à partir des cycles. Commentaires ;
- Calculer les différentes puissances expérimentales obtenues à partir des puissances électriques et bilans enthalpiques sur l'eau de refroidissement (cf. section 3.2.2).
- Comparer ces puissances à celles obtenues à partir du cycle. Le premier principe (section 2.1) est il respecté ? Commentaires ;
- Calculer les COP frigo et PAC à partir des puissances expérimentales. Commentaires ;
- Quel est le rendement global du compresseur par rapport à la puissance électrique dépensée ?
- Vos commentaires et réflexions concernant l'utilisation d'un échangeur de sous-refroidissement.

5.2.2 Fonctionnement frigo - Évolution des puissances en fonction de la température d'évaporation

Le but de cet essai est d'étudier l'évolution de la puissance frigorifique en fonction de la température d'évaporation, à température de condensation fixée. Cet essai correspond au mode de fonctionnement « été » des installations frigorifiques industrielles où, dans le cas de condenseurs à air, la température de condensation est fixée par la température extérieure. On trouve également cette configuration lorsque l'on a une PAC avec une température de condensation fixée par une régulation, de manière à maintenir une température de condensation suffisante pour assurer le chauffage des locaux ; la température d'évaporation est alors variable avec les conditions extérieures.

On se fixe pour l'ensemble de ces essais une pression absolue condenseur de 11 bars, qui correspond à une température de condensation de 43 °C. En fonction de la température de l'eau du réseau, cette valeur peut être abaissée à 10 bars. **[Demander confirmation à l'encadrant de TP]**.

5.2.2.1 Conditions expérimentales pour les 6 relevés expérimentaux

- Régime permanent **sans échangeur** ;
- Pressions absolues : $P_{cond.} = 11 \text{ bars}$ (43 °C) et $P_{évap.}$ variable. En cas de faible température du réseau d'eau (< 11 °C), cette valeur de $P_{cond.}$ est à abaisser de 1 bar ;
- Tension aux bornes de la résistance variable de 140 V à 230 V.

5.2.2.2 Exploitation des mesures

- Sur le même diagramme [Log(P)-h], tracer les 2 cycles thermodynamiques extrêmes ;
- Vos commentaires sur l'évolution qualitative de la forme de ces cycles.



Ces cycles sont tracés de manière à observer qualitativement leur évolution.
On ne vous demande pas de les exploiter comme dans la première partie.

- Calculer les différentes puissances expérimentales (puissances électriques, bilan enthalpique sur l'eau au condenseur, cf. section 3.2.2). Rassembler les résultats dans un tableau ;
- Sur un même graphique tracer les puissances expérimentales : moteur, évaporateur et condenseur en fonction de la température d'évaporation. Étant donné le nombre limité de points ne dilatez pas vos échelles de manière exagérée.
- Commentaires sur l'évolution des puissances ;
- A partir des puissances expérimentales, calculer les COP_{frigo} et COP_{PAC} et tracer ceux-ci en fonction de $T_{acuteevap}$. Commentaires sur l'utilisation d'une PAC comme mode de chauffage, par exemple lorsque $COP_{PAC} < 1$. Commentaires sur l'évolution du COP_{frigo} .

5.2.3 Fonctionnement PAC - Evolution des puissances en fonction de la température de condensation

Le but de cet essai est d'étudier l'évolution de P_{cond} en fonction de la température de condensation, à température d'évaporation fixée. Cet essai correspond au mode de fonctionnement « hiver » des PAC, la température d'évaporation étant fixée par la température extérieure dans le cas d'évaporateur à air. On se fixe pour l'ensemble de ces essais une pression absolue à l'évaporateur de 2.5 bars, correspondant à une température d'évaporation d'environ -5 °C. De même que l'essai précédent, en fonction de la température de l'eau du réseau, cette valeur peut être modifiée. **[Merci de demander confirmation à l'encadrant de TP]**. Cette manipulation est délicate compte tenu des fluctuations de débit d'eau. Vous devez réaliser 6 relevés expérimentaux dans les conditions suivantes :

- Régime permanent sans échangeur.
- Pressions absolues : P_{vap} fixe à 2.5 bars (-5 °C), P_{cond} variable de 9 bars à 14 bars, attention cette dernière valeur est très proche de la valeur de déclenchement de la sécurité HP. En cas de faible température du réseau d'eau (~ 12 °C), ces valeurs de P_{cond} sont à abaisser de 1 bar.
- Sur le même diagramme [Log(P)-h] tracer les 2 cycles thermodynamiques extrêmes ;
- Vos commentaires sur l'évolution qualitative de la forme de ces cycles ;



Ces cycles sont tracés de manière à observer qualitativement leur évolution.
On ne vous demande pas de les exploiter comme dans la première partie.

- Calculer les différentes puissances expérimentales, voir le paragraphe 3.2.2
- Sur un même graphique, tracer les puissances moteur, évaporateur et condenseur en fonction de la température de condensation. Étant donné le nombre limité de points ne dilatez pas vos échelles de manière exagérée.
- Commentaires sur l'évolution des puissances ;
- A partir des puissances expérimentales, calculer les COP_{frigo} et COP_{PAC} et tracer ceux-ci en fonction de la température de condensation. Commentaires.

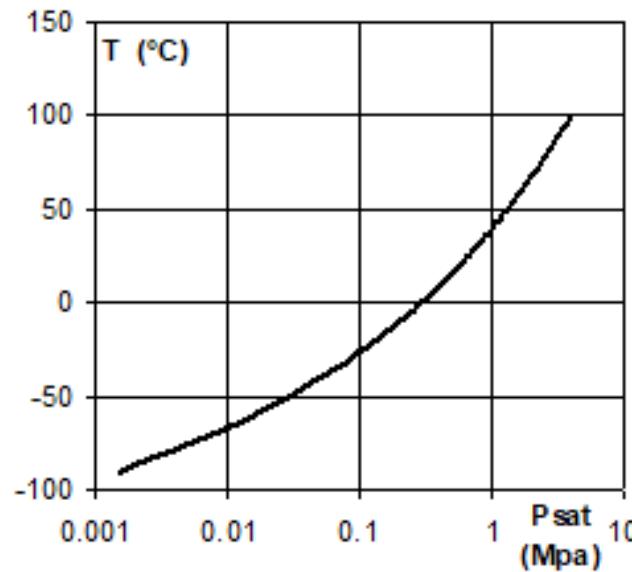
A Annexes

A.1 Propriétés thermophysiques de l'eau, à 1 bar de 273K à 370K

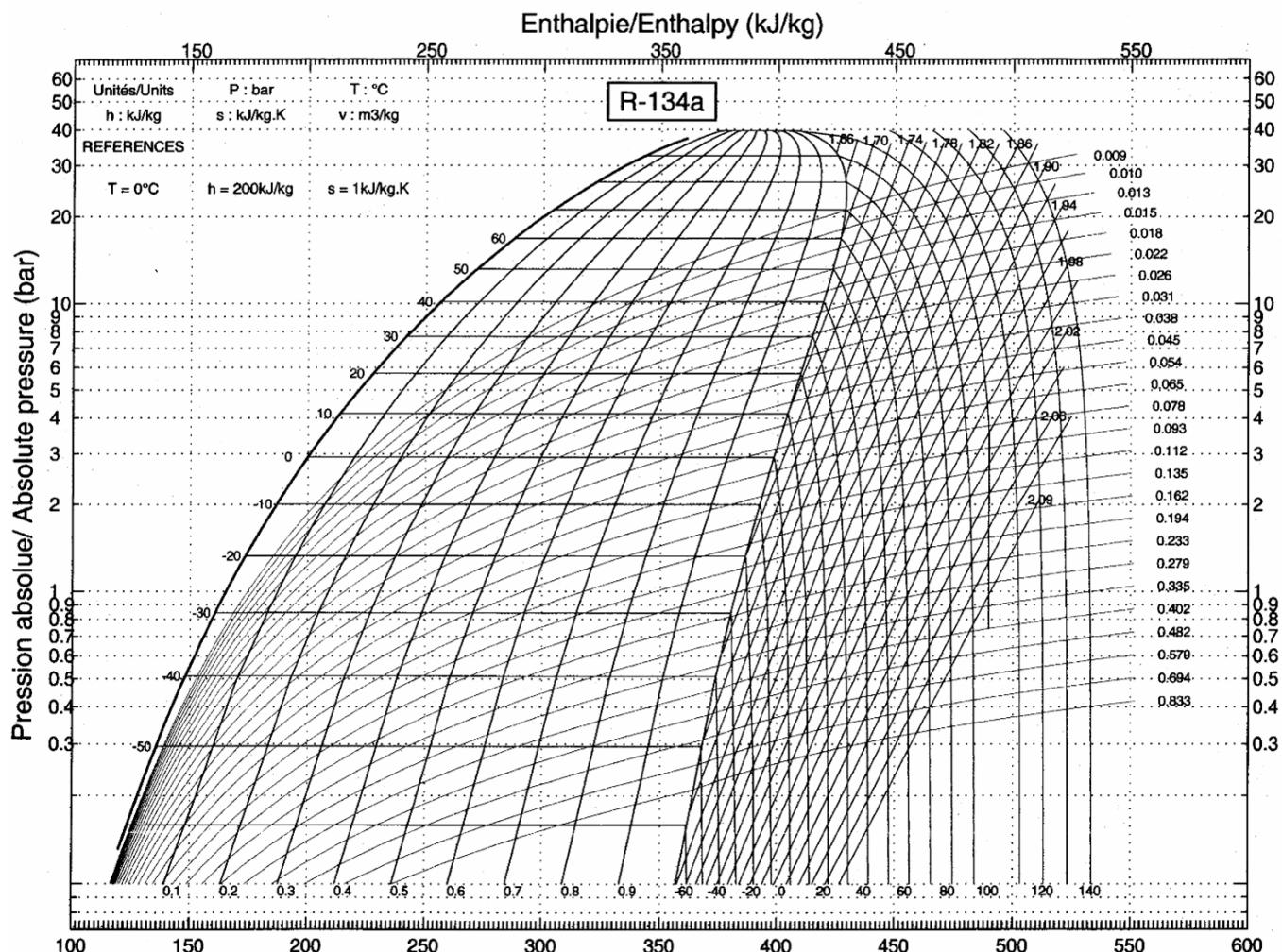
Formule de régression linéaire : $X(t) = \frac{X(t_1) - X(t_2)}{t_1 - t_2} \cdot (t) + X(t_1)$

T (K)	T (°C)	ρ (kg.m ⁻³)	c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	μ (Pa.s)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Pr (n.a.)
275	2	1000.0	4211	1652	0.574	12.12
280	7	1000.0	4198	1422	0.582	10.26
285	12	1000.0	4189	1225	0.59	8.70
290	17	999.0	4184	1080	0.598	7.56
295	22	998.0	4181	959	0.606	6.62
300	27	997.0	4179	855	0.613	5.8
305	32	995.0	4178	769	0.62	5.18
310	37	993.0	4178	695	0.628	4.62
315	42	991.1	4179	631	0.634	4.16
320	47	989.1	4180	577	0.64	3.77
325	52	987.2	4182	528	0.645	3.42
330	57	984.3	4184	489	0.65	3.15
335	62	982.3	4186	453	0.656	2.89
340	67	979.4	4188	420	0.66	2.67
345	72	976.6	4191	389	0.668	2.44
350	77	973.7	4195	365	0.668	2.29
355	82	970.9	4199	343	0.671	2.15
360	87	967.1	4203	324	0.674	2.02
365	92	963.4	4209	306	0.677	1.90
370	97	960.6	4214	289	0.679	1.79

A.2 Courbe de saturation liquide-vapeur du R134a



A.3 Diagramme [Log(P)-h] du R134a



Acoustique

Ce TP est lié au cours "Optique et acoustique" du semestre 6. Il fait référence aux notions suivantes : vitesse du son, spectre fréquentiel d'un son, niveaux acoustiques, atténuation par des parois simples et multi-éléments, analyse par bande d'octave.

Notions principales : intensité, niveau, bande d'octave et résistance acoustique

Le son est une onde de pression qui se propage dans un milieu matériel. Dans l'air, le son se propage à une vitesse d'environ $c = 340 \text{ m/s}$, et l'oreille humaine est sensible à des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz. **En acoustique linéaire, un son complexe résulte de la superposition de sons "simples"**, une analyse de Fourier permet de connaître les fréquences de ce son.

L'oreille est un capteur de pression logarithmique, sensible à l'**intensité acoustique I** , qui s'exprime en W/m^2 et qui est définie comme $I = \langle p^2 \rangle_t / (\rho c)$ avec p la pression acoustique en Pa, ρ la masse volumique de l'air en kg/m^3 et c la vitesse du son en m/s .

Le **niveau acoustique, L** , exprimé en décibel (dB), ressenti par l'oreille, est défini par $L = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$, où I_0 est le niveau acoustique de référence conventionnellement fixé à 10^{-12} W/m^2 .

Une **bande d'octave** est un intervalle de fréquence dont les bornes sont $[f ; 2f]$. Une **bande en tiers d'octave** est un intervalle de fréquence dont les bornes sont $[f ; 2^{1/3}f]$. En acoustique du bâtiment et acoustique industrielle, les bandes de fréquences sont standardisées. Elles sont centrées autour des **dix fréquences** du tableau ci-dessous. Pour les tiers d'octave, les bandes sont plus étroites (voir le tableau ci-dessous).

octave (Hz)	31.5	63	125	250	500
1/3 d'octave (Hz)	25-31.5-40	50-63-80	100-125-160	200-250-315	400-500-630
1 000	2 000	4 000	8 000	16 000	
800-1000-1250	1600-2000-2500	3150-4000-5000	6300-8000-10000	12500-16000-20000	

La qualité acoustique d'une paroi de construction (mur, cloison, plancher, plafond, fenêtre, porte, etc...) est caractérisée par sa **résistance acoustique R** , appelée aussi indice d'affaiblissement acoustique. R est défini comme la différence entre le niveau sonore incident L_i et le niveau sonore transmis L_t . Plus R est grand, plus la paroi a un isolement acoustique élevé. R peut être exprimé en dB (octave par octave) ou globalement en dB(A).

1 Mesure de la vitesse du son dans l'air

Objectif : Mesurer la vitesse de propagation du son dans l'air à la température de la salle, et éventuellement dans un autre matériau.

Montage : Vous avez à disposition sur la table un couple de transducteurs ultrasonores. L'émetteur est excité par des pulses d'1 ms sur une base de 40 kHz (crête-à-crête $\pm 12 \text{ V}$). Les signaux d'émission et de réception sont visualisés sur un oscilloscope numérique. Le schéma du montage est présenté à la figure 1.

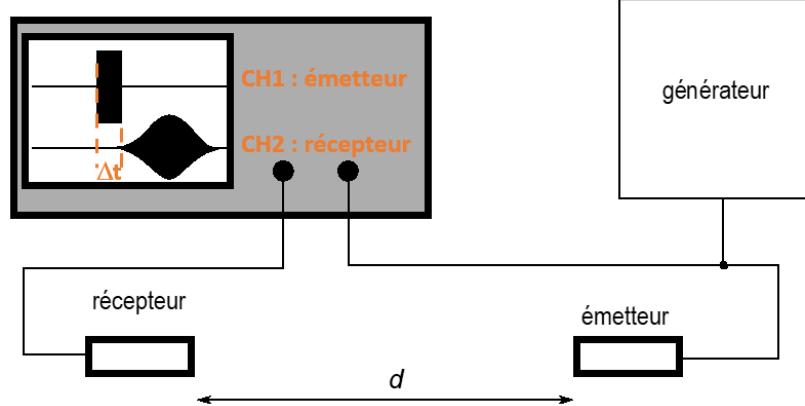


FIGURE 1 – Schéma de montage pour la mesure de la vitesse du son

Travaux à faire :

1. Réalisez le branchement correspondant au montage de la figure 1 ;
2. Réglez l'oscilloscope pour identifier et distinguer les deux signaux ;
3. Observez comment évolue le signal de réception en fonction de la distance d , commentez et proposez une interprétation physique ;
4. Mesurez le temps de vol Δt en fonction de la distance d entre le transducteur émetteur et le transducteur récepteur.

Tracez d en fonction de Δt et indiquez sur ce graphe la température T dans la pièce de TP, ce jour-là. Déduisez la vitesse du son dans l'air c , à cette valeur de T .

5. Que se passe-t-il sur le signal du récepteur lorsqu'on intercale un échantillon de MDF (ou panneau de fibres de bois de densité moyenne en français) rouge entre l'émetteur et le récepteur ? Quantifiez ces différences.
Et avec un échantillon de faux plafond ? et puis avec de la mousse absorbante grise collée sur le MDF rouge ? Commentez tous ces résultats en les présentant sous la forme d'un tableau, et prenez-les en compte pour la partie 2.

2 Niveaux acoustiques, atténuation, traitement du signal

Objectifs : Mesurer les effets acoustiques d'une paroi absorbante : atténuation, analyse en fréquences (bande d'octaves et tiers d'octave)

Montage - Les mesures vont être réalisées dans un caisson en bois isolé par l'intérieur avec de la mousse acoustique. La source sonore est une enceinte de monitoring, reliée à un PC par la sortie casque de la carte son. Le signal sonore à émettre sera lu par le logiciel Audacity. La réception du son à l'autre extrémité du caisson est faite par deux éléments indépendants :

- Un sonomètre calibré, qui délivre en temps réel le niveau sonore global (en dB). Le signal du sonomètre est relevé par une carte Arduino Uno, reliée au PC.
- Un micro, qui enregistre le son reçu via le logiciel Audacity®, relié au PC par une liaison USB.

Entre l'émetteur et le récepteur, la partie centrale peut accueillir une paroi constituée de différents matériaux. Le schéma du montage est présenté à la figure 2.

Signaux sonores de référence - Le principal signal de référence est un **bruit blanc**. Par analogie avec l'optique (la lumière blanche est la résultante de la superposition de toutes les couleurs du spectre visible), un bruit est théoriquement composé de toutes les fréquences du spectre audible. La transformée de Fourier d'un bruit blanc doit montrer un spectre uniforme indiquant que chaque fréquence individuelle est équiprobable. Mais une analyse en bande d'octave de ce bruit montre une sur-représentation des hautes fréquences, car les bandes d'octave en haute fréquence sont plus larges que celles en basse fréquence.

Pour compenser ce phénomène, on peut fabriquer un **bruit rose**, qui va augmenter artificiellement la puissance des basses fréquences de manière à ce que le spectre en bande d'octave soit uniforme. La "couleur rose" du bruit est encore une fois une analogie optique, c'est un spectre dans lequel on aurait ajouté plus de basses fréquences optiques (donc de grandes longueurs d'onde) proches du rouge qui mélangées au blanc donne du rose. Plusieurs signaux de référence sont à votre disposition dans le répertoire "Signaux de référence" (bruits blancs, rose, brun, etc.).

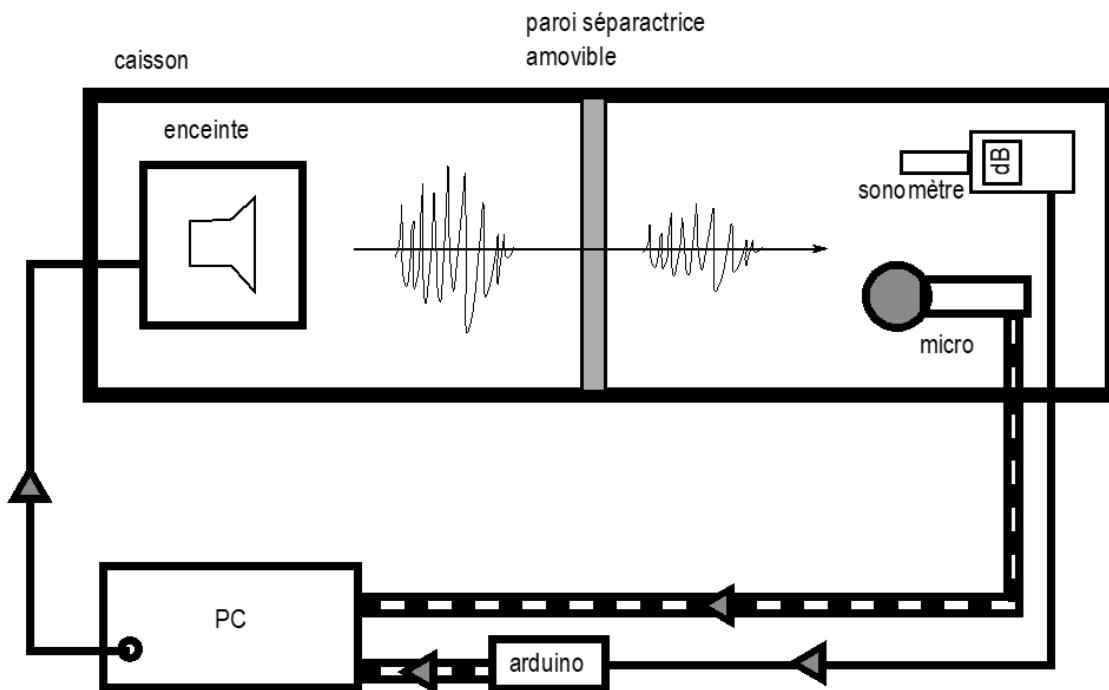


FIGURE 2 – Schéma de montage pour les propriétés acoustiques de différents matériaux

Travaux à faire :

1. Démarrage

- Allumer le PC, et dans le caisson le sonomètre et l'enceinte amplifiée. Le micro USB et la carte Arduino sont alimentés directement par le PC. Ouvrir les logiciels Arduino IDE, Spyder (Python) et Audacity. Sur Arduino IDE, voir 3.1, pensez à téléverser le programme `sonometre.ino` sur la carte.
- Dans le dossier 'TP acoustique' sur le PC, créez un répertoire pour y stocker vos mesures. Le nom de ce répertoire doit être reporté dans le code python `tp_acoustique.py` que vous allez utiliser plus tard, par exemple : `Mon_tp = NOMetudiant1_NOMetudiant2`. Copiez dans ce dossier, le fichier '`whitenoise.wav`' que vous trouverez dans le dossier `sons_de_référence` dans votre dossier.

2. Calibration

- Sans paroi séparatrice, lancer le code python `calibration_sonometre.py` et si besoin, ajustez le niveau de sortie du PC et le potentiomètre de l'enceinte amplifiée pour que

le niveau acoustique mesuré soit proche de 80 dB. La valeur de calibration est automatiquement enregistrée dans le fichier ‘calibration_whitenoise.dat’. *Par la suite, merci de ne plus toucher au niveau sonore du PC, ni au potentiomètre de l’enceinte amplifiée.*

- b) Avec Audacity, lisez le fichier ‘whitenoise.wav’ qui est dans votre dossier et enregistrez le signal reçu par le micro dans le fichier ‘whitenoise_caisson.wav’ dans votre répertoire (voir procédure en 3.3).
- 3. **Effet du caisson** - Utiliser le code python ‘tp_acoustique.py’ pour analyser le fichier ‘whitenoise_caisson.wav’. Pour cela, utilisez `wav_fname_1 = 'whitenoise.wav'` et `wav_fname_2 = 'whitenoise_caisson.wav'`
À partir de ces résultats, commentez le filtrage acoustique dû au caisson (taille du caisson, effet de la mousse isolante, etc...)

4. Effet d'une paroi isolante

Vous avez à votre disposition plusieurs échantillons de parois isolantes : MDF, MDF + mousse, dalles de plafond, etc. Pour chaque matériau, utiliser Audacity pour enregistrer la réponse acoustique d'une paroi à partir d'un son de référence et enregistrer les fichiers dans votre répertoire. Ces fichiers sons sont à analyser de manière comparative, par exemple

```
wav_fname_1 = 'whitenoise_caisson.wav'  
wav_fname_2 = 'whitenoise_MDF+mousse.wav'
```

Rédigez votre rapport sous la forme d'une notice technique pour chaque matériau, en précisant les avantages et inconvénients de celui-ci en fonction de la fréquence f .

5. Isolement d'une paroi composée

Quand une onde sonore traverse une paroi composée de plusieurs matériaux (par exemple une façade de bâtiment avec un matériau structurel, le béton, et des menuiseries, portes et fenêtres), la résistance acoustique R de l'ensemble doit vérifier l'équation suivante :

$$S_T 10^{-R/10} = \sum_i S_i 10^{-R_i/10}$$

où $S_T = \sum_i S_i$ est la surface totale de la paroi, et R_i et S_i sont respectivement la résistance acoustique et la surface de chaque matériau.

Remarque : une ouverture peut être considérée comme un matériau de résistance acoustique nulle.

En utilisant les plaques composées (celle avec une "porte" en bois amovible, et celle avec une "fenêtre" amovible en matériau plastique), faire des mesures de résistance acoustique en bruit blanc et en se basant sur l'expression théorique ci-dessus, déterminer les résistances acoustiques des matériaux encastrés (bois et matériau plastique).

6. Effet de masse

La principale propriété d'un matériau, qui influe sur l'isolation acoustique, est la masse surfacique en kg/m². Établissez à partir des mesures, que vous avez effectuées, une corrélation entre la masse surfacique et l'atténuation des parois.

3 Notices techniques

3.1 Arduino - sonomètre : sonometre.ino

La carte Arduino acquiert la tension, entre [0 – 5] V, délivrée par le sonomètre. La conversion en dB est réalisée par le code Arduino, et le résultat est envoyé sur un port série USB qui peut être lu

par le PC. En début de séance, il faut ouvrir le programme Arduino `sonometre.ino` sur le PC, le compiler, et le téléverser sur la carte. La lecture du niveau sonore du sonomètre se fait maintenant en continu.

3.2 Calibration du sonomètre sous Python : `Calibration_sonometre.py`

Le code `Calibration_sonometre.py` permet de générer un son, et d'enregistrer le niveau acoustique moyen capté par le sonomètre, via la liaison USB. La procédure standard consiste à utiliser un bruit blanc de 10 s.

3.3 Enregistrement sous Audacity®

C'est un logiciel libre de manipulation de fichiers sons. Il possède l'essentiel des fonctions de base pour l'enregistrement multi-pistes, l'édition, le traitement numérique et la sauvegarde de signaux sonores. Ci-dessous les opérations à effectuer, lors de la séance :

1. Importer un fichier son de référence (bruit blanc, bruit rose, etc... en format `.wav`) qui va s'ouvrir sur une première piste (piste 1). Vérifier que la lecture de cette piste produit un son dans le caisson.
2. Créer une nouvelle piste (2) qui servira pour enregistrer le signal provenant du micro USB : Menu **Pistes** -> **Ajouter une nouvelle piste** -> **Mono**.
Pour réaliser une mesure, il faut donc lire la piste (1) tout en enregistrant la piste (2). Pour cela, mettre le curseur à 0 puis cliquer sur  et vérifier que la piste (2) est bien active pour l'enregistrement (encadré de couleur jaune).
3. Enregistrer en cliquant sur  en ayant vérifié que la touche **Silencer** n'est pas enfoncée. Quand l'enregistrement est terminé, ajuster la durée du signal sur la piste (2) à environ 10 s comme le signal de la piste (1).
Mettre la piste (1) en mode Silence : cliquez sur le bouton **Silencer** en haut à gauche de la fenêtre de la piste (la piste 1 devient grisée), puis exporter le signal en format wav : **Fichier** -> **Exporter** -> **Exporter en WAV**. Penser à fixer le format d'encodage à 32 bits. C'est ce fichier qui sera analysé par le code Python.

3.4 Analyse des signaux acoustiques sous Python : `tp_acoustique.py`

Un code Python est à votre disposition pour faire une analyse comparative de deux fichiers sons. Ce code est construit autour d'une fonction principale `wav_analysis` qui va réaliser les opérations suivantes :

1. Lecture du fichier `.wav`
2. Extraction des données (durée, taux d'échantillonnage, data)
3. Transformée de Fourier (FFT)
4. Analyse d'octave et tiers d'octave

Cette fonction est appelée deux fois dans le code pour comparer deux fichiers différents. Les noms des deux fichiers sont à préciser dans les variables `wav_fname_1` et `wav_fname_2`.

Le code présente sous forme de graphiques les signaux, les spectres FFT et les niveaux acoustiques en bandes d'octave et tiers d'octaves. Les graphiques sont automatiquement enregistrés en format PNG dans votre répertoire de travail, afin que vous puissiez les importer dans votre compte-rendu.

4 Références

- Sons de références (bruit blanc, bruit rose, etc. en format .wav) disponibles sur www.audiocheck.net.
- Audacity® : notice et téléchargement sur <https://www.audacityteam.org/>.
- Sonomètre enregistreur RS PRO 130 dB avec filtres et interface USB, <https://fr.rs-online.com/web/p/sonometres/1464651>
- Enceinte de monitoring amplifiée 75 W + 45 W https://www.thomann.de/fr/yamaha_hs_8.htm
- Cours d'Acoustique sur Ametice <https://ametice.univ-amu.fr/course/view.php?id=116463>

- Rédacteurs et contacts : Laurence Bergougnoux (laurence.bergougnoux@univ-amu.fr) et Maxime Nicolas (maxime.nicolas@univ-amu.fr)

Banc d'étude de la vélocimétrie doppler à laser

1 Introduction et rappels théoriques

La détermination de la vitesse en mécanique des fluides est fondamentale pour avoir une meilleure connaissance du comportement des écoulements. Une des techniques optiques les plus utilisées dans l'industrie et la recherche est la vélocimétrie laser. Elle date de 1964 (Yeh et Cummins) et utilise de fines particules comme traceurs de l'écoulement pour déterminer les vitesses locales et leurs fluctuations. La gamme des vitesses accessibles est très étendue, de quelques m/s jusqu'à des centaines de m/s. Cette méthode ne perturbe pas l'écoulement, elle nécessite seulement que le fluide soit transparent et qu'il contienne des fines particules ou gouttelettes en suspension.

L'objet de ce TP (fig.1) est de se familiariser avec les principes fondamentaux de la vélocimétrie laser. Une annexe est déposée sur la table de TP pour la démonstration des formules.



FIGURE 1 – banc d'anémométrie laser

1.1 Composition du banc

1 : Rail optique 0,8m avec échelle graduée 2 : Diode laser verte avec dispositif d'ajustement XY 3 : Alimentation diode laser 4 : Polariseur 5 : Bloc diviseur de faisceau 6 : Lentille focale 150 ou 80mm 7 : Disque tournant 8 : Contrôleur moteur pas à pas 9 : Lentille focale 100 mm 10 : détecteur Silicium 11 : Contrôle rotation moteur 12 : Oscilloscope, visualisation des signaux(pas présenté ici).

1.2 Précautions à prendre lors de la mise en oeuvre d'un laser

La diode laser verte de ce TP est un laser de classe IIIb. Elle peut provoquer des lésions irréversibles de la rétine si le faisceau direct est regardé. Quelques recommandations simples :

- Porter obligatoirement les lunettes prévues et disponibles sur la table et si les lunettes doivent être enlevées (dans le cas où l'on veut observer les franges d'interférences) suivre les indications qui suivent :
- Ne pas regarder le faisceau direct
- Ne pas regarder plus que nécessaire les réflexions du laser (se placer toujours à plus de 20cm)
- Ne pas placer les yeux à la hauteur du laser

-
- Retirer les bijoux (bagues, montre) qui pourraient réfléchir les faisceaux.

2 L'idée de base : l'effet Doppler

L'idée de départ de la vélocimétrie laser a été de dire qu'une particule en mouvement modifie la fréquence de la lumière qui l'éclaire en raison de l'effet Doppler : la source d'éclairage est un laser qui émet une fréquence optique f_0 dans le vide et se propage selon un vecteur unitaire \vec{r}_0 . La source et le photodétecteur sont fixes dans le laboratoire (fig.2), et la particule se déplace à la vitesse \vec{V} . Le photodétecteur est positionné selon la direction du vecteur \vec{r}_d .

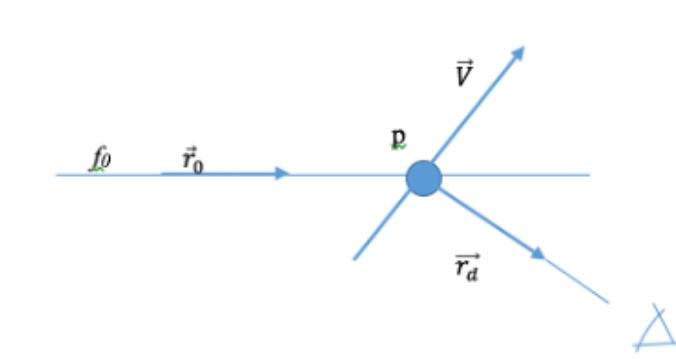


FIGURE 2 – Diagramme de la formule de base de la vélocimétrie laser "Doppler"

On peut alors montrer que le photodétecteur reçoit un signal à la fréquence f :

$$f = f_0 \left(1 - \frac{\vec{V} \cdot (\vec{r}_0 - \vec{r}_d)}{c} \right) \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière. Il est donc possible d'obtenir une composante de la vitesse en mesurant la fréquence reçue par le photodétecteur. Comme le rapport $\frac{V}{c} \ll 1$, $f \sim f_0 \sim 10^{14}$ Hz, cette valeur n'est pas mesurable par des photodétecteurs usuels. De plus la formule (1) montre que la fréquence détectée dépend de la direction d'observation, ce qui pose des problèmes d'erreurs de mesure. Des montages optiques ont été créés pour s'affranchir de ces problèmes. La technique la plus utilisée est celle de "vélocimétrie à franges".

2.1 Théorie de la vélocimétrie laser à franges

Dans le cas du vélocimètre à franges, deux faisceaux issus de la même source laser donc cohérents, ayant des directions de propagation différentes \vec{r}_1 et \vec{r}_2 et faisant entre eux un angle α (ou θ) (fig.3), se croisent dans le volume de mesure V . Dans ce volume se crée alors un réseau de franges réel d'où l'appellation de cette technique "vélocimétrie laser à franges". L'interfrange i est donné par l'équation ci-dessous (cf. annexe sur table) (avec λ_0 la longueur d'onde émise par le laser) :

$$i = \frac{\lambda_0}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

Quand une particule passe au travers du réseau de franges, elle croise alternativement des franges sombres et brillantes, et diffuse donc un flux périodique, si bien que le détecteur recevant cette lumière modulée délivre un signal ayant une fréquence f : $f = \frac{V}{i}$ (3) où V est la composante de vitesse perpendiculaire aux franges. La fréquence détectée est indépendante de la direction d'observation, c'est une propriété essentielle de ce montage.

3 Dispositif d'anémométrie laser

Le banc dont nous disposons (CA-1350) permet de montrer et d'étudier le principe de fonctionnement d'un Anémomètre Laser Doppler (ALD), fig.1. Afin de générer les deux faisceaux laser et les

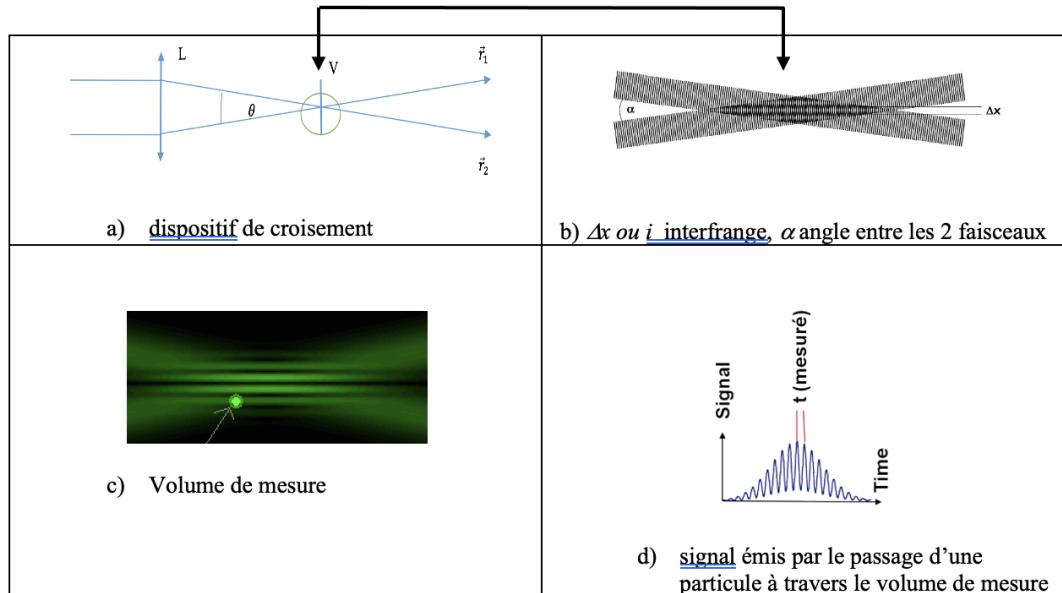


FIGURE 3 – Volume de mesure et interfranges

franges, on dispose d'un ensemble d'émission composé d'une diode laser verte (2) (10 mW , $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$), d'un séparateur de faisceau (5) (jeu de miroirs qui sépare le faisceau laser en deux faisceaux cohérents, de même intensité et d'écartement variable) et d'une lentille convexe (6) (deux focales possibles : $f = 150 \text{ mm}$ ou $f = 80 \text{ mm}$). Cette dernière permet de faire interférer les deux faisceaux pour donner naissance à un réseau de franges brillantes et sombres périodiquement espacées, fig.3. Un disque acrylique rayé (7), en rotation, est placé dans la zone de mesure, c'est-à-dire au point de croisement des deux faisceaux. Les particules de poussière collées sur la surface permettent la diffusion de la lumière. Le signal lumineux est recueilli par un objectif (9) puis focalisé sur un photodétecteur en silicium (10). Un photomultiplicateur (12) effectue la transformation du signal lumineux en signal électrique, celui-ci est amplifié puis visualisé sur un oscilloscope numérique. La traversée successive de franges brillantes et sombres (fig.3) donne un signal périodique. La détermination de sa fréquence permet de remonter à la vitesse des particules. De plus l'appréciation de la profondeur de modulation permettra de faire une conclusion semi-quantitative quant à la taille des particules.

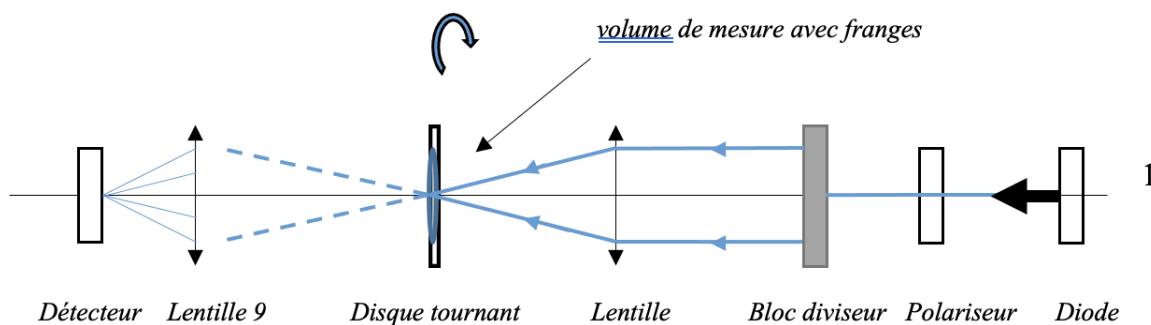


FIGURE 4 – Schéma du dispositif expérimental

3.1 Mise en place du dispositif

Le dispositif de mesure des vitesses, correspondant au kit CA-1350 (Fig.4), est déjà mis en place. Un deuxième banc est prévu pour se familiariser avec l'optique et voir l'obtention des franges, voir §4. La séance débutera par cette partie. La longueur d'onde du faisceau utilisé sur ce dispositif annexe, est de 635nm .

3.2 Visualisation des franges d'interférence

Bien lire les consignes de sécurité avant de commencer les réglages optiques !

Cette partie se fera à l'aide du dispositif annexe au kit CA-1350, l'ancien banc optique !

Le faisceau rouge issu du laser est séparé en plusieurs faisceaux par l'intermédiaire d'un réseau de diffraction. Pour cela, on utilise un disque de verre gravé de 3 pistes concentriques ce qui permet d'avoir 3 réseaux. Chacun d'eux a un pas différent permettant d'accéder à trois interfranges différents (cf annexe).

Le réseau est optimisé pour travailler sur les ordres +1 et -1. L'ensemble est monté sur une platine XY qui permet de faire tourner le plan défini par les faisceaux émergents. Ne pas déplacer la platine sur le banc.

- Allumez le laser et surtout ne pas modifier sa position.
- Observez la figure de diffraction fournie par un des réseaux. En jouant sur le réglage de position horizontale (ou verticale), vous pouvez accéder aux trois pistes.
- Bien vérifier que les taches de diffraction sont alignées suivant une verticale (ou une horizontale).

3.2.1 Mise en place du module de convergence des faisceaux

Ce module est muni d'une lentille de mise en faisceaux parallèles, d'une lentille de focalisation et d'un masque supprimant les ordres indésirables générés par le réseau de diffraction. Les deux lentilles seront placées avec leur face convexe l'une vers l'autre.

Lentille de mise en faisceaux parallèles :

- Choisissez la lentille notée n°1
- Placez la première lentille par la méthode de projection des faisceaux :
- Placez la lentille de sorte que les distances mesurées entre les deux faisceaux en sortie de lentille et au loin soient égales (utilisez une feuille de papier pour visualiser les faisceaux). Le réseau est alors dans le plan focal de la lentille et les faisceaux en sortie de la lentille sont parallèles.
- Quelle est la distance focale d_1 de la lentille sélectionnée ?
- Mettez en place le masque sur cette lentille et ne laissez passer que les ordres +1 et -1.

Lentille de focalisation :

Les faisceaux arrivent parallèles sur cette lentille, ils vont se combiner au point focal pour générer un réseau de franges perpendiculaires au plan qu'ils déterminent.

- A quelle distance doit-on placer cette lentille de la précédente ?
- A l'aide d'un papier calque, repérer le volume de mesure, à l'intersection des deux faisceaux.
- Quelle est la distance focale d_2 de la lentille n°2 ?

L'optique d'émission est en place, pour vérifier le réglage vous allez visualiser les franges d'interférence sur le mur en aval. Vous schématiserez sur vos comptes rendus, le dispositif mis en place.

3.2.2 Visualisation des franges d'interférence

Pour cela on utilise l'objectif de visualisation des franges.

- Placez l'objectif dans le volume de mesure et observez la projection des franges sur le mur.
- Les franges sont-elles horizontales ou verticales ?
- Retrouvez ce résultat en utilisant les transparents représentant les fronts d'ondes.
- Quelle composante de la vitesse pouvez-vous mesurer avec ce montage ?

3.2.3 Mesure de l'interfrange i

L'interfrange est fonction de l'angle α entre les faisceaux en sortie de la lentille de convergence (éq. 2).

- Mesurez l'angle entre les deux faisceaux (utilisez la projection des faisceaux sur le mur).
- En déduire l'interfrange correspondant au réseau sélectionné.

4 Mesure de l'interfrange i sur le dispositif CA-1350

- Faire les réglages nécessaires sur le banc CA-1350, afin d'obtenir un réseau de franges d'interférences. Pour cela, consulter l'annexe à disposition.
- Mesurez l'angle entre les deux faisceaux
- En déduire l'interfrange

5 Mesure de vitesse sur le disque d'évaluation

Le disque d'évaluation est un disque tournant à vitesse constante dans les deux sens. Il va permettre d'effectuer des mesures simples de vitesse de déplacement d'un solide en diffusion avant. Il sera nécessaire de mesurer la position du volume de mesure par rapport au centre du disque si on veut vérifier la vitesse en ce point par rapport à la vitesse angulaire du disque. Pour fixer une vitesse, ouvrir le logiciel PolluxTerm et voir les indications sur banc TP.

5.1 Estimation de la vitesse angulaire du disque

- Comparer la vitesse angulaire du disque fixée sur le PC (logiciel Polluxterm) avec une mesure faite à l'aide du tachymètre (celui-ci sera placé à l'avant du disque) et une mesure obtenue manuellement (en utilisant un chronomètre).
- Le diamètre du disque est de 6.5 cm, quelle est la gamme de vitesse que l'on cherche à mesurer ?

5.2 Mesures pour plusieurs vitesses de rotation angulaire

Pour plusieurs valeurs de la vitesse angulaire fixées sur l'ordinateur, déterminer la vitesse de rotation au niveau du volume de mesure (qui n'est pas la vitesse angulaire), en déterminant la fréquence du signal obtenu sur l'écran de l'oscilloscope. Il est fortement recommandé d'utiliser la fonction run/stop qui permet un arrêt sur image dès qu'un signal bien régulier apparaît. Pour plus de précision, il est possible de mesurer par exemple l'intervalle de temps correspondant à plusieurs périodes en utilisant 2 curseurs. Ou encore, en mode « acquisition », sélectionner « moyennage » et 128 moyennes. Puis passer en mode « mesures » et utiliser deux curseurs pour mesurer comme précédemment le temps correspondant à plusieurs périodes.

5.3 Changement de sens de rotation du disque

- Inverser le sens de rotation et mesurez la fréquence sur l'oscilloscope, en déduire la vitesse
- Vos mesures dépendent-elles du sens de la vitesse ?

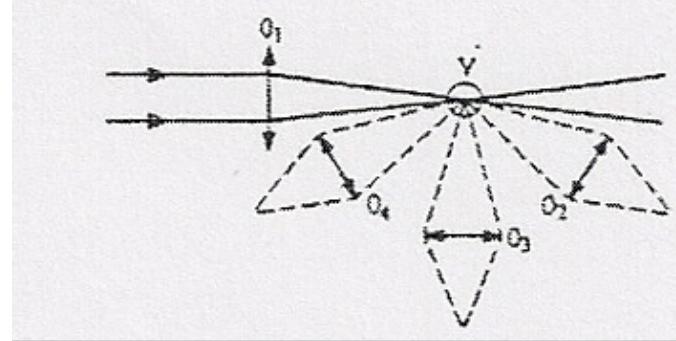


FIGURE 5 – Les trois positions pour collecter la lumière diffusée

6 Premières approches d'un signal Doppler réel (partie facultative)

6.1 Observation de la lumière diffusée

- Sur l'ancien banc optique, avec un brumisateur, observer la lumière diffusée dans 3 directions ;
- Orientez le jet sur le volume de mesure
- Observez le signal en rétrodiffusion, en diffusion avant et à 90 ° (figure 5)
- Dans quelle position le signal est-il le plus intense ?

Les lois de diffusion de Mie s'appliquent aux particules submicroniques de taille voisine de celle de la lumière qui les éclairent. La théorie de Mie indique que la lumière diffusée vers l'avant est maximale, que la lumière rétrodiffusée est 10^3 fois moins intense (ce qui conduit à une réduction du rapport signal sur bruit d'un facteur 30), et que finalement la lumière diffusée à 90 ° est minimale.

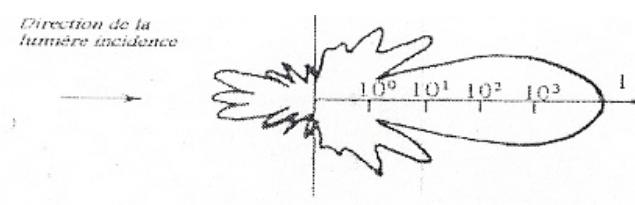


FIGURE 6 – Lumière diffusée par une particule

CONDUCTION THERMIQUE DANS UNE BARRE

I. Objectifs

L'objectif de cette séance est de permettre une première approche du phénomène de conduction thermique, en configuration monodimensionnelle, dans différents métaux. L'analogie 'électrique-thermique' permettra d'introduire la notion de résistance thermique. En régime stationnaire, la conductivité thermique de deux métaux sera mesurée. En configuration instationnaire, la notion de temps diffusif sera abordée, en lien avec le temps de stabilisation d'un système (une barre à deux métaux en série) entre deux états stationnaires.

II. Quelques notions

A. Rappel de calorimétrie, énergie (ou puissance) interne stockée

L'énergie E_{stock} (en J) nécessaire pour éléver le volume V d'un matériau de masse m depuis la température initiale T_{ini} jusqu'à la température finale T_{fin} dépend de sa capacité calorifique massique (ou 'chaleur spécifique') C_p :

$$E_{stock} = mC_p(T_{fin} - T_{ini}) = \rho C_p V(T_{fin} - T_{ini}) \quad Eq. 1$$

La masse volumique ρ est en kg/m³ et la capacité calorifique massique C_p est en J/kg.K. On dit que cette énergie interne est stockée dans le volume V . La puissance (en W) constante nécessaire pour stocker cette énergie pendant la durée Δt est $E_{stock} / \Delta t$. On appelle $C_{th} = mC_p$ la capacitance du volume V , en J/K. Si on considère maintenant l'écoulement d'un fluide (comme l'eau froide dans la boîte à eau du TP) au débit massique¹ \dot{m} qui passe de la température d'entrée $T_{entrée}$ à la température de sortie T_{sortie} , la puissance P_{fluide} (en W) stockée par le fluide s'écrit :

$$P_{fluide} = \dot{m}C_p(T_{sortie} - T_{entrée}) = \rho C_p \dot{q}(T_{sortie} - T_{entrée}) \quad Eq. 1a$$

B. Loi de Fourier

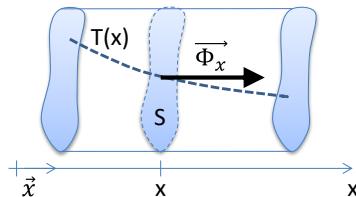


Figure 1: vecteur flux conductif en x , en configuration monodimensionnelle pour un champ de température $T(x)$

¹ $\dot{m} = \rho \dot{q}$ où \dot{q} est le débit volumique en m³/s

Lorsqu'il existe un gradient de température $T(x)$ dans un matériau immobile, en chaque position x existe un flux d'énergie interne dirigé de la région chaude vers la région froide $\vec{\Phi}_x$. En première approximation, le vecteur flux d'énergie interne qui traverse la section S (en m^2) est proportionnel au gradient de température qui lui donne naissance et est donc dirigé dans la direction opposée à ce gradient. Il s'exprime par la loi de Fourier :

$$\vec{\Phi}_x = -k S \vec{\text{grad}}(T) \quad \text{Eq. 2}$$

$$\vec{\Phi}_x = \Phi_x \vec{x} = -k S \frac{dT}{dx} \Big|_x \quad \text{Eq. 3}$$

$$\varphi_x = \varphi_x \vec{x} = \frac{\Phi_x}{S} \vec{x} = -k \frac{dT}{dx} \Big|_x \quad \text{Eq. 4}$$

La conductivité thermique k s'exprime en $W/m.K$, le flux Φ_x en W , la densité de flux φ_x en W/m^2 . Quelques conductivités thermiques usuelles figurent dans le classeur de données fourni sur place.

C. Equation de la chaleur

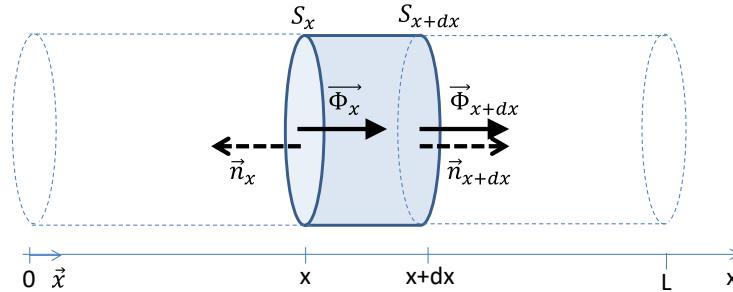


Figure 2 : bilan des flux sur une tranche de volume dV , d'épaisseur dx , de température $T(x)$. Les seules frontières de dV qui sont le siège d'échanges conductifs avec les tranches voisines sont les sections S_x et S_{x+dx} . Chacune est orientée par sa normale dirigée vers l'extérieur du volume, \vec{n}_x et \vec{n}_{x+dx} . Les surfaces latérales sont supposées isolées.

Dans le cas d'un matériau sans source interne de production de chaleur ($p=0 W/m^3$), en transfert monodimensionnel selon x , le bilan d'énergie interne de la tranche de volume dV isolée sur ses faces latérales (voir Figure 2) s'écrit :

$$\begin{aligned} \text{Puissance produite} &= \text{Puissance stockée} + \text{Puissance échangée aux} \\ \text{dans } dV & \text{dans } dV \quad \text{frontières } S_x \text{ et } S_{x+dx} \end{aligned} \quad \text{Eq. 5}$$

$$0 = \rho C_p dV \frac{\partial T}{\partial t} + S_x \varphi_x \vec{x} \cdot \vec{n}_x + S_{x+dx} \varphi_{x+dx} \vec{x} \cdot \vec{n}_{x+dx} \quad \text{Eq. 6}$$

Avec $S_x = S_{x+dx}$, $dV = S_x \cdot dx$, l'expression des densités de flux φ_x et φ_{x+dx} données par l'Eq. 4 on obtient :

$$0 = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_x \quad \text{Eq. 7}$$

$$0 = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad \text{Eq. 8}$$

Si la conductivité k est indépendante de la température, on obtient :

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Eq. 9}$$

Le nouveau paramètre a est la diffusivité thermique en m^2/s , définie par :

$$a = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{Eq. 10}$$

Pour être résolue, l'Eq. 9 devra être associée à deux conditions aux limites (en $x=0$ et $x=L$) et une condition initiale, par exemple uniforme $T(x, t=0) = T_{ini}$. Différentes méthodes de résolution existent pour l'équation 9 (séparation des variables, transformée de Laplace, Transformée de Fourier), elle sera résolue par la méthode des quadripôles thermiques dans une feuille Excel fournie en TP.

Si enfin on considère l'état stationnaire (températures et flux ne dépendent pas de la température, le terme de stockage disparaît), le Laplacien Δ_x du champ de température est nul :

$$\Delta_x T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad \text{Eq. 11}$$

Quelles que soient ces conditions aux limites associées à cette dernière équation, le profil de température $T(x)$ en régime stationnaire dans un matériau sans source interne, en transfert monodimensionnel, et dont les propriétés sont indépendantes de la température, est linéaire :

$$T(x) = A.x + B \quad \text{Eq. 12}$$

Si le profil n'est pas linéaire c'est que l'une des hypothèses ci-dessus est mise en défaut. Si les conditions aux limites sont celles de l'expérience du TP :

- En $x=0$, flux imposé : $\Phi_{x=0} = -kS \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = P_0$
- En $x=L$, échange convectif imposé avec un fluide à T_f et un coefficient d'échange h_{conv} ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) :

$$-kS \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = h_{conv} S [T(x=L) - T_f]$$

On a alors pour cette combinaison de conditions aux limites la solution suivante pour le profil $T(x)$:

$$T(x) = \frac{P_0}{kS}(L-x) + T_f + \frac{P_0}{h_{conv}S} \quad \text{Eq. 13}$$

D. Résistance thermique

En régime stationnaire, en transfert monodimensionnel, pour une tranche de matériau de section S , d'épaisseur $e=x_2-x_1$, sans source interne, traversé par le flux Φ (voir Figure 3), puisque le profil de température est linéaire, la loi de Fourier s'écrit :

$$\Phi = -kS \frac{\partial T}{\partial x} = -kS \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e}{kS}} \quad \text{Eq. 14}$$

$$\text{ou encore } T_1 - T_2 = \frac{e}{kS} \Phi \quad \text{Eq. 15}$$

En assimilant la différence de température $T_1 - T_2$ à une différence de potentiel, et le flux Φ au courant électrique, la loi d'Ohm s'écrit :

$$T_1 - T_2 = R_{th} \Phi \quad \text{Eq. 16}$$

$$R_{th} = \frac{e}{kS} \quad \text{Eq. 17}$$

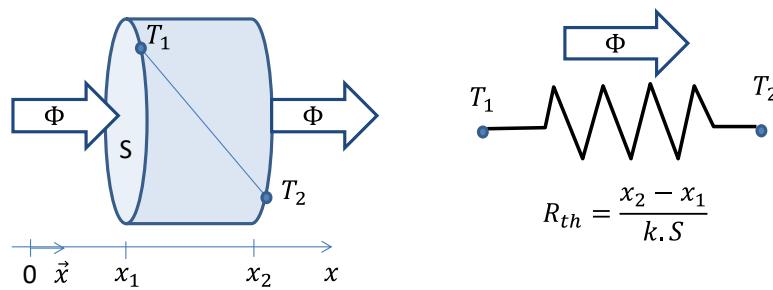


Figure 3 : analogie électrique-thermique donnant la résistance thermique R_{th} d'une tranche de matière de section S , conductivité k , épaisseur $e=x_2-x_1$. Son unité est K/W . La densité de résistance $r_{th}=S.R_{th}$ est en m^2K/W .

L'éq.17 définit la résistance thermique de la tranche de matière de section S , conductivité k et épaisseur $e = x_2 - x_1$. Le schéma électrique équivalent est représenté sur la droite de la Figure 3. Les combinaisons de résistances classiques en électricité sont applicables avec les résistances thermiques, notamment la mise en série de plusieurs résistances thermiques représentant différentes épaisseurs de différents matériaux parcourus successivement par le même flux :

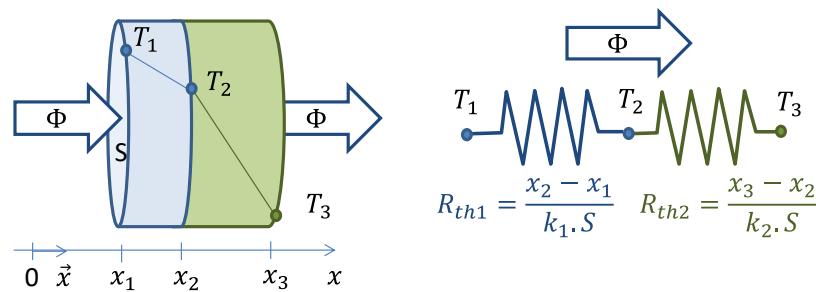


Figure 4 : mise en série de résistances thermiques

Il est bien sûr possible de calculer une résistance thermique équivalente entre les deux 'potentiels' T_1 et T_3 égale à la somme des résistances en présence : $R_{th,eq}=R_{th1} + R_{th2}$. Il existe un type particulier de résistance qui modélise un contact imparfait entre deux sections de passage du flux : la résistance de contact R_c .

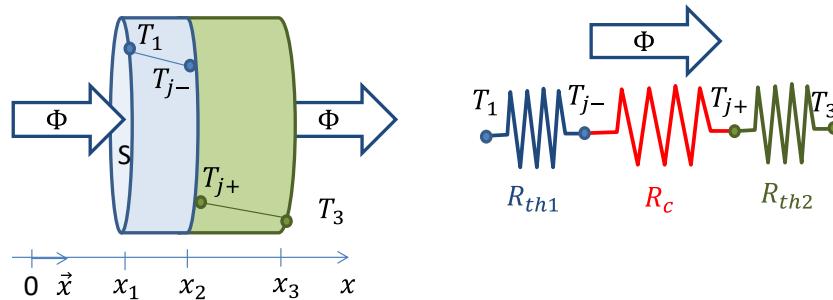


Figure 5 : modélisation d'un contact imparfait par une résistance thermique supplémentaire

Ce type de résistance ne présente aucune épaisseur, elle est infiniment fine et implique donc un saut brusque de température de T_j^- à T_j^+

au passage du matériau 1 au matériau 2. Lorsque les matériaux en contacts sont des bons conducteurs de chaleur (métaux), même de forte épaisseur, il est possible que la résistance de contact soit bien plus importante que la résistance des tranches de métaux elles-mêmes.

Remarque : il est aussi possible de décrire l'échange convectif entre la surface S d'un matériau à la température T_p et un fluide à la température T_f en utilisant l'analogie électrique :

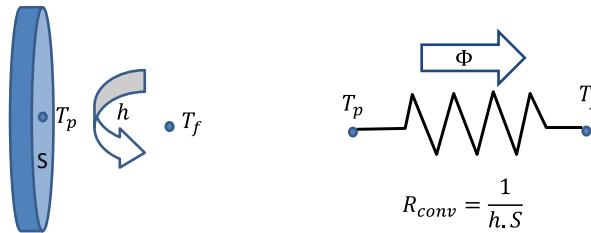


Figure 6 : analogie électrique pour la description d'un échange convectif, h est le coefficient d'échange convectif

En effet le flux échangé s'écrit :

$$\Phi = hS(T_p - T_f) = \frac{T_p - T_f}{\frac{1}{hS}} \quad \text{Eq. 18}$$

Donc la résistance de convection s'écrit :

$$R_{conv} = \frac{1}{hS} \text{ en K/W ou } r_{conv} = \frac{1}{h} \text{ en m}^2\text{K/W} \quad \text{Eq. 19}$$

III. Dispositif expérimental

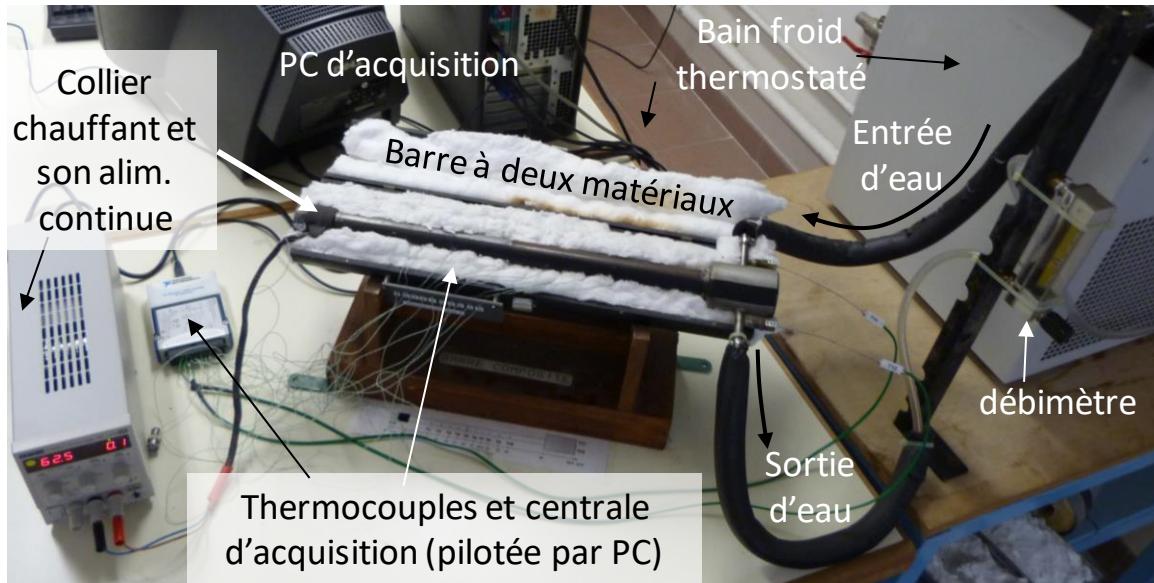


Figure 7 : photo du dispositif expérimental. La barre étudiée est composée de deux barres métalliques : duralumin côté chaud et cuivre côté froid. La jonction entre les deux est effectuée par vissage de l'une dans l'autre, le contact n'est pas parfait.

L'étude de la conduction thermique s'effectue ici sur une barre cylindrique composée de deux barres métalliques mises en contact en vissant l'une dans l'autre sur quelques millimètres. Le premier métal est du duralumin (alliage d'aluminium (95%), cuivre (4%) et magnésium (1%)), le second métal est du cuivre. Le côté gauche de la barre de duralumin est entouré d'un collier chauffant alimenté par un courant continu de puissance réglable par l'intermédiaire d'une alimentation continue, qui affiche la tension aux bornes du collier chauffant et le courant qui le traverse. Le côté droit de la barre de cuivre est en contact, dans une boîte à eau, avec une circulation d'eau venant d'un bain thermostaté réglé autour de 10°C. Un débitmètre placé en sortie de la boîte à eau permet de mesurer le débit volumétrique d'eau.

La partie inférieure de la barre est posée sur un isolant fibreux, limitant les échanges avec l'environnement sur cette surface. La surface supérieure de la barre n'est pas entourée d'isolant et des échanges sont alors possibles avec son environnement.

La barre est instrumentée de plusieurs thermocouples de type K numérotés dont la position le long de la barre est repérée sur le montage par rapport au début de la barre. Chaque thermocouple est positionné au fond d'un trou percé radialement dans la barre jusqu'à son centre. Deux thermocouples mesurent la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de la boîte à eau. Tous les thermocouples sont reliés à un module de conversion (effectuant la compensation de soudure froide) et d'acquisition qui est lui-même relié à un PC.

Le PC est équipé d'un logiciel d'acquisition multivoies qui effectue l'acquisition, l'enregistrement et l'affichage en temps réel (avec un pas de temps de 5s) des signaux de températures soient 10 thermocouples entre le collier chauffant et la boîte à eau, 1 thermocouple supplémentaire (n°13) à l'extrémité chaude du duralumin à gauche du collier chauffant, et 2 thermocouples pour la boîte à eau (n°11 et 12).

IV. Travail préparatoire

Voir le travail de préparation demandé sur AMETICE

V. Travail à effectuer

A. A l'arrivée en séance

A l'arrivée en séance, le collier chauffant a déjà été mis en marche avec une certaine puissance ainsi que la circulation d'eau froide dans la boite à eau.

- 1) Vérifier que le régime est stationnaire : toutes les températures et les puissances doivent être fixes.
- 2) Relever sur l'alimentation continue la tension U aux bornes de la résistance du collier chauffant ainsi que le courant I qui la parcourt.
- 3) Relever le débit volumique d'eau dans la boite à eau ainsi que les températures d'eau à l'entrée et à la sortie de la boite sur le logiciel.
- 4) Relever les températures des 10 thermocouples placés entre le collier chauffant et la boîte à eau.
- 5) Après que l'enseignant ait validé vos mesures, lancer la procédure de démarrage de la phase instationnaire : arrêter l'acquisition en cours et effacer le journal, démarrer un nouvel enregistrement pendant quelques secondes puis faire passer la tension d'alimentation du collier chauffant de 65V à 110 V. Relever l'heure à laquelle ce changement a été effectué : c'est l'instant initial de la phase instationnaire.
- 6) Quitter l'expérience en cours pour effectuer plusieurs simulations instationnaires sous Excel. Vos mesures seront exploitées plus tard.

B. Régime instationnaire - Simulations

Lancer le fichier Excel ‘TP_conduction_Simulation_date.xls’ et l'enregistrer sous un nouveau nom dans lequel ‘date’ est remplacé par la date du jour. Ce fichier vous permet de contrôler les paramètres qui agissent sur l'évolution de température au cours du temps d'une barre hétérogène de section S (en m^2 , cellule M2) composée de deux barres en série et en mauvais contact, initialement isothermes à la température T_{ini} (cellule M5). A $t=0$, une puissance thermique P_0 (en W, cellule A10) est imposée en $x=0$ et un échange convectif (coefficients h en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, cellule M3) est imposé en $x=e_1+e_2$ avec de l'eau à la température T_{eau} (cellule M4).

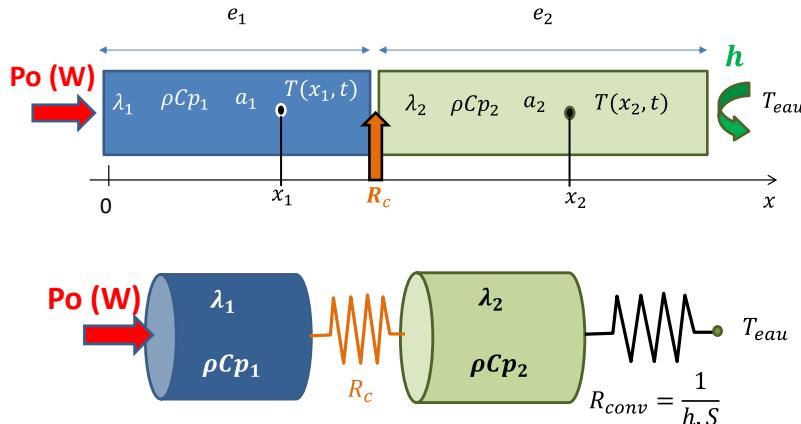


Figure 8 : schéma physique du système ‘barre composite avec échange fluide en face arrière’ et schéma électrique correspondant en situation instationnaire : les deux barres ne sont alors plus des résistances pures comme dans le cas stationnaire puisqu’elles sont également capacitatives.

Ce fichier vous permet de simuler les évolutions de température théoriques enregistrées par deux thermocouples (TC, qui donnent des ‘thermogrammes’), l’un placé dans la première barre à la position x_1 (cellule D13), l’autre dans la deuxième barre à la position x_2 (cellule I13). C’est le suivi du second TC qui permettra de quantifier le temps de stabilisation à 99% (calculé en cellule O19 par analyse automatique du thermogramme tracé sur le Graphe 2). Le TC2 sera donc placé loin de la source de chauffage, en bout de barre 2 ($x=7/8$ de (e_1+e_2)). Les deux thermogrammes $T(x_1,t)$ et $T(x_2,t)$ sont tracés sur le graphe 1 sur 200 points séparés d’un **pas de temps dt** (cellule M6) à ajuster pour être **sûr d’atteindre l’état stationnaire**. Les thermogrammes adimensionnés (échauffements adimensionnés par leur valeur stationnaire finale $\theta_{stat}(x_i)=T_{stat}(x_i)-T_{ini}$, $i=1$ ou 2) sont compris entre 0 et 1, ils sont calculés par l’équation suivante :

$$\theta_i^*(t) = \frac{\theta(x_i, t)}{\theta_{stat}(x_i)} = \frac{T(x_i, t) - T_{ini}}{T_{stat}(x_i) - T_{ini}}, \quad i=1,2 \quad \text{Eq. 20}$$

$T_{stat}(x_i)$ est la température du thermocouple i à l’état stationnaire et $\theta_{stat}(x_i)$ est l’échauffement mesuré en i à l’état stationnaire, par rapport à l’état initial.

Temps de stabilisation

Le système étudié n'est en réalité pas purement diffusif, puisque la barre solide est en échange convectif sur sa face arrière ($x=e_1+e_2$). Ainsi, lorsque la puissance P_0 change en face avant, le temps de stabilisation des températures dans le barreau dépendra de la ‘qualité’ du transfert dans la partie solide (barre 1 + contact + barre 2, résistance $R_{th_1} + R_c + R_{th_2}$, voir eq. 17 et Fig. 5) mais aussi de la ‘qualité’ de l’échange convectif en bout de barre (résistance $1/hS$, voir eq. 19 et Fig. 6). L’ordre de grandeur du temps de stabilisation τ d’un tel système peut être estimé par le produit $R_{th}C_{th}$ de sa résistance totale R_{th} (incluant la résistance convective) et de sa capacitance totale C_{th} . **ATTENTION : il s’agit du système homogène équivalent. Vos simulations devront démontrer si on peut toujours utiliser cette valeur**

$R_{th}C_{th}$ comme un prédicteur correct du temps de stabilisation, notamment en fonction de la répartition des différentes résistances et capacités dans la barre. Il s'écrit (cellule O18):

$$\begin{aligned}\tau &= R_{th}C_{th} = \left(R_{th_1} + R_c + R_{th_2} + \frac{1}{hS} \right) (m_1 C_{p_1} + m_2 C_{p_2}) \\ &= \left(\frac{e_1}{k_1 S} + R_c + \frac{e_2}{k_2 S} + \frac{1}{hS} \right) (\rho_1 C_{p_1} e_1 S + \rho_2 C_{p_2} e_2 S) \quad eq. 21\end{aligned}$$

Les valeurs extrêmes possibles du temps de stabilisation sont données en Annexe. Vous effectuerez vos simulations dans la situation d'un solide thermiquement épais (donc limité par la diffusion dans la barre et non par la convection en bout de barre supposée très bonne), sauf la simulation n°7 où la résistance convective en bout de barre sera prise en compte.

Réalisez les 7 simulations demandées qui figurent sur une feuille fournie en TP et en version pdf **A DEPOSER SUR AMETICE A LA FIN DU TP**. Le coefficient d'échange en bout de barre (cellule M3) doit être très grand (**2.5.10⁷W/m²K**) pour simuler un excellent échange avec l'eau, sauf à la simulation n°7 (**h=2.5.10³W/m²K** conforme au TP). Seules quelques cellules sont à modifier pour chaque simulation (en blanc encadrées en rouge). Les temps diffusifs figurent en cellules D18 et I18. Le produit ($R_{th} * C_{th}$) total figure en cellule O15. Les énergies stockées sont en cellules D21, I21 et O21. Vos commentaires dans le tableau des simulations doivent aborder les points suivants, par famille de simulations :

- I) Famille 1 (simulations 1 et 2) : Barre homogène : influence de la **longueur** sur le temps de stabilisation ?
- II) Famille 2 (simulations 3 et 4) : Barre homogène mais avec défaut (mauvais contact) : influence de la **position du défaut** ('proche' ou 'loin' de la source de chauffage) sur le temps de stabilisation ? Comparaison avec la simulation 2 ? Expliquer comment ces deux situations peuvent permettre d'expliquer l'inertie d'un bâtiment dont les parois sont isolées par l'intérieur ou par l'extérieur : si les deux bâtiments sont initialement à la température extérieure, lequel des deux bâtiments sera plus rapide à chauffer ? Justifier.
- III) Famille 3 : (simulations 5 et 6) : Barre hétérogène : influence de l'**ordre des matériaux** sur le temps de stabilisation ?
- IV) Simulation 7 : influence du **mauvais échange convectif** en bout de barre sur le temps de stabilisation ? Vérifier que l'ordre de grandeur du temps de stabilisation correspond à l'expérience réelle du TP.

Question récurrente à chaque simulation : Est-ce que $(R_{th}C_{th})_{total}$ est toujours un bon prédicteur du temps de stabilisation ?

Conseil pour aider aux interprétations : observez bien les niveaux d'énergie stockée dans chaque couche pour comprendre les variations du temps de stabilisation pour chaque simulation.

C. Régime stationnaire – Exploitation de vos mesures du début de séance

A l'arrivée en séance, le collier chauffant a déjà été mis en marche avec une certaine puissance ainsi que la circulation d'eau froide dans la boite à eau.

- 1) Calculer la puissance électrique P_0 (en W) qui est dissipée par la résistance chauffante en début de barre
- 2) Calculer la puissance thermique P_{eau} (en W) perdue par la barre et reçue par l'eau en bout de barre.
- 3) Pourquoi y a-t-il une différence entre P_0 et P_{eau} ? Laquelle des deux puissances a réellement traversé la barre ?
C'est celle-ci qui devra être utilisée pour les calculs de la suite.
- 4) Tracer le profil de température $T(x)$ sous Excel. Que valent les températures à gauche et à droite de la jonction des deux métaux, T_j^- et T_j^+ ?
- 5) L'allure du profil de température dans la barre vous permet-elle de valider l'hypothèse d'absence de pertes latérales ? Comment savoir visuellement avec ce graphe, lequel des deux métaux (duralumin et cuivre) est le plus conducteur de chaleur ?
- 6) Connaissant la puissance qui traverse la barre et le profil de température dans chaque métal, calculer avec la loi de Fourier la conductivité de chaque métal. Les comparer aux valeurs théoriques présentes dans le classeur fourni.
- 7) Calculer la résistance thermique de contact entre les deux métaux. La comparer aux résistances thermiques des deux barres de duralumin et de cuivre.
- 8) La puissance chauffante est maintenant supérieure à celle du début de séance, comment se placera le tracé du second régime stationnaire par rapport au premier ? Bien indiquer si les nouvelles droites sont au-dessus ou au-dessous des précédents et si les pentes sont modifiées.

Annexe

Les deux situations extrêmes pour des solides en régime instationnaire en présence de convection sont les suivantes :

Solide thermiquement mince	Solide thermiquement épais
$\frac{R_{conductive}}{R_{convective}} \ll 1 \Leftrightarrow (R_{th_1} + R_c + R_{th_2}) \ll \frac{1}{hS}$	$\frac{R_{conductive}}{R_{convective}} \gg 1 \Leftrightarrow (R_{th_1} + R_c + R_{th_2}) \gg \frac{1}{hS}$
Description : la chaleur est diffusée (ou ‘conduite’) ‘sans difficulté’ dans le solide mais est mal transférée au fluide en bout de barre. La partie ‘lente’ du transfert sera donc l’échange convectif : on dit que le système est ‘limité par la convection’, c’est elle qui impose le temps de stabilisation.	Description : la chaleur est diffusée ‘avec difficulté’ dans le solide mais est très bien transférée au fluide en bout de barre. La partie ‘lente’ du transfert sera donc cette fois l’échange diffusif dans le solide : on dit que le système est ‘limité par la diffusion’, c’est elle qui impose le temps de stabilisation.
Conséquence : le solide est quasiment isotherme à chaque instant (donc ‘thermiquement mince’) et le temps de stabilisation sera donc très dépendant du coefficient d’échange.	Conséquence : fort gradient de température le long du solide à chaque instant et température en bout de barre proche de celle-du fluide (le fluide y ‘impose’ sa température).
Temps de stabilisation : $\tau \rightarrow \left(\frac{1}{hS} \right) (\rho_1 C_{p_1} e_1 S + \rho_2 C_{p_2} e_2 S)$ <p>Si la barre 2 est de même nature que la barre 1 ($\rho_1 C_{p_1} = \rho_2 C_{p_2}$) :</p> $\tau \rightarrow \left(\frac{\rho_1 C_{p_1} (e_1 + e_2)}{h} \right)$ <p>c’est le ‘temps convectif’ d’une barre homogène de longueur $e_1 + e_2$. Dans ce régime, le système sera ‘rapide’ si l’échange convectif est bon (h fort) et si le matériau est faiblement capacitif.</p>	Temps de stabilisation : $\tau \rightarrow \left(\frac{e_1}{k_1 S} + R_c + \frac{e_2}{k_2 S} \right) (\rho_1 C_{p_1} e_1 S + \rho_2 C_{p_2} e_2 S)$ <p>Si la barre 2 est de même nature que la barre 1 ($\rho_1 C_{p_1} = \rho_2 C_{p_2}$ et $k_1 = k_2$) et en bon contact ($R_c = 0$):</p> $\tau \rightarrow \left(\frac{(e_1 + e_2)^2}{a_1} \right) \text{ avec } a_1 = \frac{k_1}{\rho_1 C_{p_1}}$ <p>on retrouve le ‘temps diffusif’ d’une barre homogène de longueur $e_1 + e_2$ (travail préparatoire). Dans ce régime, le système sera rapide si la diffusivité a_1 est forte et si sa longueur totale est faible. Si la longueur est doublée, le temps de stabilisation est quadruplé.</p>

Rayonnement thermique

L'objectif de cette séance de T.P. est d'illustrer divers aspects du transfert de chaleur par rayonnement. On s'intéressera ainsi à la variation du flux radiatif quittant une surface en fonction de sa nature, son état de surface et sa température. On s'intéressera en outre à l'influence d'un écran en verre.

1 Quelques notions

1.1 Généralités

Tout corps à une température absolue $T > 0$ K émet un rayonnement de nature électromagnétique dit rayonnement thermique parce que fonction de T . Cette émission d'onde électromagnétiques est une conversion d'énergie interne du matériau en énergie radiative, l'émission a donc tendance à refroidir le matériau émetteur. Ce rayonnement ne concerne qu'une portion restreinte du spectre électromagnétique (de $0.1 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$) comprenant, par ordre croissant de longueur d'onde, les domaines ultra-violet, visible et infrarouge.

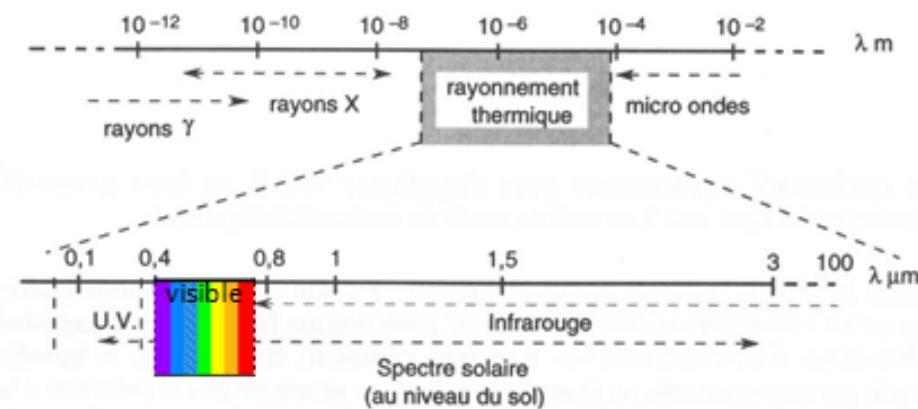


FIGURE 1 – Situation du rayonnement thermique dans le spectre électromagnétique

Contrairement aux autres modes de transferts thermiques (conductif et convectif), le mode radiatif ne nécessite pas de support matériel pour se manifester. Il se propage en outre en ligne droite dans un milieu d'indice optique constant. La taille et la position relative des surfaces émettrices et réceptrices impliquées dans un échange radiatif seront ainsi très importantes pour évaluer la puissance échangée entre ces surfaces par rayonnement.

1.1.1 Le corps noir

La température absolue et la longueur d'onde sont également des grandeurs agissant sur le flux radiatif émis par un corps. Ainsi, Planck a établi l'expression de la puissance M_λ^0 émise par un élément de surface d'un *radiateur idéal* (*le corps noir*), qui, à une température donnée, possède la propriété d'émettre le flux maximum), dans le demi-espace qui lui fait face¹, par unité de longueur d'onde λ et en fonction de la température :

$$M_\lambda^0 (W m^{-2} \mu m^{-1}) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1}, C_1 = 3,741 \cdot 10^8 W m^{-2} \mu m^4 m^{-2}, C_2 = 14\,388 \mu m K \quad (1)$$

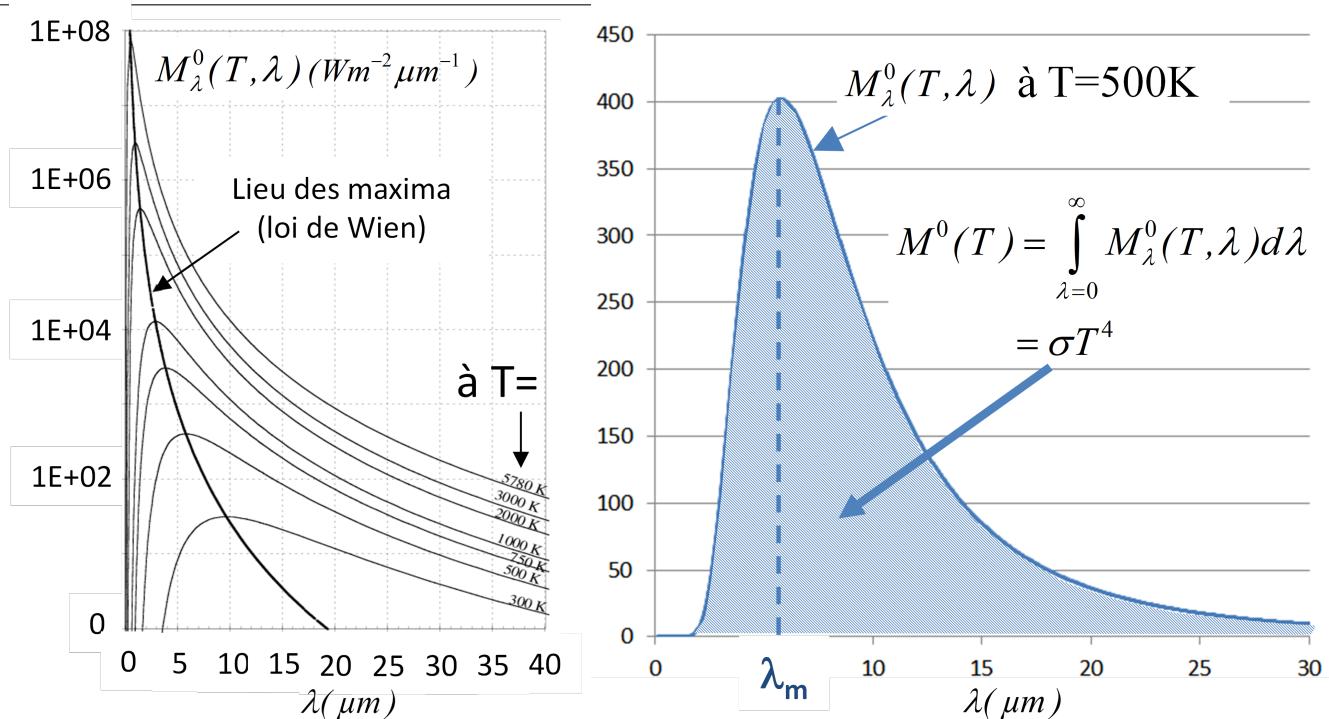


FIGURE 2 – A Gauche : flux hémisphérique émis par le corps noir en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures (Loi de Planck). L'axe des ordonnées est en échelle logarithmique pour permettre d'afficher d'une large gamme de valeurs. A droite : obtention de la loi de Stefan-Boltzmann ($M^0(T) = \sigma T^4$ en $W m^{-2}$) par intégration de la loi de Planck sur tout le spectre.

Cette loi est tracée en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures sur la figure 2. Ce graphe montre que, pour chaque température, il existe une longueur d'onde λ_m pour laquelle la puissance émise est maximale. Si la température augmente, cette longueur d'onde décroît selon la première loi de Wien (avec λ_m en μm) :

$$\lambda_m T = 2\ 898\ \mu m K \quad (2)$$

On montre en outre que la majeure partie de l'énergie (96%) est émise entre $0,5\lambda_m$ et $5\lambda_m$. Enfin, le flux total² hémisphérique émis par le corps noir à la température T s'obtient en intégrant l'équation (1) de zéro à l'infini pour obtenir la loi de Stefan-Boltzmann (figure 2, à droite) :

$$M^0(T) (W m^{-2}) = \int_{\lambda=0}^{\infty} M_\lambda^0(T, \lambda) d\lambda = \sigma T^4, \text{ avec } \sigma = 5,67 \cdot 10^8 W m^{-2} K^{-4} \quad (3)$$

En pratique l'intégration ‘totale’ (de $\lambda = 0$ à ∞) doit avoir lieu sur l'étendue utile de la fonction de Planck pour donner un résultat proche de σT^4 . Si expérimentalement, ce résultat n'est pas obtenu c'est le signe que cette intégration n'est pas réalisée correctement par le capteur de flux, par exemple parce qu'il n'est pas sensible dans la bonne gamme de longueur d'onde ou parce qu'il ne reçoit pas tout le flux qu'il doit intégrer (filtrage de certaines longueurs d'onde sur le trajet de la ligne de visée, etc...).

1.1.2 Facteur de forme

Soient 2 surfaces S_1 et S_2 (voir figure 3) qui peuvent rayonner l'une vers l'autre. Le facteur de forme $F_{1 \rightarrow 2}$ correspond à la fraction (entre 0 et 1) du flux partant de S_1 qui va atteindre S_2 ³.

1. c'est-à-dire dans un angle solide correspondant à un hémisphère, soit 2π stéradians.
2. c'est-à-dire concernant l'ensemble du spectre.
3. en supposant que ce flux soit rayonné (par émission ou réflexion) de façon diffuse (donc avec la même luminance $L(W/msr)$ dans toutes les directions)

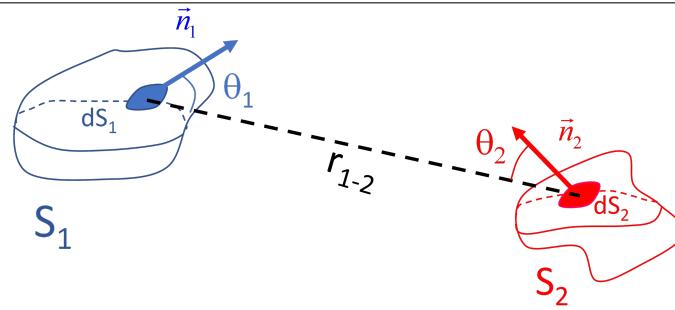


FIGURE 3 – Données géométriques nécessaires au calcul du facteur de forme $F_{1 \rightarrow 2}$ entre S_1 et S_2

C'est une grandeur purement géométrique (voir équation (4)).

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{\text{flux } (W) \text{ partant de } S_1 \text{ vers } S_2}{\text{flux } (W) \text{ partant de } S_1 \text{ partout}} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r_{1-2}^2} dS_1 dS_2 \quad (4)$$

La relation de réciprocité permet d'exprimer un facteur de forme $F_{1 \rightarrow 2}$ quand on connaît son réciproque $F_{2 \rightarrow 1}$ car ils sont liés par : $S_1 F_{1 \rightarrow 2} = S_2 F_{2 \rightarrow 1}$. Dans une enceinte fermée constituée par exemple de $N = 3$ surfaces, on a pour chaque surface S_i ($i=1$ à N) : $F_{i \rightarrow 1} + F_{i \rightarrow 2} + F_{i \rightarrow 3} = 1$ ($F_{ii} \neq 0$ si S_i est concave et peut rayonner vers elle-même (" S_i se voit")).

1.1.3 Source ponctuelle

Soit, au point O, une source ponctuelle isotrope délivrant le flux total (en W) dans tout l'espace (4π stéradians) (voir figure 4).

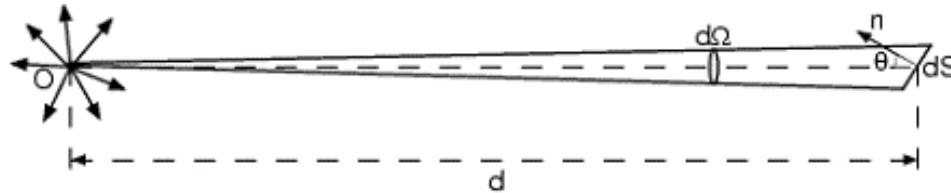


FIGURE 4 – flux reçu par un élément de surface dS venant d'une source ponctuelle en O.

L'intensité totale du flux (en Wsr^{-1}) dans n'importe quelle direction vaut alors :

$$I(Wsr^{-1}) = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (5)$$

La puissance totale reçue par un élément de surface dS placé à la distance d de la source et incliné d'un angle θ par rapport à la direction $O - dS$ vaut :

$$d\Phi(W) = Id\Omega = \frac{\Phi}{4\pi} \frac{dS \cos \theta}{d^2} \quad (6)$$

Le facteur de forme entre la source ponctuelle et la surface dS est alors un simple rapport d'angle solide (équation 7).

$$F_{O \rightarrow dS} = \frac{\text{flux } (W) \text{ partant de } O \text{ vers } dS}{\text{flux } (W) \text{ partant de } O \text{ partout}} = \frac{d\Phi}{\Phi} = \frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{dS \cos \theta}{d^2} / 4\pi \quad (7)$$

1.2 Propriétés radiatives des matériaux

Les grandeurs monochromatiques⁴ seront indiquées par la longueur d'onde λ . Les grandeurs totales ne seront pas indiquées. Un corps gris est un corps dont les propriétés radiatives sont constantes sur tout le spectre. Sauf indication, toutes les grandeurs évoquées ici sont hémisphériques.

4. c'est-à-dire pour une longueur d'onde λ donnée

1.2.1 En émission

On a vu que le corps noir avait la propriété d'être un émetteur parfait. Le pouvoir émissif de tous les corps sera comparé à cette référence idéale à travers son émissivité ϵ_λ ou ϵ , inférieure à 1. Ainsi, un corps réel à la température T émet le flux monochromatique M_λ et le flux total M tels que

$$M_\lambda(Wm^{-2}\mu m^{-1}) = \epsilon_\lambda M_\lambda^0 \quad \text{et} \quad M(Wm^{-2}) = \epsilon M^0 \quad (8)$$

1.2.2 En réception

Lorsqu'un corps reçoit un rayonnement incident, une fraction α_λ (ou α) est absorbée par le corps, une autre fraction ρ_λ (ou ρ) est réfléchie et une dernière fraction τ_λ (ou τ) est transmise⁵. Ces fractions (absorptivité, reflectivité et transmittivité) sont inférieures à 1 et la conservation de l'énergie impose :

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad \text{et} \quad \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (9)$$

Précisons qu'il existe deux types de réflexion possibles d'un flux incident par une surface : la réflexion spéculaire qui obéit aux lois optiques de la réflexion (angle d'incidence = angle de réflexion) et la réflexion diffuse (réflexion dans toutes les directions de l'hémisphère).

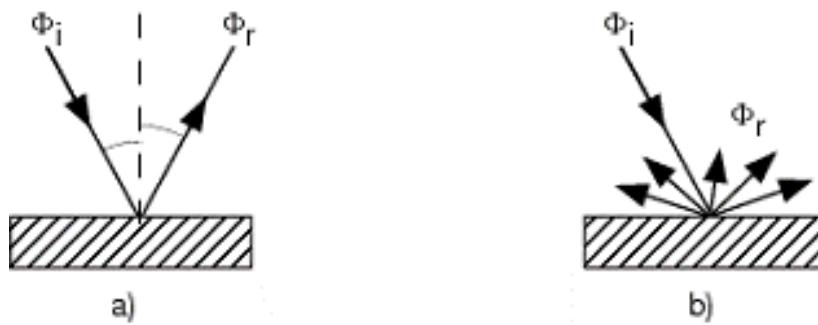


FIGURE 5 – réflexions a) spéculaire et b) diffuse.

1.2.3 Relation émission - absorption : loi de Kirchhoff

Kirchhoff a démontré que, à une température T donnée, pour une longueur d'onde λ et une direction donnée, l'émissivité *monochromatique directionnelle* d'un corps est égale à son absorptivité *monochromatique directionnelle* :

$$\epsilon'_\lambda = \alpha'_\lambda \quad (10)$$

L'extension de cette loi aux grandeurs monochromatiques hémisphériques ($\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$) est possible uniquement si l'émission et l'éclairage de la surface sont diffus. Et si de plus, le corps est gris en émission et en absorption, on peut écrire la relation (10) en grandeurs totales : $\epsilon = \alpha$. La conséquence pratique de telles relations dans le cas de corps opaques ($\tau_\lambda = \tau = 0$) compte tenu de 9 est, en fonction des hypothèses valides :

$$\epsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda \quad \text{et} \quad \epsilon = 1 - \rho \quad (11)$$

1.2.4 Flux net

On appellera ‘flux net’ au niveau d'une surface opaque S la différence suivante (en W) :

$$\Phi^{\text{net}} = \Phi^{\text{partant de } S} - \Phi^{\text{incident sur } S} = (\Phi^{\text{émis par } S} + \Phi^{\text{réfléchi par } S}) - (\Phi^{\text{absorbé par } S} + \Phi^{\text{réfléchi par } S}) \quad (12)$$

5. précisons qu'il existe en fait 4 facteurs d'émissivité, d'absorptivité et de transmittivité et 8 facteurs de reflectivité lorsque l'on prend en compte les aspects monochromatique ou total, hémisphérique ou directionnel (avec en plus, pour la réflexion, la direction d'incidence et la direction de réflexion).

$$\Phi^{\text{net}} = \Phi^{\text{émis par S}} - \Phi^{\text{absorbé par S}} \quad (13)$$

On parle de *flux radiatif perdu* par S puisque ce flux est compté positivement s'il est *perdu* par S (c'est-à-dire si S émet plus qu'elle n'absorbe).

2 Matériel

2.1 Sources radiatives

2.1.1 Basse température : cube multi-faces

Ce cube présente 4 faces latérales en aluminium chauffées par une ampoule à incandescence de 100 W placée au centre (Figure 6). La température de chacune des faces peut raisonnablement être supposée égale et uniforme. Elle est réglée en agissant sur la puissance délivrée par la lampe intérieure et est mesurée par un thermistor placé dans un coin inférieur du cube. (La courbe donnant l'évolution de la résistance du thermistor en fonction de sa température est fournie). Les 4 faces présentent un état de surface différent : peinture noire mate, peinture blanche mate, aluminium non poli, aluminium poli. Attention les faces peuvent atteindre au maximum 130 °C.

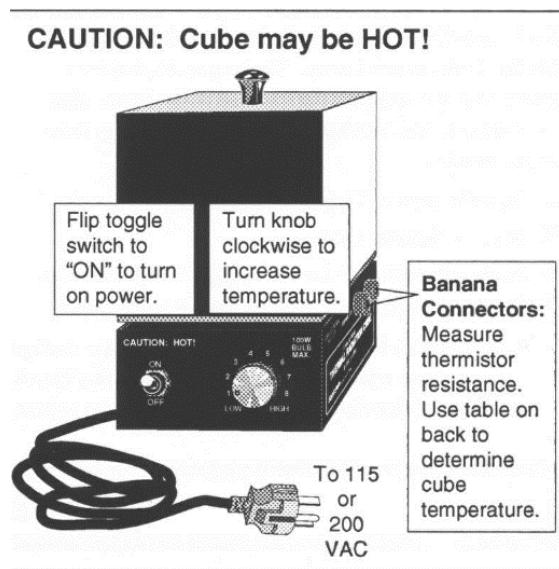


FIGURE 6 – Schéma du cube multi-faces aux quatre faces latérales différentes chauffées par une ampoule centrale.

2.1.2 Haute température : lampe à filament de tungstène

Elle est alimentée par une tension continue réglable jusqu'à 24 V au maximum pour une puissance maximale de l'ordre de 20W. La température T du filament est déterminée en mesurant précisément la tension à ses bornes et le courant qui le traverse pour en déduire sa résistance R . La formule permettant de calculer T est alors donnée par l'équation (14) avec R_a la résistance du filament à la température ambiante T_a :

$$T = -0,053(\rho_a R / R_a)^2 + 36,1(\rho_a R / R_a) + 125 \quad \text{avec} \quad \rho_a = 5,65 \mu\Omega \text{cm} \quad (14)$$

2.2 DéTECTEUR de rayonnement thermique

Le détecteur utilisé, une thermopile, est de la famille des détecteurs thermiques : il est basé sur la mesure de la variation de température de la face avant S_{capteur} d'une fine feuille métallique noircie soumise à des variations de son flux radiatif net $\Phi_{\text{capteur}}^{\text{net}}$ en face avant. Cet élément sensible est

instrumenté de plusieurs jonctions thermoélectriques en série, les jonctions *chaudes* étant placées en face avant et les jonctions de références étant maintenues à température ambiante en face arrière.

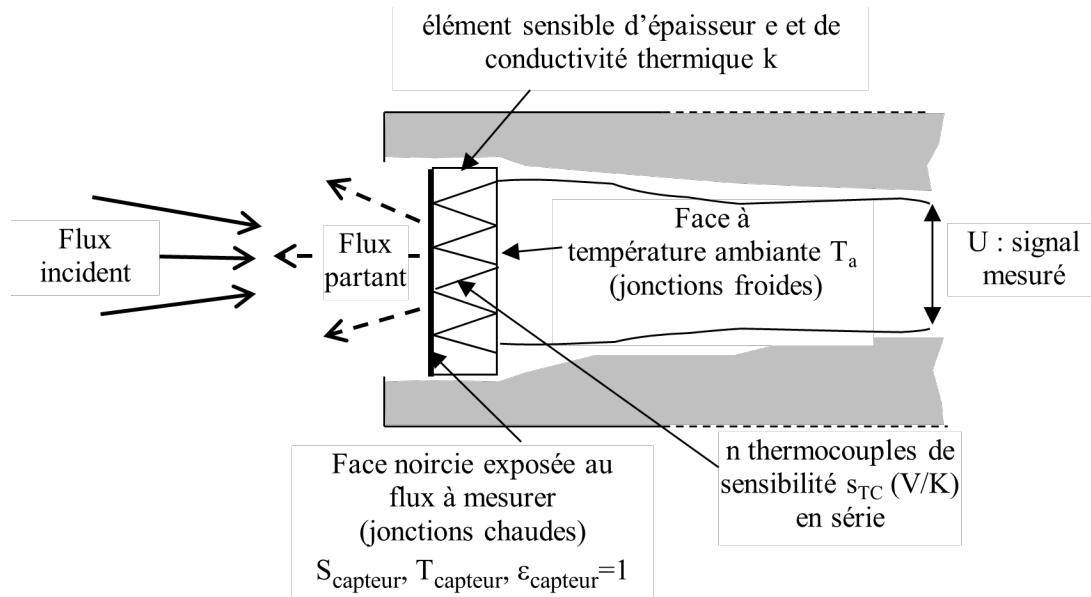


FIGURE 7 – Fonctionnement schématique de la thermopile. La température en face avant T_{capteur} reste de l'ordre de T_a fixe en face arrière car l'élément sensible est une fine feuille de métal noirce (faible résistance thermique donc le ΔT à ses bornes est faible mais mesurable grâce aux nombreux thermocouples en série).

La série de thermocouple ainsi construite délivre une variation de tension proportionnelle à la différence entre le flux incident sur la face avant et le flux partant de cette même face :

$$U(V) = s[\Phi_{\text{capteur}}^{\text{incident}} - \Phi_{\text{capteur}}^{\text{partant}}] = -s\Phi_{\text{capteur}}^{\text{net}} = s[\Phi_{\text{capteur}}^{\text{absorbé}} - \Phi_{\text{capteur}}^{\text{émis}}] = U(V) \quad (15)$$

Le flux émis par le capteur noir $\Phi_{\text{capteur}}^{\text{émis}}$ est constant si la température de la face avant T_{capteur} s'élève peu et reste donc voisine de l'ambiante T_a , ce que l'on admettra. Cette condition implique que l'**exposition de la thermopile** aux rayonnements thermiques à mesurer doit être **courte (3 secondes maximum)** pour éviter le chauffage parasite des jonctions de référence et la dérive de la mesure. Le flux absorbé par le capteur $\Phi_{\text{capteur}}^{\text{absorbé}}$ dépendra de l'objet présenté face au capteur, notamment du facteur de forme $F_{\text{capteur} \rightarrow \text{objet}}$, de T_{objet} , ϵ_{objet} etc. Ce type de détecteur, basé sur la mesure d'un phénomène thermique, a l'inconvénient d'être relativement lent (temps de réponse de l'ordre de la seconde) mais possède une réponse plate sur une large plage spectrale : entre 0.6 μm et 30 μm . Sa sensibilité est de $s = 22\text{mV/mW}$ et sa réponse est linéaire entre 10^{-6} et 10^{-1} W/cm^2 de flux incident.

Précautions

1. **Danger** : NE JAMAIS METTRE SES DOIGTS SUR LES FACES VERTICALES DU CUBE : risques de brûlures avec le Cube multi-faces (ses surfaces peuvent atteindre 130 °C). De plus, même froid, les traces de doigt modifient les propriétés radiatives des surfaces. Toujours manipuler le cube par sa base.
2. **Attention** : le filament de la lampe est détruite pour une tension à ses bornes supérieure à 25V ou une puissance supérieure à 25 W. Ne dépasser en aucun cas ces valeurs critiques.
3. **Attention** : ne jamais exposer plus de trois secondes la thermopile au flux à mesurer.

3 Travail de préparation

Voir le travail de préparation demandé sur AMETICE

4 Expériences

4.1 Approche qualitative

L'objectif est ici de se familiariser avec la notion d'émetteur et de récepteur de rayonnement ainsi que de dégager qualitativement des tendances de comportement de différentes surfaces.

4.1.1 Sensibilisation au pouvoir émissif d'une surface

Chauder un seul cube jusqu'à l'équilibre thermique en allumant son ampoule centrale à sa puissance maximale. Chaque face est un émetteur de rayonnement à température T supérieure à T_a placé dans un environnement à T_a . Utiliser la main en guise de récepteur (sans jamais toucher le cube!) successivement devant chaque face et classer alors celles-ci en fonction des impressions ressenties. En prenant comme référence les sensations éprouvées lorsque le cube est à T_a , en déduire un classement du « pouvoir émissif » des différentes surfaces.

4.1.2 Prise en main de la thermopile

Vérifier le fonctionnement de la thermopile en testant notamment le signe de la tension qu'elle délivre lorsqu'on lui présente une surface à $T < T_a$ (viser une surface intérieure du frigo présent en salle 112), $T = T_a$ (dans la pièce) et $T > T_a$ (votre main à 33°C en surface). Comparer le fonctionnement de la thermopile et le signe de la tension qu'elle délivre au fonctionnement de la main et aux sensations éprouvées dans la partie précédente.

4.1.3 Analyse des surfaces en réception

Disposer la thermopile face à une face d'un cube à T_a . Puis « éclairer » cette face avec un flux issu de la face noire d'un autre cube à T de l'ordre de 50°C (ou même de vos mains), en prenant soin de ne pas éclairer directement la surface sensible de la thermopile. Déduire des différents signaux un classement des surfaces en termes de « pouvoir réfléchissant ». En comparant ce classement à celui des « pouvoirs émissifs », indiquer quelle loi du rayonnement thermique vous venez de constater expérimentalement. Exprimer de façon générale les composantes du flux partant d'une surface à température T placée dans un environnement à T_a .

4.2 Approche quantitative

4.2.1 Influence de la nature de la surface et de sa température (à basse température)

Il s'agit ici d'appréhender le rôle de la nature de la surface rayonnante sur la puissance du flux radiatif qui la quitte à une température donnée. Le but est ici de démontrer expérimentalement la validité de la loi de Stefan-Boltzmann pour le corps noir (équation (3)) et sa modification pour un corps réel (équation (8)). On utilise pour cela le cube multi-facese dont les quatre faces sont à la même température à l'équilibre thermique. L'expérience consiste à placer le cube à différents niveaux (une dizaine) de température (T_{cube} de l'ambiance à la température max) et à relever le signal délivré par la thermopile placée successivement devant chaque face (visée à incidence normale), toujours à la même distance (le support de la thermopile venant en butée avec la base du cube, voir la figure 8 gauche).

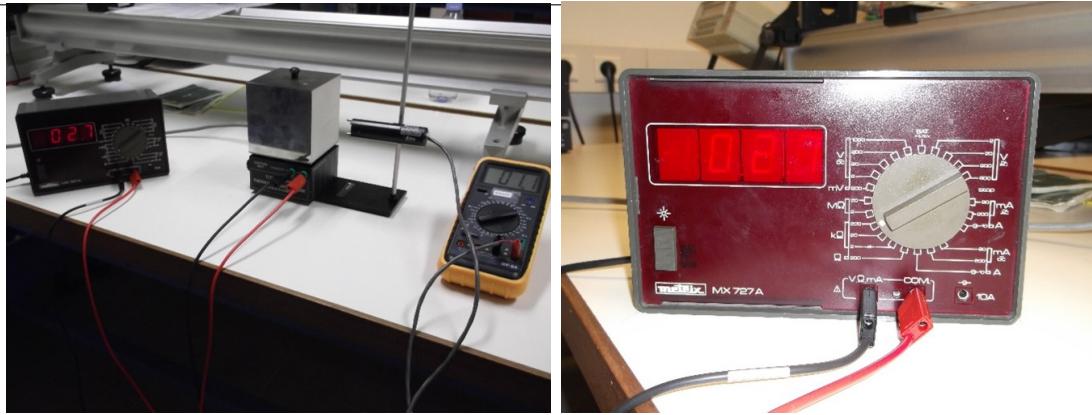


FIGURE 8 – Gauche : mesure par la thermopile face au cube multi-faces. Droite : calibre de l'ohmètre mesurant la thermistance incluse dans le cube.

Précautions, consignes

1. **Attention** : ne laisser la thermopile que 2 ou 3 secondes devant chaque face pour ne pas la surchauffer. Entre 2 sessions de mesure, exposer la thermopile à une surface à température ambiante.
2. **Consigne** : Suivre le protocole présent en séance de TP pour le pilotage de la température du cube (potentiomètre en position maximum, switch sur 'on' pour faire chauffer le cube, 'off' pour le laisser atteindre un équilibre à un niveau choisi. Viser des paliers de température séparés de 20° environ).
3. **Consigne** : Devant la face noire, une cinquième mesure sera effectuée en intercalant une lame de verre entre la thermopile et la face noire.

Détailler théoriquement chaque composante du signal U de la thermopile donné par l'équation 15. Pour cela, on suppose que le capteur est suffisamment proche du cube pour qu'il ne voit que le cube $F_{capteur \rightarrow cube} = 1$.

1. Exprimer le flux (en W) $\Phi_{capteur}^{\text{émis}}$ émis par $S_{capteur}$.
2. Exprimer le flux (en W) $\Phi_{capteur}^{\text{absorbé}}$ absorbé par $S_{capteur}$. Attention, il s'agit du flux partant de S_{cube} vers $S_{capteur}$ qui comporte plusieurs composantes (S_{cube} est à température T_{cube} , a une émissivité ϵ_{cube} et fait face à un environnement noir à T_a !). Faire apparaître le facteur de forme $F_{capteur \rightarrow cube}$.
3. Déduire des expressions précédentes que, dans cette situation, le signal de la thermopile peut se mettre sous la forme :

$$U(V) = K\sigma[T_{cube}^4 - T_a^4] \quad (16)$$

Indiquer les différents termes de la constante K .

Tracer un graphe donnant le signal $U(V)$ obtenu pour chaque face en fonction de $\sigma[T^4 - T_a^4]$ (quelle unité ?). Quelle est l'allure attendue pour chaque courbe d'après la théorie déroulée précédemment ? Tracer les courbes de tendances adéquates et donner leurs équations. En déduire les émissivités des faces blanche, métallique rugueuse et métallique lisse sachant que l'émissivité de la face noire vaut $\epsilon_{noire} = 0,94$. Est ce que le classement des émissivités obtenu est conforme au classement obtenu dans la partie qualitative 4.1.1 ?

Compléter qualitativement les graphes de réflectivités monochromatiques de la figure 9, c'est-à-dire indiquer si chaque peinture est fortement ou faiblement réfléchissante dans le visible et dans

l'infrarouge, en précisant bien :

1. sur lesquelles de vos observations (avec vos yeux...) et/ou mesures (avec vos expériences) et/ou lois théoriques (évoquées dans la partie qualitative 4.1) vous vous appuyez.
2. à quelles longueurs d'onde correspondent les gammes du ‘visible’ et de ‘l'infrarouge’ sur lesquelles vous vous prononcez. Pour l'infrarouge, considérez les longueurs d'ondes émises par le cube à sa température maximale obtenue pendant votre expérience.

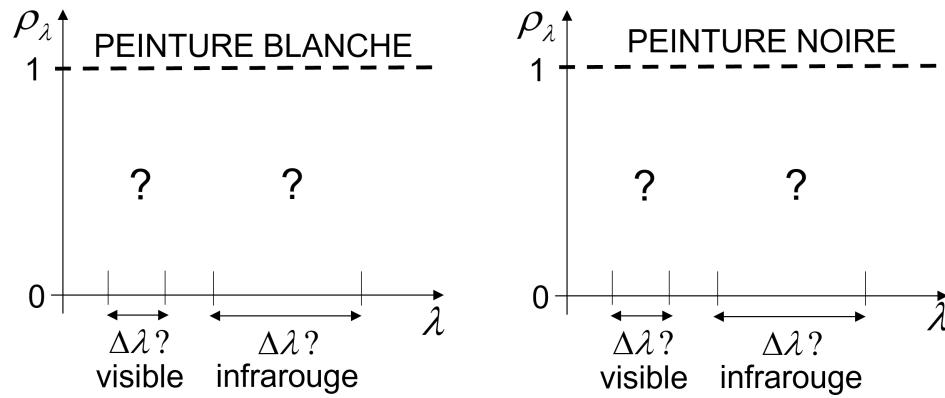


FIGURE 9 – Réflectivité monochromatique des peintures noire (gauche) et blanche (droite) : compléter tous les points d'interrogation.

En quoi les peintures noire et blanche se ressemblent ou se différencient ? Finalement, après votre analyse comparative des peintures noire et blanche : peut-on savoir en regardant la couleur d'une peinture si elle sera réfléchissante ou pas dans l'infrarouge ?

4.2.2 Transmission du rayonnement

On cherche ici à étudier le comportement en transmission d'une lame de verre vis-à-vis des différentes longueurs d'onde que peut couvrir le rayonnement thermique. Quels sont les résultats des mesures dans l'expérience précédente en intercalant la lame de verre entre la surface noire et le détecteur ? Qu'en déduisez-vous sur la transmittivité du verre aux longueurs d'onde concernées (rappeler lesquelles). De plus, comment se comporte le verre pour les longueurs d'onde visible ? Compléter alors le graphe de la figure 10.

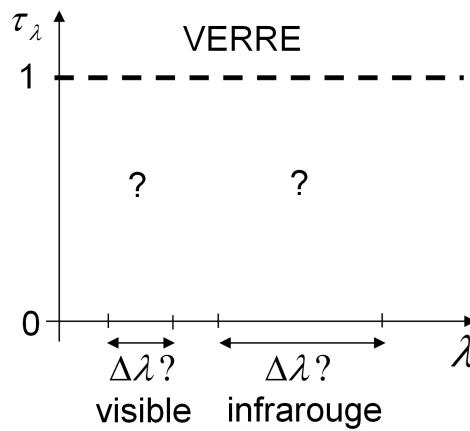


FIGURE 10 – Transmittivité monochromatique de la lame de verre : compléter tous les points d'interrogation.

Application : fonctionnement de l'effet de serre. Dans une voiture exposée au soleil, pourquoi le tableau de bord (supposé noir dans toutes les longueurs d'onde) derrière le pare-brise en verre sera

plus chaud que s'il n'y avait pas de pare-brise ? Aidez-vous d'un schéma détaillant les différents flux mis en jeu.

4.2.3 Influence de la température de la source (à haute température)

La source radiative est ici la lampe à filament de tungstène incandescent à une température variable, donnée par l'équation (14). Avant d'allumer la lampe, mesurer la température ambiante T_a et la résistance R_a du filament, avec un montage 4 fils présenté sur la photo de gauche de la figure 11.

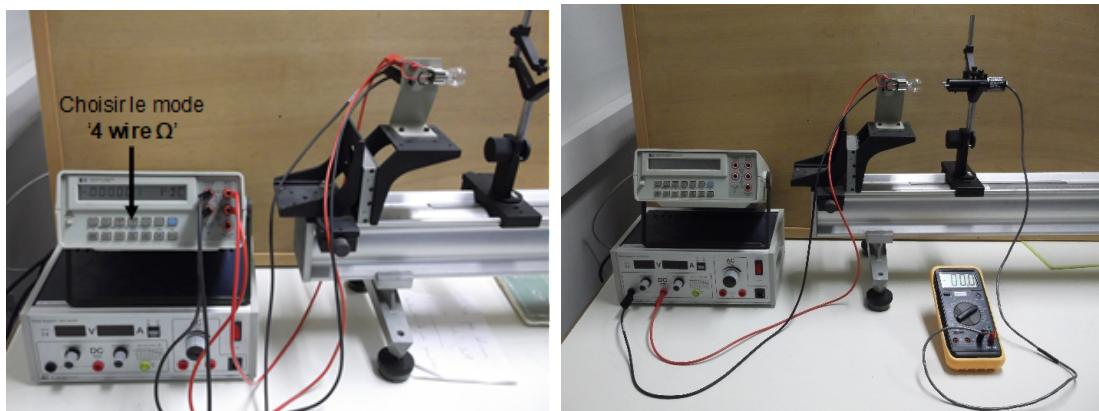


FIGURE 11 – Gauche : montage 4 fils pour mesurer la résistance du filament de tungstène à l'ambiante. Droite : alimentation de la lampe et mesure par la thermopile

Puis débrancher ce montage et brancher l'ampoule sur l'alimentation continue qui affiche le courant et la tension (photo de droite sur la figure 11). Faire varier la température du filament (bloquer le bouton du courant en position centrale et modifier la tension de volt en volt, jusqu'à 25V) et relever le signal délivré par la thermopile placée à 6 cm du filament. A chaque température de filament, réaliser deux mesures : une sans vitre entre l'ampoule et la thermopile et une avec vitre.

Précaution

Attention : placer un écran opaque entre la thermopile et l'ampoule entre deux mesures, pendant le réglage de la tension aux bornes du filament (pour ne pas surchauffer le capteur), voir figure 12.

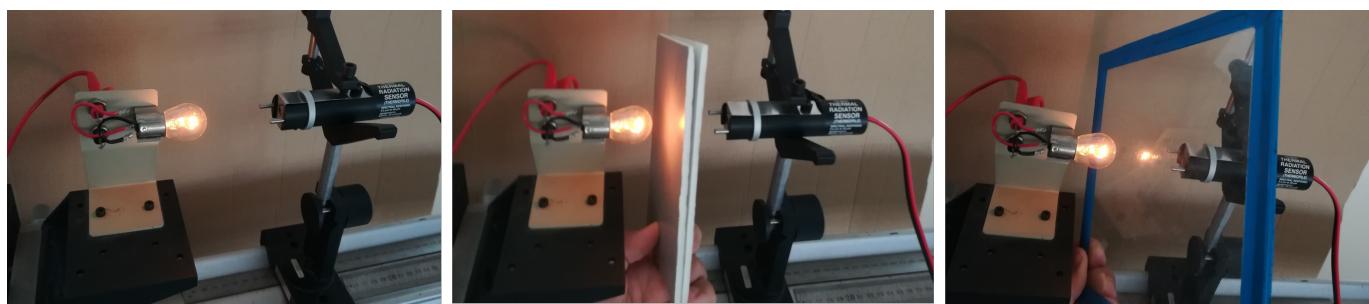


FIGURE 12 – Gauche : mesure normale. Centre : Protection de la thermopile entre 2 mesures. Droite : mesure avec vitre intercalée

Cette fois la thermopile (capteur noir à T'_a) reçoit le flux partant de l'objet (filament de température T_{fil} et d'émissivité ϵ_{fil} mais aussi de l'environnement (surface noire à T_a). Comme le capteur ne voit pas seulement le filament, le facteur de forme $F_{capteur \rightarrow fil}$ est inférieur à 1, mais pas connu précisément. On admet que le signal U de la thermopile s'écrit alors selon l'équation (17).

$$U(V) = sS_{capteur}F_{capteur \rightarrow fil}\sigma[T_{fil}^4 - T_a^4] \quad (17)$$

En admettant que $T_{fil}^4 \gg T_a^4$ (vous pourrez le vérifier), le signal doit donc être maintenant proportionnel à T_{fil}^4 si la loi de Stefan Boltzmann est vérifiée. Pour le vérifier, tracer vos points U en fonction de la température de la source en T_{fil} en K (et non pas en fonction de $\log(T_{fil})$!), sur un graphe **en échelles Log-Log** et vérifier qu'il suivent une pente 4 (voir le graphe attendu sur la figure 13).

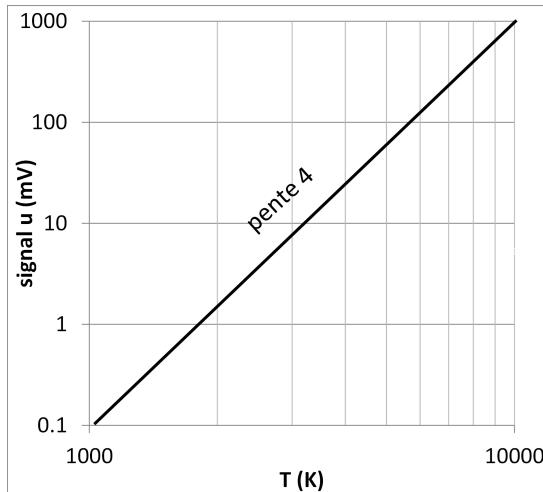


FIGURE 13 – Placer vos points U (signal thermopile) en fonction de T (du filament) sur ce graphe Log-Log avec ces échelles. On rappelle que pour tracer une pente 4 en graphe log-log, il faut avancer en abscisse d'une décade et monter en ordonnée de 4 décades. C'est donc la première bissectrice ici, tracée 'à main levée' avec l'outil 'ligne droite' dans le menu 'Insertion/Formes'

Attention

1. Ne pas chercher une courbe de tendance qui passerait au mieux par tous les points expérimentaux et qui aurait une pente 'proche de 4', ce raisonnement est FAUX et sera pénalisé !
2. Chercher plutôt lesquels de vos points expérimentaux suivent une pente rigoureusement égale à 4 (explicables par la loi de Stefan-Boltzmann) et ceux qui ne la suivent pas, et pour lesquels il faut trouver une explication.

Question : Vos points suivent-ils une allure analogue à la loi de Stefan-Boltzmann sur toute la gamme de température ? Sinon, quel phénomène peut expliquer l'écart observé ?

Piste

La loi de Stefan-Boltzmann vient d'une intégration sur toutes les longueurs d'ondes (formule (3) et Figure 2). Il semble donc que pour certaines températures du filament, la thermopile ne reçoive pas toutes les longueurs d'onde, empêchant ainsi l'intégration totale...

Caméra Infrarouge

Avertissement

Dans votre compte rendu, il est impératif que vos graphes soient numérotés, légendés et discutés dans le texte ; il est également important que vos tableaux soient présentés de manière pertinente : **un tableau ou une figure sans légende et dont le contenu n'est pas discuté dans le texte n'a aucune utilité dans un compte rendu.**

Objectifs :

L'objectif de cette séance de T.P. est de se familiariser avec l'utilisation d'une caméra infrarouge qui permet d'obtenir une cartographie des flux radiatifs issus d'une scène thermique. L'étalonnage de la caméra sera tout d'abord vérifié sur un point face à un corps noir de température donnée T^0 . Puis les influences de l'émissivité de la surface observée ainsi que de son environnement radiatif sur l'image infrarouge seront étudiées.

1 Quelques notions sur le rayonnement thermique

Les quelques notions nécessaires en rayonnement thermique figurent dans le texte de T.P. « Rayonnement Thermique ».

2 Matériel

2.1 Station d'imagerie et de mesure infrarouge



FIGURE 1 – Photo de la caméra infrarouge utilisée. La matrice de microbolomètres est dans le plan focal de l'objectif.

La chaîne de visualisation et d'acquisition d'images infrarouges comprend tout d'abord la caméra infrarouge (modèle A40 fabriquée par FLIR[©]) à matrice dans le plan focal de l'objectif (FPA : Focal Plane Array) dont la surface sensible est constituée d'une matrice de 320 x 240 détecteurs microbolométriques (voir la photo en Figure 1).

La chaîne de visualisation et d'acquisition d'images infrarouges comprend tout d'abord la caméra infrarouge (modèle A40 fabriquée par FLIR[©]) à matrice dans le plan focal de l'objectif (FPA : Focal Plane Array) dont la surface sensible est constituée d'une matrice de 320 x 240 détecteurs microbolométriques (voir la photo en Figure 1).

Cette chaîne est schématisée sur la Figure 2. L'objectif (ou optique sur le schéma) est constitué de lentilles en Germanium (transparent dans l'infrarouge, traité antireflet). La matrice de microbolomètres, placée après l'objectif, reçoit le flux radiatif venant d'une surface de la scène thermique correspondant à la surface conjuguée de la matrice à travers l'objectif de la caméra (voir Figure 2).

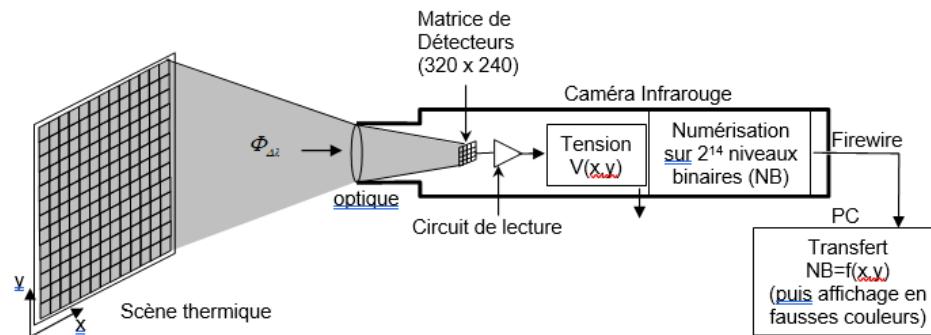


FIGURE 2 – de la scène thermique vers la matrice de détecteurs puis vers l'image infrarouge sur PC.

Chaque détecteur de la matrice est sensible dans la gamme 7,5-13 μm (Long Wave LW). Ce type de détecteur n'est pas refroidi (voir les caractéristiques principales de cette caméra en annexe). Ces détecteurs sont des microbolomètres, de la famille des détecteurs thermiques, dont le principe est basé sur l'échauffement du détecteur consécutif à l'absorption du flux infrarouge pendant une durée donnée, appelée 'temps d'intégration'. Cet échauffement du détecteur induit une variation de sa résistance électrique dont la mesure est alors proportionnelle au flux infrarouge absorbé. Les tensions délivrées, alors, par tous les détecteurs de la matrice sont lues au maximum à 50 Hz puis numérisées sur 14 bits. Ces valeurs sont alors transférées vers un PC par un câble Firewire et peuvent être affichées avec un code couleur donné. Le logiciel d'acquisition d'images infrarouges est Thermacam Researcher, dont le manuel est disponible en version pdf sur le même PC.

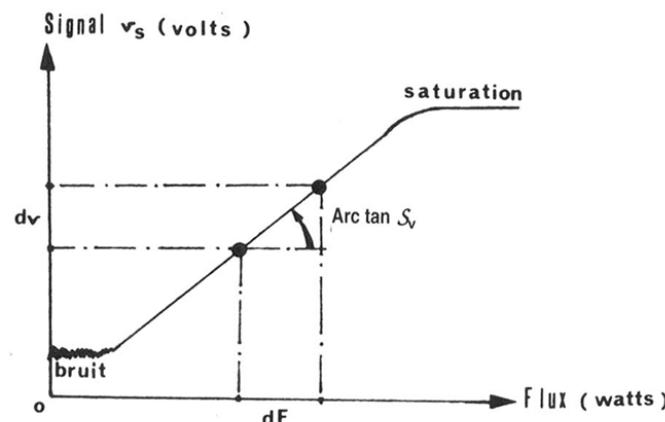


FIGURE 3 – linéarité de la réponse de la caméra en fonction du flux reçu avant saturation

La caractéristique du détecteur, soit la tension qu'il délivre en fonction du flux qu'il reçoit, est linéaire tant que le flux reçu n'excède pas un flux donné dit "de saturation" comme l'indique la Figure 3. La modification du temps d'intégration sur la caméra permet de mesurer des flux d'amplitudes différentes : de faibles flux avec un grand temps d'intégration et de forts flux avec un petit temps d'intégration. À chaque temps d'intégration correspond une courbe d'étalonnage. Deux temps d'intégration sont prévus par le constructeur correspondant à deux gammes de températures de corps noir observé : -40 °C à 50 °C et +20 °C à 500 °C.

2.2 Sources radiatives

2.2.1 Corps noir

La source radiative de référence (ou « référence thermorayonnante ») utilisée est un corps noir de laboratoire (figure 4). Celui-ci est destiné à approcher au mieux les caractéristiques du corps noir



FIGURE 4 – Corps noir de laboratoire

qui est un objet purement théorique. Il s'agit d'une cavité cylindrique à fond conique, revêtue d'un matériau très absorbant, à facteur de forme élevé (profondeur >diamètre), chauffée de façon isotherme par des résistances électriques. Il est équipé d'un disque percé de diaphragmes de tailles différentes qui peuvent se placer devant l'entrée de la cavité. La gamme de température qu'il peut couvrir va de l'ambiente à 1000°C, elle est mesurée par une sonde platine en fond de cavité. L'image que l'on a en observant un tel corps noir placé par exemple à 100 °C dans un environnement à 20 °C est donc un disque ("fort" flux quittant la cavité) se détachant de son environnement ("faible" flux).

2.2.2 Cubes multifaces

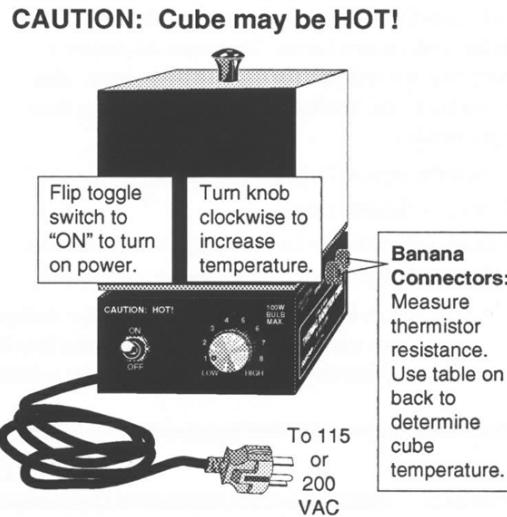


FIGURE 5 – Cube de Leslie

Ces cubes, illustrés à la figure 5, présentent quatre faces latérales en aluminium chauffées par une ampoule de 100 W, placée au centre du cube. La température de chacune des faces peut raisonnablement être supposée égale et uniforme. Elle est réglée en agissant sur la puissance délivrée par la lampe interne et est mesurée par une thermistance placée dans un coin inférieur du cube. La courbe donnant l'évolution de la résistance de la thermistance en fonction de sa température est fournie en salle de TP. Les quatre faces présentent un état de surface différent : peinture noir mat, peinture blanc mat, aluminium non poli, aluminium poli. La réflexion de rayonnement par la face en aluminium poli est de type spéculaire, alors que pour les autres faces, elle pourra être considérée diffuse. Les faces peuvent atteindre au maximum 130 °C. **Attention aux brûlures, ne jamais toucher les surfaces, uniquement la base.**

2.2.3 Plaque chauffante à différentes émissivités

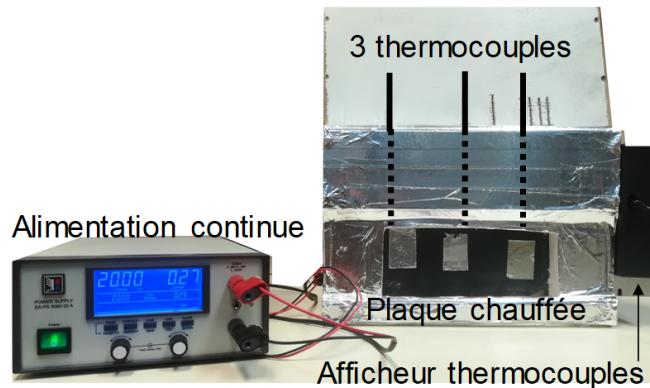


FIGURE 6 – Plaque chauffante à différentes émissivités

Il s'agit d'une plaque en cuivre régulée en température dont la surface est peinte en noir. Localement, comme vous pouvez l'observer sur la figure 6, l'émissivité de la surface a été modifiée par l'ajout d'adhésifs en aluminium (de gauche à droite : adhésif seul, adhésif + scotch blanc, adhésif + vernis). La visualisation de cette plaque par la caméra infrarouge permettra donc de s'intéresser aux conséquences de l'émissivité d'une surface sur son image infrarouge, pour une température identique (que l'on suppose non modifiée par l'ajout de l'adhésif). La plaque est chauffée par une résistance électrique plane collée à l'arrière. Cette résistance est alimentée une alimentation continue. Trois thermocouples sont insérés dans la plaque en cuivre, leurs températures sont affichées sur le boîtier latéral. **ATTENTION DE NE PAS DÉPASSER 20 V POUR CETTE EXPÉRIENCE** sous peine de surchauffer la plaque de cuivre et l'isolant en polystyrène qui l'entoure.

3 Travail de préparation : VOIR SUR AMETICE

4 Expériences

4.1 Observation d'un corps noir (étalonnage) et de surfaces non noires en environnement uniforme

4.1.1 Introduction

L'étalonnage de la caméra consiste à enregistrer sa réponse (en V), pour un temps d'intégration donné, face à un corps noir de laboratoire placé à une température T^0 variable (voir figure 7 à gauche).

L'allure de la courbe obtenue est présentée sur la figure 8. Dans cette situation, la tension $\Delta V^0 T^0$ s'écrit de la façon suivante, avec $R(\lambda)$ la sensibilité spectrale relative du détecteur dans la bande $\Delta\lambda$ et k une constante dépendant de la sensibilité maximale (en V/W) du détecteur, du gain de la chaîne d'amplification et des grandeurs relatives à la géométrie de la détection.

$$\Delta V^0(T^0) = k \int_{\Delta\lambda} R(\lambda) L_\lambda^0(\lambda, T^0) d\lambda \quad (1)$$

Dans la situation de mesure sur un corps réel d'émissivité monochromatique $\varepsilon(\lambda)$, placé dans un environnement uniforme assimilé au corps noir à T_a , la tension mesurée s'écrit :

$$\Delta V_{mes} = k \int_{\Delta\lambda} R(\lambda) \varepsilon(\lambda) L_\lambda^0(\lambda, T) d\lambda + k \int_{\Delta\lambda} R(\lambda) [1 - \varepsilon(\lambda)] L_\lambda^0(\lambda, T_a) d\lambda \quad (2)$$

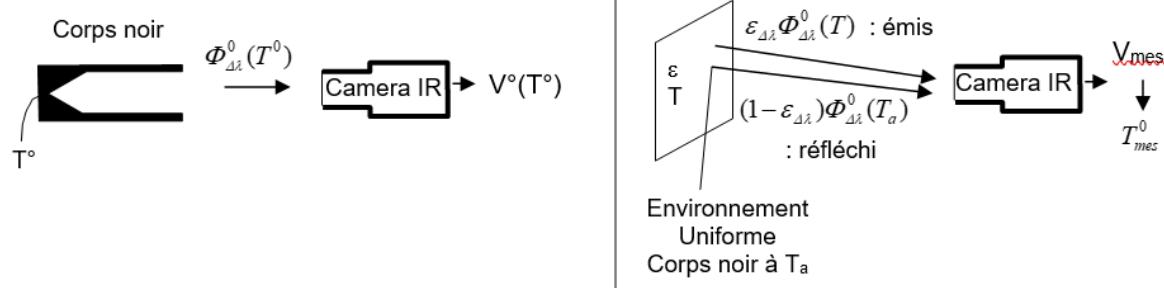


FIGURE 7 – Schéma et photo du montage pour l'étalonnage devant le corps noir de laboratoire (à gauche) et du montage pour la mesure sur un corps réel (plaqué chauffante à différentes émissivités, à droite)

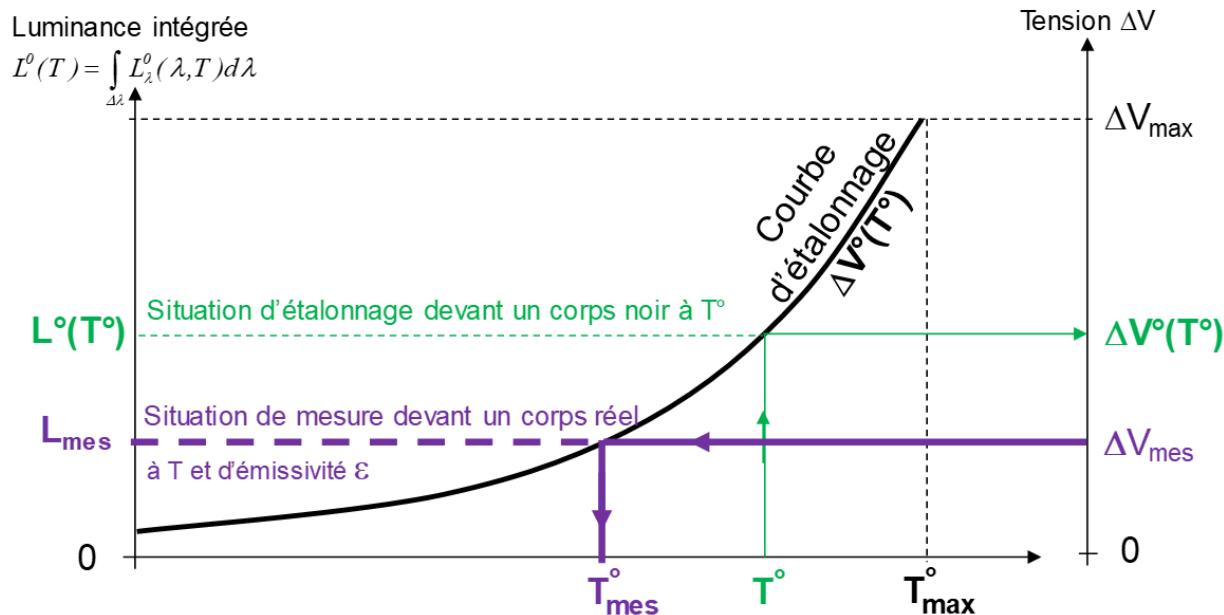


FIGURE 8 – Allure de la courbe d'étalonnage au corps noir $\Delta V^0 = f(T^0)$ et signification de la température apparente corps noir mesurée T_{mes}^0 sur un corps non noir obtenue à partir d'une ΔV mesurée ΔV_{mes}

et d'après (1), peut se mettre sous la forme :

$$\Delta V_{mes} = \varepsilon_{\Delta\lambda} \Delta V^0(T) + (1 - \varepsilon_{\Delta\lambda}) \Delta V^0(T_a) = \Delta V^0(T_{mes}^0) \quad (3)$$

avec

$$\varepsilon_{\Delta\lambda} = \frac{\int_{\Delta\lambda} \varepsilon(\lambda) R(\lambda) L_\lambda^0(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} R(\lambda) L_\lambda^0(\lambda, T) d\lambda} \quad (4)$$

NB : si on définit une sensibilité spectrale moyenne sur la bande spectrale de la caméra $R(\lambda) = \int_{\Delta\lambda} R(\lambda)L_\lambda^0(\lambda, T)d\lambda / \int_{\Delta\lambda} L_\lambda^0(\lambda, T)d\lambda = \int_{\Delta\lambda} R(\lambda)L_\lambda^0(\lambda, T)d\lambda / L^0(T)$, alors la tension mesurée (1) peut s'écrire proportionnellement à la luminance intégrée sur $\Delta\lambda$: $\Delta V^0(T^0) = kR_{\Delta\lambda}L^0(T^0)$ (voir figure 8).

$\varepsilon_{\Delta\lambda}$ est l'émissivité spectrale de la surface dans la bande spectrale de la caméra, tenant compte de sa sensibilité $R(\lambda)$. La seconde égalité de (3) signifie que l'on peut toujours faire correspondre à la tension mesurée, V_{mes} , la tension que mesurerait la caméra devant un corps noir à T_{mes}^0 . Cette température, T_{mes}^0 , est appelée *Température apparente corps noir* de la surface. En supposant que la surface observée soit placée dans un environnement uniforme noir à T_a et en supposant le matériau gris (avec $\varepsilon = \varepsilon_{\Delta\lambda}$) à T , cette température apparente peut-être reliée aux deux autres températures du système selon la relation suivante, :

$$(T_{mes}^0)^4 = \varepsilon_{\Delta\lambda}T^4 + (1 - \varepsilon_{\Delta\lambda})T_a^4 \quad (5)$$

4.1.2 Travail à réaliser

- Réaliser l'expérience de la figure 7 (à gauche) et vérifier que la température du corps noir, mesurée par la caméra, correspond bien à sa température affichée sur le régulateur. Bien penser à régler l'émissivité de l'objet observé à la valeur 1 (celle du corps noir) dans Researcher (Image/Settings/Object Parameters/Emissivity).
- Réaliser l'expérience de la figure 7 (à droite) en utilisant la plaque chauffante (**TENSION D'ALIMENTATION SUR 20V MAXI**) à différentes émissivités en guise de cible à observer. Relever la température réelle de la plaque à l'aide des différents thermocouples qu'elle contient.
Quelles sont les températures apparentes corps noir des différentes surfaces (y compris la peinture noire) qui la composent ? Déterminer leurs émissivités.
Conclusions sur l'influence de la nature des surfaces sur leur émissivité ?

4.2 Influence d'un environnement non uniforme sur l'observation d'objets non noirs : réflexions parasites

Le schéma de l'expérience à réaliser est présenté en vue de dessus sur la figure 9, la plaque noire perturbatrice est la surface noire du second cube multifaces.

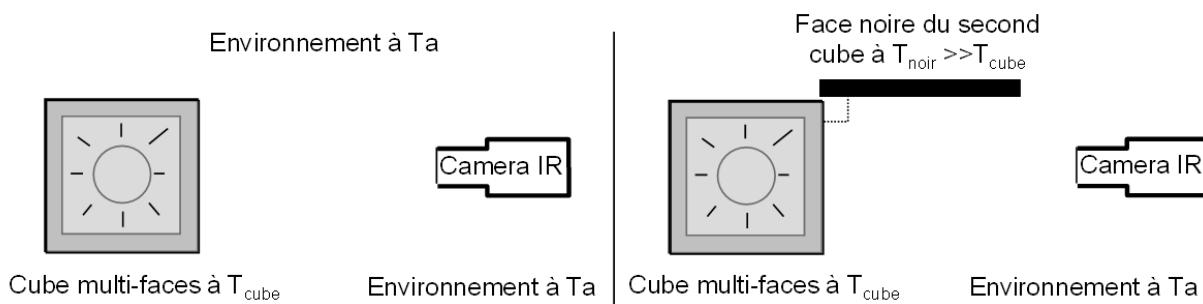


FIGURE 9 – Surfaces de différentes émissivités (3 faces du cube multifaces) observées dans un environnement uniforme (à gauche), puis perturbé par une source de rayonnement chaude et émissive (à droite), qui est la face noire du second cube multifaces

- Chauffer le cube à environ 30 °C (rhéostat autour de 2,5, mesurer T_{cube} à l'aide de la thermistance du cube) et le second cube au maximum (attention T avoisine 130 °C). Mesurer T_a à l'aide du thermocouple ambiant.

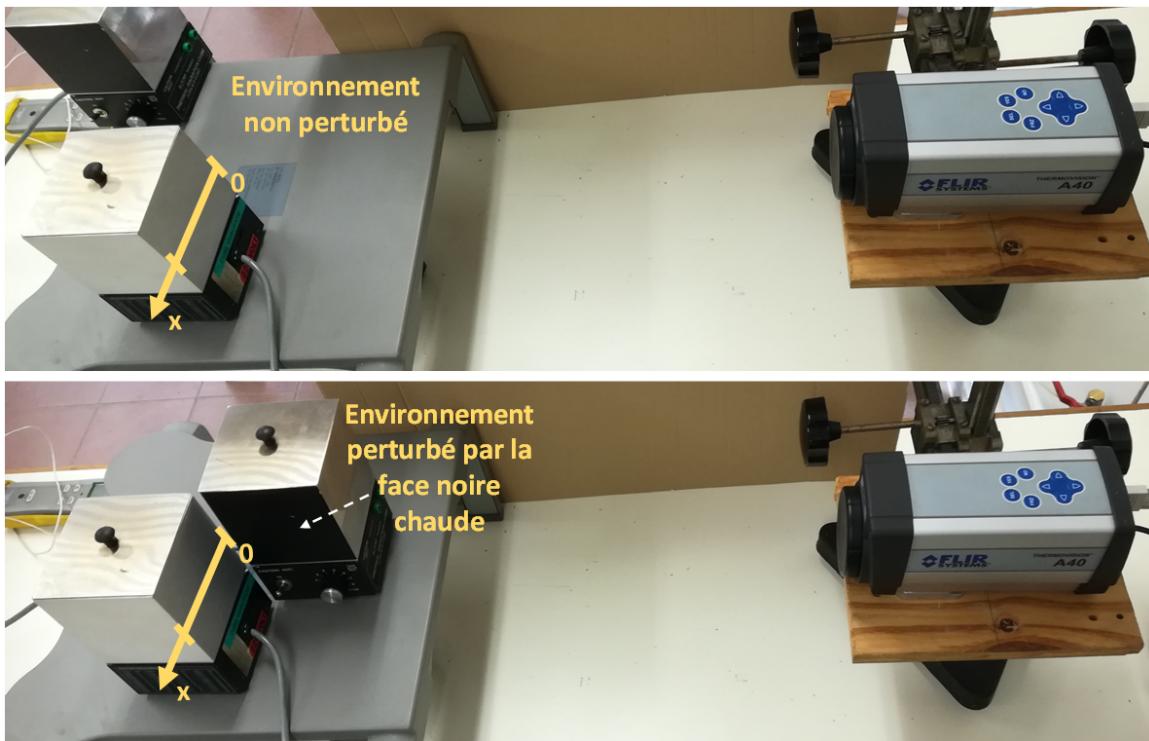


FIGURE 10 – En haut : observation du cube multifaces dans un environnement uniforme. C'est le long de l'axe x que seront relevées les températures apparentes mesurées par la caméra IR. En bas, l'environnement du cube est perturbé par la face noire chaude du second cube.

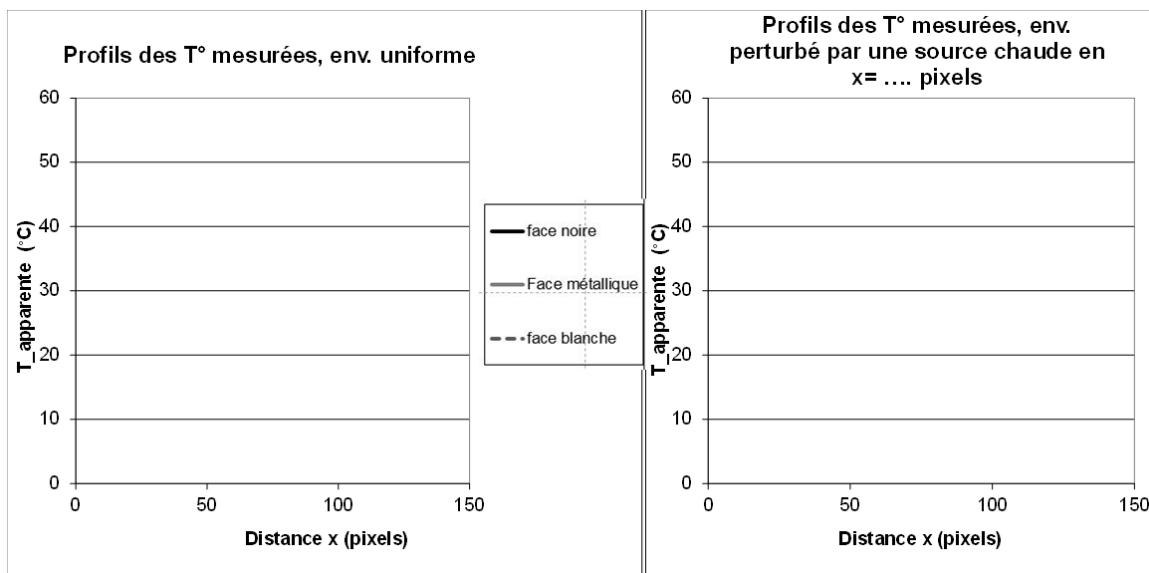


FIGURE 11 – Les deux graphes de températures apparentes attendus (3 profils à gauche, 3 profils à droite). Pour extraire un profil ligne de Researcher vers Excel : une fois la ligne dessinée sur l'image IR (avec la barre d'outil de gauche), 'Menu Edit/Copy Value, colonne de gauche 'Line' et colonne de droite 'String data', bouton 'Copy', ouvrir une feuille Excel vierge et 'Edit/coller' dans une colonne les valeurs copiées.

- Pour les faces noire, blanche et métallique diffuse (non polie) du cube, acquérir une image de sa température apparente corps noir T^0 en environnement uniforme (Figure 10 haut) et en environnement perturbé par la surface noire chaude placée perpendiculairement au cube (Figure 10 bas). Sauver chacune de ces six images pour les inclure dans votre rapport.
Sur un même graphe Excel, représenter un profil ligne de T^{circ} relevé au même endroit sur

chaque surface du cube, dans les deux situations (soit $3 \times 2 = 6$ courbes au total, sur 2 graphes à la même échelle, 3 courbes à gauche (environnement uniforme) et 3 courbes à droite (environnement perturbé en $x=0$, voir la Figure 11).

- Dans les deux environnements, représenter sur un schéma et expliquer les flux recueillis par la caméra.
- En étudiant les profils de T° de chaque face en environnement uniforme, classer les 3 faces par ordre d'émissivité croissante, en expliquant votre critère de classement.
- Expliquer l'allure des profils de T° de chaque face en environnement perturbé. Pouvait-on prévoir quelle(s) face(s) allaient être plus perturbées que les autres par la présence de la face noire chaude ? Classer alors les 3 faces par ordre de réflectivité croissante.
- Une image infrarouge d'une surface est-elle une cartographie de sa température ? Est-il possible de remonter à la vraie température T des faces à partir de leur température apparente T° dans les deux environnements ?

5 Références

Ouvrages

- "Mesure par thermographie infrarouge", D. Pajani, Add editeur, 1989
- "Thermographie Infrarouge. Image et Mesure", F. Papini et P. Gallet, ed. Masson, 1994
- « La Thermographie infrarouge, Principes Technologies Applications, 4ème Ed. », G. Gaussorgues, 1999

Revues

- "Thermographie. Principes et mesure", D. Pajani, Techniques de l'ingénieur R2740, 2001
- "Thermographie. Technologie et applications", D. Pajani et L. Audaire, Techniques de l'ingénieur R2741, 2001

Documents internes

- "Rayonnement thermique", TP 1ère année S6 de Polytech/ME

6 ANNEXE

ThermoVision™ A40M

Caméra infrarouge compacte pour la mesure et la surveillance thermique en procédés industriel



- ◆ L'IMAGE THERMIQUE
- ◆ L'AFFICHAGE DE L'IMAGE
- ◆ LA MESURE
- ◆ LES OPTIQUES ADDITIONNELLES
- ◆ ALIMENTATION
- ◆ L'ENVIRONNEMENT
- ◆ LES CARACTÉRISTIQUES
- ◆ INTERFACES
- ◆ Tableau de configuration paramétrable par l'utilisateur*

L'IMAGE THERMIQUE

Champ d'observation (HxV)	24° x 18°, (avec une focale de 35 mm)
Distance minimum de focalisation	0,3 m
IFOV	1,3 mrad
Résolution thermique	0,08°C à 30°C
Fréquence image	50 Hz
Focalisation	Focalisation par moteur interne : réglage manuel ou autofocus
Type de détecteur	Matrice à plan focal, microbolomètre non refroidi, 320 x 240 éléments
Réponse spectrale	7,5 - 13 µm

L'AFFICHAGE DE L'IMAGE

Sortie vidéo	Composite CCIR/PAL ou RS170 EIA/NTSC
Sortie numérique	FireWire (IEEE-1394) 8/16 bits
	Ethernet (RTP) 8 bits

LA MESURE

Gammes de mesure	-40°C à +500°C, en 2 gammes et jusqu'à +1.500°C ou +2.000°C en option
Exactitude de mesure sur corps noir	±2°C ou ±2% de la lecture
Outils de mesure	Spot (jusqu'à 6), zone (4), isotherme, Delta de température, % isométrique
Correction de l'émissivité	Variable de 0,1 à 1
Correction de T° interne	Automatique, avec thermistances internes
Correction d'optique externe	Automatique, basée sur la T° et la transmission de l'optique

Sillage et traînée

But du TP : visualiser l'écoulement autour et en aval d'un cylindre, utiliser un moyen de mesure de vitesse classique, le tube de Pitot, puis mobiliser les notions de mécanique des fluides abordées au semestre S5 pour mesurer la force de traînée s'exerçant sur le cylindre.

1 Écoulement autour d'un cylindre

La physique de l'écoulement autour d'un cylindre est essentiellement gouvernée par la valeur du nombre de Reynolds, Re_D , construit pour cet écoulement en utilisant respectivement comme longueur et vitesse de référence le diamètre D du cylindre et la vitesse U_∞ relevée à grande distance en amont du cylindre, soit :

$$Re_D = \frac{\rho D U_\infty}{\mu}. \quad (1)$$

L'augmentation du nombre de Reynolds conduit à l'observation de différentes topologies d'écoulement de complexité croissante, comme l'illustre la figure 1. Lorsque les effets visqueux dominent les effets d'inertie (écoulement de Stokes, $Re_D \ll 1$), les écoulements amont et aval sont symétriques par rapport à l'axe vertical du cylindre (figure 1(a)). Cette symétrie est perdue lorsque l'inertie devient prépondérante, conduisant à un resserrement des lignes de courant en amont du cylindre et, au contraire, à un espacement en aval (figure 1(b)).

Si l'inertie augmente encore, le fluide n'est plus capable de suivre la courbure de la paroi en aval du point d'épaisseur maximum, conduisant à un décollement de la couche limite se développant depuis le point d'arrêt amont. Cela se traduit par l'apparition d'une zone de recirculation (ou zone d'eau morte) composée de deux tourbillons contrarotatifs symétriques par rapport à l'axe horizontal du cylindre (figure 1(c)).

Pour $Re_D \gtrsim 50$, cette symétrie disparaît et l'écoulement devient instationnaire, avec des croissances puis éjection vers l'aval alternativement des tourbillons supérieurs et inférieurs (figure 1(d)).

Ces tourbillons ont une taille du même ordre de grandeur que le diamètre D et sont émis selon une fréquence dépendant principalement de D et U_∞ , avec :

$$f_{\text{émission}} \simeq 0,198 \left(1 - \frac{19,7}{Re_D}\right) \frac{U_\infty}{D}. \quad (2)$$

Une fois émis, ils sont entraînés vers l'aval par l'écoulement contournant le cylindre avec une vitesse $U_{\text{convection}} \simeq 0,85 U_\infty$. Comme la durée de vie de ces tourbillons est grande devant la période d'émission, il se forme dans le sillage du cylindre une succession de tourbillons se déplaçant vers l'aval, appelée allée de Bénard–von Kármán.

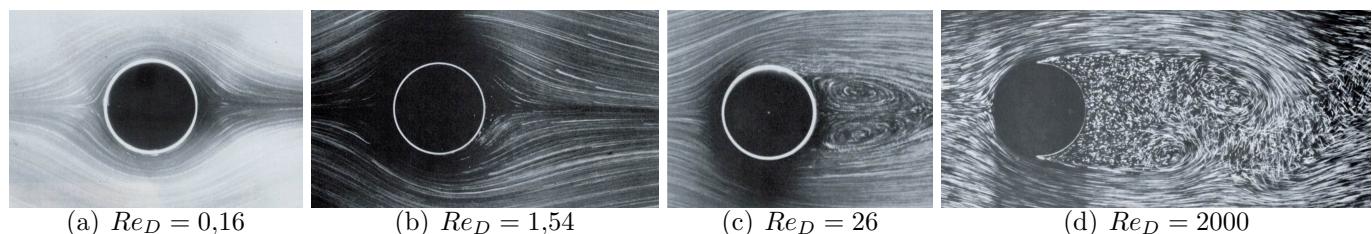
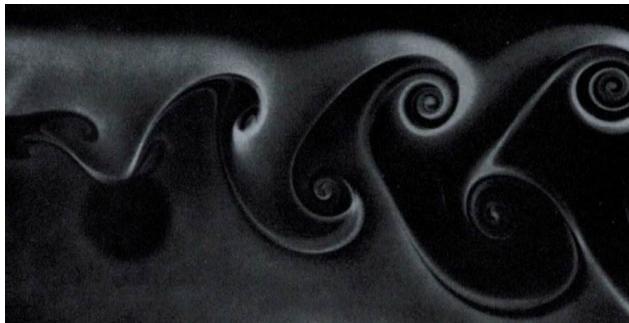
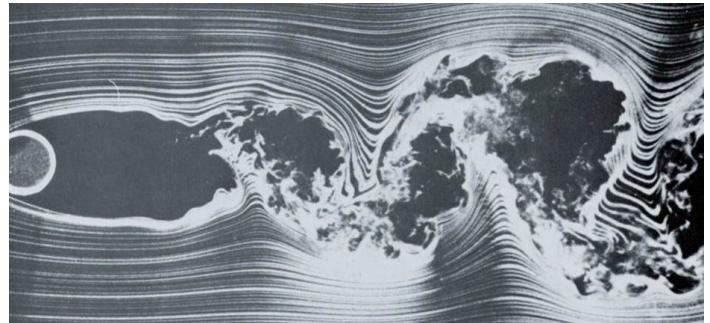


FIGURE 1 – Évolution de l'écoulement autour d'un cylindre en fonction du nombre de Reynolds. Repris de Van Dyke [1].



(a) régime laminaire ($Re_D = 2.10^2$)



(b) régime turbulent ($Re_D = 10^4$)

FIGURE 2 – Allée tourbillonnaire de Bénard–von Kármán. Repris de Van Dyke [1].

Lorsque le sillage du cylindre reste laminaire et bidimensionnel, cette allée présente une organisation très régulière, comme le montre la figure 2(a). Cette organisation perdure sous une forme plus chaotique lorsque le Re_D continue à augmenter et que le sillage devient turbulent et donc tridimensionnel (figure 2(b)).

2 Force et coefficient de traînée

Les tourbillons émis dans le sillage du cylindre induisent des variations des efforts exercés par l'écoulement sur le cylindre. Ces efforts sont donc instationnaires et fluctuent en temps avec une fréquence fondamentale égale à celle de l'émission des tourbillons. Même si le caractère instationnaire des efforts peut avoir des conséquences importantes¹, il est souvent suffisant pour l'ingénieur de considérer la valeur *moyenne* au cours du temps de ces efforts.

Dans le cas de la force exercée dans la direction normale à l'écoulement, appelée portance, cette valeur moyenne est nulle, car l'émission des tourbillons se produit alternativement au-dessus et en dessous de l'axe horizontal du cylindre (figure 2(a)). En effet, à chaque instant t pour lequel un tourbillon induit une force dont la composante normale est orientée vers le haut, il est possible d'associer un instant $t' \simeq t + \frac{1}{2f_{\text{émission}}}$ auquel un tourbillon symétrique du précédent par rapport à l'axe horizontal du cylindre va induire une force de composante normale de même valeur absolue, mais orientée vers le bas.

En revanche, la force induite sur le cylindre par les tourbillons a une projection dans la direction de l'écoulement de valeur égale aux instants t et t' . Cette force T , dite de force de traînée, n'est donc pas à moyenne temporelle nulle. Une analyse dimensionnelle du problème permet de montrer que :

$$\frac{T}{\rho U_\infty^2 D^2} = f\left(\frac{\rho D U_\infty}{\mu}, \frac{D}{L}\right), \quad (3)$$

L désignant la longueur du cylindre. L'écoulement considéré étant bidimensionnel, soit directement (sillage laminaire), soit en moyenne temporelle (sillage turbulent), le rapport d'aspect L/D n'a pas d'influence sur sa dynamique et n'est qu'un paramètre purement géométrique, ce qui permet de réécrire 3 comme :

$$T = \rho U_\infty^2 D L \times f(Re_D) \quad (4)$$

où le produit $D L$ correspond à la surface du cylindre projetée dans le plan perpendiculaire à l'écoulement : le maître couple. Pour définir le coefficient de traînée C_x , on rajoute un facteur $\frac{1}{2}$ à la normalisation pour que celle-ci corresponde à la force qui serait exercée sur le maître couple par la

1. Par exemple dans le cas de tours de grande hauteur soumises à un fort vent, lorsque la fréquence des tourbillons de sillage s'accorde avec une fréquence propre de la structure, conduisant à des déplacements de grande amplitude au sommet.

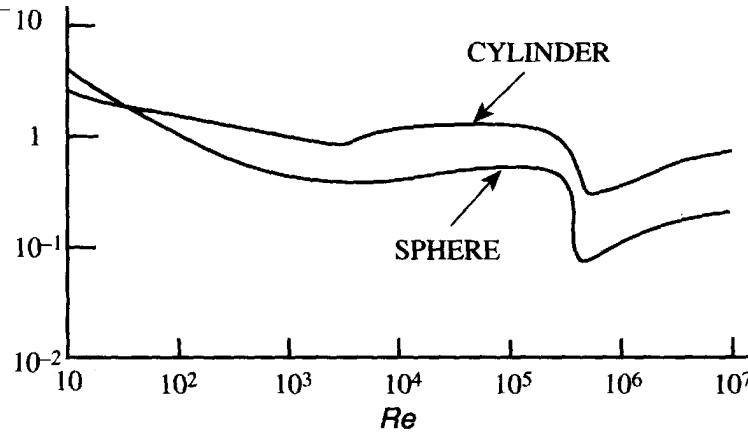


FIGURE 3 – Évolution du coefficient de traînée C_x en fonction du nombre de Reynolds Re_D .

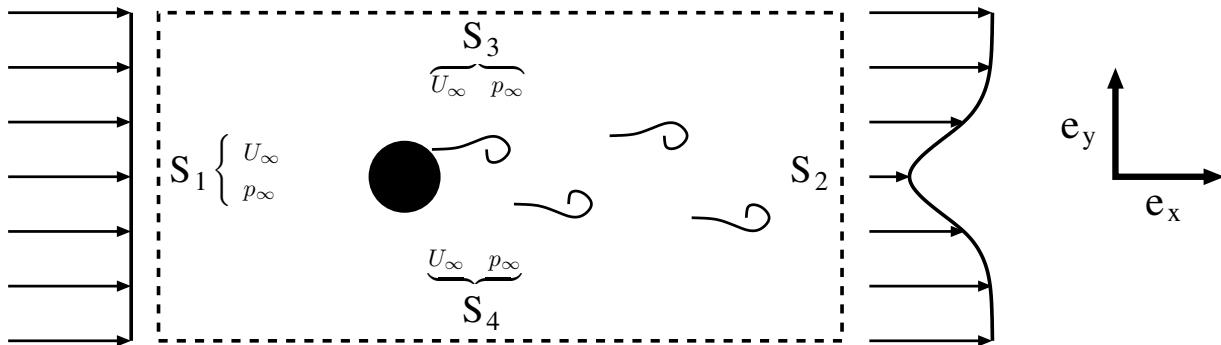


FIGURE 4 – Volume de contrôle avec indication des valeurs de la composante longitudinale U_x de la vitesse et de la pression p aux frontières.

pression dynamique de l'écoulement, soit :

$$C_x = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 D L} = f(Re_D) \quad (5)$$

L'évolution du coefficient de traînée C_x en fonction du seul paramètre Re_D dont il dépend est tracée en figure 3. On y constate en particulier que le coefficient présente une valeur quasi-constante d'environ 1,3 sur une plage de nombre de Reynolds relativement large allant de $8 \cdot 10^3$ à $2 \cdot 10^5$.

3 Mesure de la traînée

Le moyen le plus direct de mesurer les efforts s'exerçant sur le cylindre est de relier celui-ci à une balance d'efforts (ou balance aérodynamique). Un tel dispositif est relativement complexe à mettre en œuvre, en particulier en ce qui concerne la séparation des différentes composantes des efforts. Il est souvent plus simple de recourir à une mesure indirecte à partir de la mesure du champ de vitesse en aval du cylindre en appliquant du théorème de conservation de la quantité de mouvement à un volume de contrôle bien choisi englobant le cylindre. Un tel volume de contrôle est illustré à la figure 4.

En régime instationnaire, l'équation de conservation de la quantité de mouvement n'est valable que pour des grandeurs instantanées (mesurées à un instant donné t), alors que l'on cherche à obtenir une valeur moyenne des efforts exercés sur le cylindre. Il faut donc calculer une moyenne temporelle de chacun des termes de l'équation de quantité de mouvement. Comme l'écoulement est en moyenne bidimensionnel, il suffit de considérer un volume de contrôle également bidimensionnel : les efforts ainsi calculés sont alors des efforts par unité de longueur du cylindre.

De plus, cette opération de moyenne fait disparaître le terme volumique instationnaire $\iiint_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) dV$. Elle introduit cependant des termes supplémentaires dans l'intégrale de surface. L'analyse de ces

termes dépasse de loin le cadre de ce TP, mais il est possible de montrer que si les surfaces S_2 à S_4 sont situées à une distance suffisante du cylindre, ces termes deviennent négligeables.

En projetant l'équation obtenue sur l'axe \vec{e}_x correspondant à l'orientation de l'écoulement en amont du cylindre, on obtient l'équation reliant la traînée moyenne par unité de longueur de cylindre T aux valeurs des vitesses et pression moyenne aux frontières du domaine de contrôle :

$$T = - \iint_{\cup_{i=1}^4 S_i} \rho U_x (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS - \iint_{\cup_{i=1}^4 S_i} p \vec{n} \cdot \vec{e}_x dS \quad (6)$$

Pour peu que les surfaces S_1 , S_3 et S_4 soient situées à grande distance du cylindre, on a sur ces surfaces $U_x = U_\infty$. De même, la pression sur ces surfaces est égale à la pression amont p_∞ . La force de traînée peut donc être calculée à partir des seules distributions de vitesse et de pression sur la surface S_2 . Il reste alors à obtenir ces dernières pour pouvoir calculer la traînée à partir des seules mesures de vitesse.

Le théorème de Bernoulli constitue la méthode habituelle pour relier la vitesse à la pression. Cependant, dans la zone de sillage du cylindre², il n'est pas possible de l'appliquer, car l'écoulement n'y est ni irrotationnel, ni stationnaire, ce qui contredit les hypothèses du théorème respectivement sous ses formes instationnaire et stationnaire.

En revanche, une analyse en ordre de grandeur des équations de Navier-Stokes³ permet de montrer que si la surface S_2 est située loin en aval du cylindre (de l'ordre de 25 diamètres ou plus), la pression y est constante. La continuité de pression aux jonctions S_2/S_3 et S_2/S_4 impose donc que $p = p_\infty$ sur S_2 . Dans ce cas, le second terme de l'équation 6 correspond à l'intégration d'une intégrande constante en norme sur une surface fermée et est donc nul par application du théorème du gradient.

Si la surface S_2 est située à moins de 25 diamètres en aval du cylindre, la pression sur la surface S_2 varie significativement avec y , avec $p(y) < p_\infty$. En tenant compte du fait que le $\vec{n} \cdot \vec{e}_x = 0$ sur S_3 et S_4 , le second terme de l'équation 6 devient :

$$- \iint_{\cup_{i=1}^4 S_i} p \vec{n} \cdot \vec{e}_x dS = \int_{S_1} p_\infty dy - \int_{S_2} p(y) dy \quad (7)$$

En supposant le fluide incompressible avec $\rho = Cste$ l'équation 6 se simplifie finalement en :

$$\begin{aligned} T &= \rho \left(\int_{S_1} U_\infty^2 dy - \int_{S_2} U_x(y)^2 dy - \int_{S_3} U_\infty U_y(x) dx + \int_{S_4} U_\infty U_y(x) dx \right) \\ &+ \underbrace{\int_{S_1} p_\infty dy - \int_{S_2} p(y) dy}_{\neq 0, \geq 0 \text{ si } S_2 \text{ proche de l'obstacle}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Il est alors possible d'utiliser l'équation de conservation de la masse moyenne⁴ pour éliminer les intégrales sur S_1 , S_3 et S_4 . De plus, le théorème de Bernoulli est applicable entre l'amont de la soufflerie et la surface S_1 (écoulement irrotationnel), ce qui permet de calculer p_∞ en fonction de la pression atmosphérique p_{atm} et de la vitesse U_∞ . En posant,

$$\Delta p(y) = p_{atm} - p(y),$$

2. Zone en aval du cylindre présentant un déficit de vitesse par rapport à la vitesse U_∞ , comme l'illustre le profil de la figure 4 au niveau de la surface S_2 .

3. Hypothèse de couche mince similaire à celle formulée dans le cas d'une couche limite, voir cours de mécanique des fluides du semestre S6.

4. identique à l'équation de conservation de la masse stationnaire si $\rho = Cste$: $\iint_{\cup_{i=1}^4 S_i} \rho \vec{U} \cdot \vec{n} dS = 0$.

on obtient l'expression de la traînée T suivante :

$$T = \rho \int_{S_2} U_x(y) \left[U_\infty - U_x(y) \right] dy + \underbrace{\int_{S_2} \Delta p(y) - \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 dy}_{\neq 0, \geq 0 \text{ si } S_2 \text{ proche de l'obstacle}}$$

Une expression analytique de la fonction $U_x(y)$ n'est connue que pour des positions aval éloignées du cylindre de plusieurs dizaines de fois son diamètre⁵. Le calcul pratique de l'intégrale dans l'équation 9 pour des surfaces plus proches du cylindre nécessite donc d'avoir recours à une méthode d'intégration numérique comme la méthode des trapèzes.

En supposant U_x et Δp connues en N points de la surface S_2 d'altitude $y_i, i = 1, \dots, N$ avec $y_{i+1} > y_i$ et en posant :

$$\mathcal{F}_i = \rho U_x(y_i) \left[U_\infty - U_x(y_i) \right] + \Delta p(y_i),$$

la traînée T est estimée comme :

$$\begin{aligned} T &\simeq \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mathcal{F}_{i+1} + \mathcal{F}_i}{2} (y_{i+1} - y_i) \\ &\quad - \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 (y_N - y_1) \end{aligned} \tag{9}$$

L'approximation 9 sera précise pour peu que l'espacement vertical $y_{i+1} - y_i$ entre deux mesures soit suffisamment petit dans les régions où le profil de vitesse présente une variation verticale importante, *i. e.* dans la zone de sillage.

La valeur du coefficient de traînée C_x est finalement obtenue à partir de l'équation 5 avec $L = 1$ puisque la valeur de T issue de 9 est exprimée par unité de longueur de cylindre.

4 Dispositif expérimental

La soufflerie utilisée pour ce TP est une soufflerie à veine fermée et circuit ouvert (type *Eiffel*) avec une veine d'essai de section rectangulaire égale à $0,2 \times 0,3 \text{ m}^2$. L'air est mis en mouvement par un ventilateur situé en aval de la veine d'essai et la vitesse de l'écoulement est stabilisée par un régulateur. La vitesse dans la veine d'essai peut varier sur une plage allant de 1 m.s^{-1} à environ 15 m.s^{-1} suivant la valeur de tension sélectionnée au niveau du régulateur.

Des cylindres de différents diamètres peuvent être fixés au centre de la veine d'essai, normalement à l'écoulement, au moyen d'une tige cylindrique horizontale traversant la soufflerie latéralement. Une trappe située sur la paroi supérieure de la soufflerie permet d'avoir accès à la veine d'essai pour positionner le cylindre. Cette trappe doit être fermée lorsque des mesures sont effectuées de manière à assurer une bonne qualité d'écoulement dans la veine d'essai.

La soufflerie est équipée d'un dispositif de visualisation des trajectoires des particules fluides par filets de fumée. La fumée est créée par la vaporisation d'un mélange de glycérine et de savon coulant le long d'un fil vertical situé à l'entrée de la veine d'essai et chauffé par effet Joule. Une fente longitudinale en Plexiglas™ située sur la paroi inférieure de la soufflerie permet d'éclairer au moyen d'une lampe de forte puissance une fine tranche verticale de l'écoulement centrée sur le plan médian de la veine d'essai.

La soufflerie dispose d'une sonde de vitesse de type Pitot dont la position en aval de la tige de support est fixe, mais qui peut être déplacée verticalement. Ce tube de Pitot est relié à un manomètre différentiel permettant de mesurer :

5. Le profil de la vitesse déficiente prend alors une forme gaussienne : $U_\infty - U(y) = \alpha e^{-(\frac{y}{\beta})^2}$ avec α et β dépendant de Re_D et de la distance au cylindre.

- la différence entre la pression d'arrêt (extrémité du tube) et la pression statique (corps du tube), utile pour mesurer la vitesse dans l'écoulement,
- la différence entre la pression atmosphérique et la pression statique, utile pour mesurer la pression statique dans l'écoulement.

Un fascicule décrivant les procédures de démarrage/arrêt de la soufflerie et du système de visualisation est déposé à côté du régulateur de vitesse. **Il est essentiel de se conformer scrupuleusement à ces procédures.**

5 Travail préparatoire

1. Donner la relation liant la vitesse à la différence entre pressions d'arrêt et statique mesurées par le tube de Pitot.
2. Calculer pour une vitesse d'écoulement $U_\infty = 1 \text{ m.s}^{-1}$ les nombres de Reynolds dans le cas :
 - d'une tige cylindrique de diamètre $D = 1 \text{ mm}$,
 - d'un cylindre de diamètre $D = 2,5 \text{ cm}$.
3. Formuler le théorème de conservation de la masse moyenne (voir la note de bas de page 4. à la page 4) pour le volume de contrôle défini à la figure 4 et multiplier l'équation obtenue par la constante U_∞ .
4. Utiliser le théorème de Bernoulli entre l'extérieur de la soufflerie et la surface S_1 pour exprimer p_∞ en fonction de la pression atmosphérique p_{atm} et de la vitesse U_∞ .
5. Injecter les résultats des questions 3 et 4 dans l'équation 8 pour retrouver l'équation 9.

6 Travail en séance

6.1 Visualisation

En présence de l'enseignant responsable, démarrer la soufflerie et ajuster le niveau du régulateur de manière à obtenir des tensions affichées comprises entre 0,5 et 1 V), ce qui correspond à une vitesse dans la veine d'essai de l'ordre de 1 m.s^{-1} . Allumer ensuite le système de visualisation et, en enfonçant très légèrement le piston de la seringue contenant le mélange à vaporiser, en faire glisser une goutte le long du fil. Visualiser l'écoulement se développant en aval de la tige de fixation cylindrique. Placer ensuite le cylindre de diamètre 2,5 cm et visualiser le nouvel écoulement.

Ces visualisations pourront être analysées par comparaison avec les photographies des figures 1–2 en utilisant les valeurs de Re_D calculées durant le travail de préparation. On pourra également s'intéresser aux variations d'un cas à l'autre de la taille des tourbillons et de la distance séparant deux tourbillons consécutifs et les relier aux valeurs des diamètres des cylindres, fréquence d'émission et vitesse de convection fournies au paragraphe 1.

6.2 Calcul de la traînée

Il est demandé de mesurer une valeur du coefficient de traînée C_x pour l'un des deux cylindres suivants :

- $D = 2,5 \text{ cm}$,
- $D = 3,1 \text{ cm}$.

Les vitesses sont à sélectionner dans la plage $[8 \text{ m.s}^{-1}, 12 \text{ m.s}^{-1}]$ pour laquelle l'écoulement dans la veine d'essai présente les meilleures qualités d'homogénéité spatiale et de stabilité temporelle. On adaptera judicieusement la vitesse au diamètre du cylindre de manière à obtenir, au choix, des nombres de Reynolds identiques ou, au contraire, les plus différents possibles. On procédera de la manière suivante pour effectuer la mesure de C_x :

- En l'absence de cylindre, ajuster la vitesse en faisant varier la tension du régulateur jusqu'à obtenir une mesure par tube de Pitot à mi-hauteur de la veine qui correspond à la vitesse désirée. On veillera lors des mesures à ce que le tube de Pitot soit toujours bien aligné avec la direction de l'écoulement.
- Toujours en l'absence de cylindre, effectuer quelques relevés de vitesse pour différentes altitudes. Ces valeurs serviront à déterminer, au moyen d'un raisonnement que l'on précisera, la vitesse U_∞ en amont du cylindre (surface S_1 sur le schéma 4).
- Placer ensuite le cylindre à l'intérieur de la veine d'essai *sans changer la tension du régulateur ni arrêter la soufflerie*. Procéder avec précaution pour que le cylindre ne soit pas entraîné dans la partie aval de la soufflerie, sans oublier de refermer la trappe d'accès après positionnement.
- Relever au long de la surface S_2 les valeurs de vitesse et de pression pour différentes altitudes. On veillera à prendre un nombre de valeurs suffisant dans la région du sillage de manière à représenter correctement la variation de vitesse dans cette zone. L'écoulement étant fortement instationnaire, les valeurs considérées correspondront à une moyenne des valeurs relevées sur quelques secondes.
- Tracer le profil de vitesse déficitaire $U_\infty - U_x(y)$.
- Calculer la valeur de la traînée T puis du coefficient de traînée C_x .

Les résultats obtenus devront être analysés et discutés à la lumière des informations fournies aux paragraphes 2 et 3, des incertitudes de mesure, des limitations éventuelles du dispositif expérimental et des améliorations qu'il conviendrait d'y apporter.

Une fois la traînée mesurée pour l'un des deux configurations (diamètre D et vitesse U_∞), estimer *a priori* les coefficient et force de traînée que l'on devrait observer pour l'autre configuration en se servant de la figure 3 puis conclure.

Références

- [1] M. van Dyke. *An album of fluid motion*. The Parabolic Press, Stanford, California, 1982.

Convection forcée et effet d'ailette

But du TP : Les échanges de chaleur entre un solide et le fluide, qui l'entoure, sont de type convectif. Ils dépendent de l'écoulement du fluide autour du solide. Vous étudierez dans ce TP la dépendance du coefficient d'échange convectif à la vitesse d'écoulement autour d'une plaque rectangulaire horizontale et parallèle à l'écoulement. Ceci dans le but de comprendre comment augmenter ces échanges avec un système d'ailettes qu'on peut retrouver, par exemple, dans un convecteur domestique ou dans un radiateur de microprocesseur.

Avertissement

Dans votre compte rendu, il est impératif que vos graphes soient numérotés, légendés et discutés dans le texte ; il est également important que vos tableaux soient présentés de manière pertinente : un tableau ou une figure sans légende et dont le contenu n'est pas discuté dans le texte n'a pas à figurer dans un compte rendu.

1 Éléments théoriques

1.1 Convection et coefficient d'échange convectif

Lorsque qu'un solide est à une température différente du fluide qui l'entoure, il se produit un transfert de chaleur entre le fluide et le solide qui tire sa particularité dans le fait que le fluide peut se déplacer autour du solide. Ce transfert est donc dépendant de la nature du fluide, mais également de la façon dont il s'écoule autour du solide.

Le flux convectif de chaleur Φ_{cv} est proportionnel à la surface d'échange fluide-solide S et à la différence de température ΔT entre le fluide et le solide et on peut donc écrire :

$$\Phi_{cv} = h \cdot S \cdot \Delta T \quad (1)$$

Le coefficient de proportionnalité h , qui lie le flux convectif à ces deux grandeurs, s'appelle le coefficient d'échange convectif. C'est ce coefficient qui va varier en fonction de la nature du fluide et de son écoulement.

Au cours de ce TP, la dépendance de h à la nature du fluide ne sera pas étudiée puisque seul l'air sera utilisé comme fluide en écoulement autour de l'élément solide. Suivant que l'écoulement d'air est imposé par une ventilation externe, ou initié par les différences de densité de l'air (l'air chaud est plus léger que l'air froid), on parle de convection forcée ou de convection naturelle. Dans les deux cas, c'est l'écoulement qui assure le renouvellement des couches de fluides en contact avec la paroi, et renforce les échanges de chaleur. Au cours de cette séance, seule la convection forcée sera étudiée en mettant l'air en mouvement à l'aide d'un ventilateur et permettra de caractériser l'évolution de h en fonction de la vitesse sur le système particulier de la plaque plane horizontale (vitesse d'écoulement parallèle à la plaque).

1.2 Couche limite dynamique, couche limite thermique

Considérons une plaque rectangulaire chauffée, au sein d'un écoulement d'air, parallèle à celle-ci, à température ambiante. La plaque est refroidie par l'écoulement. Suivant le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), il se développe à la surface de la plaque une couche de fluide au sein de laquelle le profil de vitesse du fluide est différent de celui qu'on retrouve loin de la paroi.

Pour le transfert de chaleur, cela implique que les effets de l'écoulement (le transport) ne se manifeste que loin des parois. Néanmoins, au contact d'une paroi à température imposée, la température évolue

rapidement sur les premières couches fluides, pour atteindre la température du fluide. L'épaisseur sur laquelle la température du fluide évolue est **la couche limite thermique**.

Le flux thermique échangé dans cette couche limite thermique est assuré essentiellement par la conduction. Pour ces raisons et dans le but de pouvoir comparer les échanges convectifs dans des configurations très différentes, plutôt que de tracer la simple évolution du coefficient h en fonction des grandeurs caractéristiques de l'écoulement et des propriétés thermiques du système, on trouve des corrélations donnant l'évolution du nombre de Nusselt, Nu , en fonction des nombres de Reynolds, Re , et de Prandtl, Pr , ces trois nombres sans dimension permettant de caractériser les régimes d'écoulement ainsi les propriétés thermiques du système.

Le **nombre de Nusselt** Nu est un nombre sans dimension, qui permet de comparer les échanges convectifs avec les échanges conductifs au sein d'un fluide en contact avec le solide, qui est à une température différente. Il mesure aussi l'efficacité de l'écoulement dans l'intensification des transferts de chaleur. Sa valeur dépend bien sûr des caractéristiques de l'écoulement (écoulement interne, externe, établi ou pas, du nombre de Reynolds, ...) mais pas de la nature exacte du fluide. Il est défini par la formule suivante :

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2)$$

avec h , le coefficient d'échange convectif, L une longueur caractéristique du système (la longueur de la plaque dans notre expérience) et k , la conductivité thermique du fluide.

Le **nombre de Reynolds** Re est un nombre sans dimension, qui permet de comparer les effets visqueux et les effets inertIELS dans un fluide en écoulement. On le définit comme suit :

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (3)$$

Avec ρ , la masse volumique du fluide, U , la vitesse d'écoulement du fluide, L , une longueur caractéristique du système (la longueur de la plaque dans notre expérience) et μ , la viscosité dynamique du fluide.

Le **nombre de Prandtl** Pr est, lui aussi, un nombre sans dimension, qui permet de comparer la rapidité des phénomènes thermiques et celles des phénomènes hydrodynamiques. Il est défini de la façon suivante :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (4)$$

Avec μ , la viscosité dynamique du fluide, C_p , la capacité calorifique du fluide et k , la conductivité thermique du fluide.

On démontre ainsi que dans le cas d'une simple plaque en régime laminaire ($Re_L < 3.10^5$), ces nombres sans dimension sont liés par la relation suivante :

$$Nu_L = 0,665 Re_L^{0,5} Pr^{1/3} \quad (5)$$

Alors que si l'écoulement est turbulent ($Re_T > 5.10^5$) et que $Pr > 0,5$, on a :

$$Nu_T = 0,035 Re_T^{4/5} Pr^{1/3} \quad (6)$$

1.3 Effet d'ailette

Pour augmenter les échanges de chaleur entre un solide et un fluide, on lui adjoint parfois un système d'ailettes. C'est le cas pour les convecteurs domestiques, ou les processeurs informatiques... Le principe de base est d'augmenter la surface d'échange. Nous allons étudier en détail le fonctionnement

d'une ailette.

Le flux de chaleur Φ produit à une de ses extrémités, est évacué pour partie par convection naturelle avec une densité surfacique $\phi_{cv}(x) = h.\Delta T(x)$, sur une surface d'échange $dS = \mathcal{P}dx$, où \mathcal{P} désigne le périmètre de l'aillette (et vaut ici deux fois la largeur de l'aillette, car il y a deux faces). Le reste de la chaleur est transféré par conduction le long de l'aillette. Cette chaleur devra alors être évacuée par convection ou conduite plus loin le long de l'aillette. Au final, toute la chaleur est évacuée par convection, et :

$$\Phi = \int \phi_{cv}(x).dS = h.\mathcal{P}. \int (T(x) - T_\infty).dx \quad (7)$$

Pour connaître le profil de température le long de l'aillette, il suffit de faire un bilan sur chaque tranche. Le flux transféré par conduction à travers l'aillette est :

$$\phi_{cd}(x) = -k \mathcal{S} \frac{\partial T}{\partial x}$$

Ce flux varie le long de l'aillette, à cause des flux perdus par convection, et on a ainsi :

$$\phi_{cd}(x + dx) - \phi_{cd}(x) = -\mathcal{P}.dx.\phi_{cv}(x) = -\mathcal{P}.dx.h.(T(x) - T_\infty)$$

et finalement, on obtient : $\mathcal{S}.k.\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = h.\mathcal{P}.(T(x) - T_\infty)$

La forme générale de la solution est $T(x) = A.e^{\frac{x}{L}} + B.e^{-\frac{x}{L}}$ avec

$$L = \sqrt{\frac{k.\mathcal{S}}{h.\mathcal{P}}} \quad (8)$$

où L est une longueur caractéristique, A et B sont des constantes à déterminer, k est la conductivité thermique du cuivre ($k = 390W/m/K$), \mathcal{P} et \mathcal{S} sont le périmètre et la surface de la section de l'aillette (largeur \times épaisseur), et h est le coefficient d'échange convectif.

En particulier, dans le cas d'une ailette infiniment longue comparée à L , on obtient :

$$T(x) = T_\infty + (T_0 - T_\infty).e^{-\frac{x}{L}} \quad (9)$$

Dans cette équation, L représente la longueur sur laquelle la température est amortie.

Le flux total évacué par l'aillette est :

$$\Phi = \int h.\mathcal{P}.(T(x) - T_\infty).dx = h.\mathcal{P}.L.(T_0 - T_\infty) \quad (10)$$

où L représente aussi la longueur efficace de l'aillette.

2 Dispositif expérimental

Un film chauffant (résistance) est pris en sandwich entre deux plaques de cuivre pour former un élément rectangulaire de 3,8 cm de large, de 6,4 cm de long et de 2 mm d'épaisseur.

Un second dispositif identique à celui décrit précédemment est positionné à l'extrémité d'une ailette également en cuivre de 3 cm de large, de 50 cm de long et d'1 mm d'épaisseur. Il servira dans la seconde partie du TP.

Chacun de ces éléments est fixé au sein d'un tube en Plexiglas™ cylindrique, qui va pouvoir être encastré dans un raccord en PVC, afin d'y faire circuler de l'air à différentes vitesses grâce à un ventilateur. La vitesse de l'écoulement généré pourra être modifiée en obstruant plus ou moins l'entrée

d'air du ventilateur. Cette vitesse sera mesurée au moyen d'une sonde à fil chaud, à placer en sortie de tube perpendiculairement à l'axe de celui-ci.

Une alimentation de courant continu avec afficheur et variateur permettra d'imposer différentes tension et courant aux bornes des résistances chauffantes des deux dispositifs, qui seront utilisés successivement.

Un thermocouple de type K est placé sur la plaque du premier dispositif. Sept autres thermocouples de type K sont disposés le long de l'ailette. L'acquisition en température se fait directement sur l'ordinateur grâce à un conditionneur connecté en USB et au logiciel PL Recorder et permet d'avoir l'évolution de température au cours du temps.

3 Manipulations

3.1 Détermination des coefficients d'échanges convectifs h

Commençons avec le dispositif de petite taille.

1. Déterminer le coefficient d'échange convectif, h , pour au moins 4 vitesses d'écoulement, v . Pour déterminer h à une vitesse donnée, procédez de la façon suivante :

- Fixer la vitesse du ventilateur en obstruant l'entrée d'air du ventilateur au moyen des caches disponibles. Mesurer la vitesse de l'écoulement à l'aide de la sonde à fil chaud.
- Faire une acquisition de la température de la plaque éteinte (voie 1) afin de déterminer la température du fluide à la vitesse fixée (attention cette valeur change en fonction de la vitesse imposée).
- Imposer une tension entre 10 et 50 V (le courant va s'adapter), et attendre que la température se stabilise afin que l'on puisse considérer que $P = U \cdot I = \Phi_{cv}$. Relever U , I et cette température. Répéter l'opération avec au moins une autre tension.

Attention à ne jamais dépasser une température de 60°C

- Tracer $P = f(S.)$ et déterminer h .

2. Déterminer la dépendance du coefficient d'échange, h à la vitesse v de l'écoulement en traçant $h = f(v)$. Demander des valeurs de h à vos encadrants si vous manquez de valeurs.
3. Tracer $Nu = f(Re)$ et montrer que l'évolution est de la forme $Nu \propto \sqrt{Re}$

3.2 Profils d'ailette

Travaillons maintenant avec le dispositif de grandes dimensions, constitué d'une ailette de 50 cm de long à l'extrémité de deux plaques de cuivre rectangulaires prenant en sandwich un film chauffant.

1. Mesurer le profil stationnaire de température dans l'ailette pour deux vitesses v , suffisamment différentes, en fixant une tension d'alimentation du film chauffant de 45 V. Vérifier que ces profils sont bien exponentiels.
2. Mesurer alors la longueur caractéristique de ces profils de température, et déterminer sa dépendance à la vitesse de l'écoulement et au coefficient d'échange.
3. Vérifier expérimentalement le bilan : $\Phi = P_{chauffe} = \int h \cdot \mathcal{P} \cdot \Delta T(x) \cdot dx$

Spectrophotométrie - Pyrométrie

Avertissement

Dans votre compte rendu, il est impératif que vos graphes soient numérotés, légendés et discutés dans le texte ; il est également important que vos tableaux soient présentés de manière pertinente : **un tableau ou une figure sans légende et dont le contenu n'est pas discuté dans le texte n'a aucune utilité dans un compte rendu.**

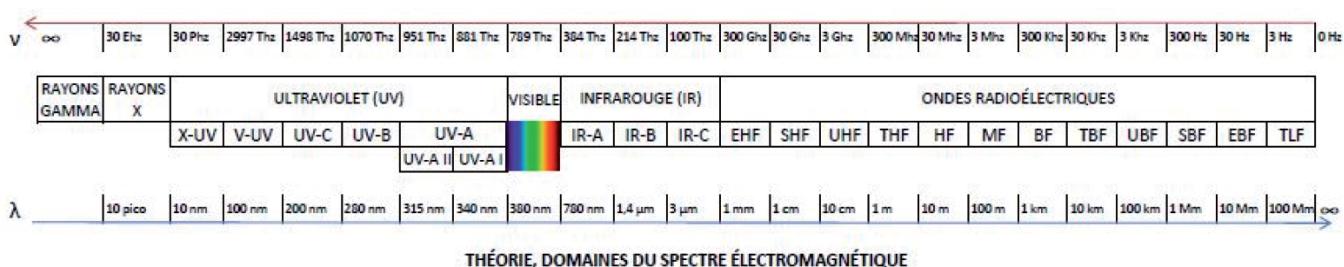
But du TP :

Étudier le spectre de différentes sources de rayonnement afin de savoir identifier un **rayonnement thermique**, et d'en déduire la **température** de la source de rayonnement. C'est le principe d'une méthode de mesure de température, sans contact, obéissant à loi d'émission de rayonnement thermique : **la pyrométrie**.

1 Éléments théoriques et questions préliminaires

1.1 Le spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est divisé en plusieurs domaines repérables par une plage de longueurs d'onde λ ou de fréquences ν . Ce rayonnement se divise en plusieurs catégories, voir figure 1.



Spectre visible par l'œil humain

λ (nm)	< 400	500	590	630	> 750
couleur	ultraviolet	bleu	jaune	rouge	infrarouge

FIGURE 1 – le spectre électromagnétique

- La partie la plus familière à l'être humain est le domaine du **spectre visible**, défini par des longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 **nm** (ordre de grandeur en fréquence ~ 500 THz). L'œil humain a une sensibilité spectrale qui correspond à ce domaine, dans lequel vont rayonner les principales sources lumineuses de la vie courante telles que le soleil et les éclairages artificiels. Ce sont les rayonnements de ces sources, réfléchis par les objets, qui nous permettent de les voir.

- Les rayonnements **les plus énergétiques**¹ (très hautes fréquences) sont, dans l'ordre croissant, : les ultraviolets eux-mêmes classés en UVA, UVB et UVC, les rayons X utilisés par exemple en médecine, les rayons γ produits par les réactions nucléaires. Dans cette dernière catégorie, se trouvent les rayons cosmiques produits par les étoiles.
 - Les rayonnements **les moins énergétiques** sont, dans l'ordre décroissant en fréquence, les infrarouges eux-mêmes classés en proches infrarouges, infrarouges moyens et infrarouges lointains (aux températures courantes pour l'être humain, le rayonnement thermique se situe essentiellement dans l'infrarouge), les micro-ondes et les ondes hertziennes.

Pour un rayonnement donné, la courbe donnant l'intensité lumineuse (luminance monochromatique) en fonction de la longueur d'onde est appelée **spectre**. Sa forme dépend du mode de production de la lumière.

Dans ce TP, nous allons nous intéresser au rayonnement thermique dû aux mouvements des électrons dans les milieux continus et le comparer au rayonnement dû à la désexcitation des atomes ou des molécules d'un gaz.

1.2 Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique d'une surface peut se comparer au rayonnement du **corps noir qualifié d'émetteur et absorbeur parfait**. Celui-ci吸toute la lumière qu'il reçoit à toutes les longueurs d'onde, et émet le rayonnement maximum en fonction de la longueur d'onde et de la température. La **loi de Planck** décrit la répartition de l'énergie électromagnétique rayonnée par un corps noir à une température donnée T , en fonction de la longueur d'onde λ dans un milieu d'indice de réfraction n .

La luminance monochromatique du corps noir, c'est-à-dire le flux émis par unité de surface apparente, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde, s'exprime communément² en $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$ et s'écrit :

$$L^0(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} = C_1 \lambda^{-5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad \leftarrow \text{Loi de Planck} \quad (1)$$

avec :

- la célérité de la lumière dans le milieu $c = c_0/n = \lambda\nu$ en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, c_0 étant la célérité dans le vide, et ν , la fréquence de l'onde en Hz,
 - la constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$,
 - la constante de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$,
 - les constantes $C_1 = 2hc^2 = 1,19106 \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}^{-1}$ et $C_2 = \frac{hc}{k} \approx 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$.

Il est à noter que pour certaines valeurs de longueurs d'onde et de température, le terme exponentiel devient très grand devant 1 et la loi de Planck peut être simplifiée.

La loi de Planck, éq. 1 et illustrée fig. 2, montre que plus un corps est **chaud**, plus le **flux lumineux** qu'il émet **est grand** à toutes les longueurs d'onde. De plus, la **luminance monochromatique** passe par un **maximum** pour un λ_{max} qui dépend de T , la **température** de la source de rayonnement. La **loi du déplacement de Wien** permet de connaître la position de ce maximum en fonction de la température T :

$$\lambda_{max} \text{ en } \mu\text{m} = \frac{h \ c}{4.9651 \ k \ T} = \frac{2898}{T} \quad \leftarrow \text{Loi de Wien} \quad (2)$$

1. Un rayonnement très énergétique, $E = h\nu$, est caractérisé par une fréquence ν élevée, donc une petite longueur d'onde λ .

2. Dans le Système International, l'unité de luminance est le W·m⁻²·sr⁻¹·Hz⁻¹

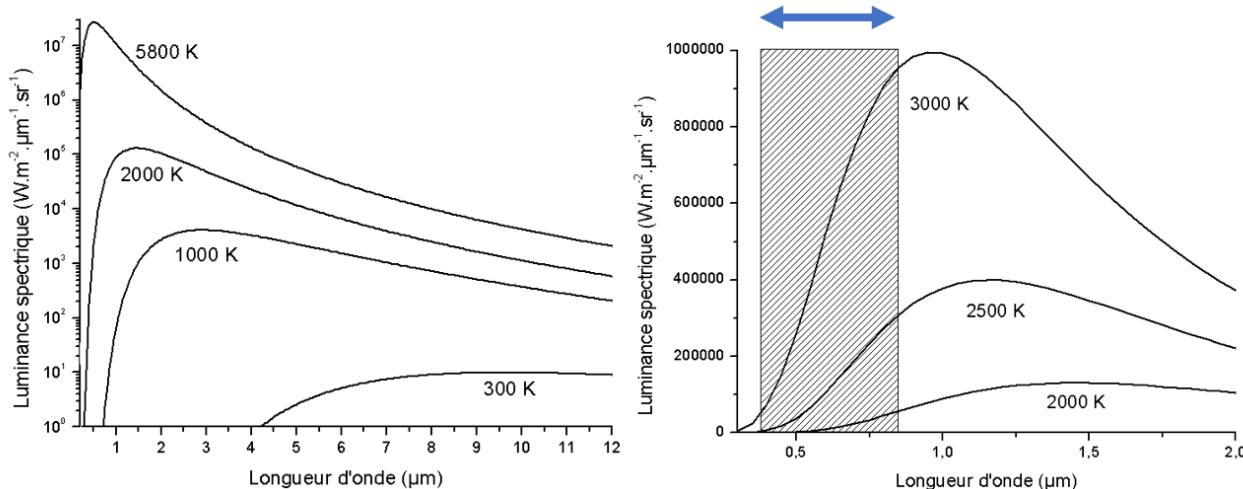


FIGURE 2 – La loi de Planck

Pour un corps réel à une température T , la luminance $L(\lambda, T)$ peut s'exprimer en fonction de celle du corps noir $L^0(\lambda, T)$ et de son émissivité ε qui est toujours inférieure à 1 (car seul le corps noir a une émissivité égale à 1) :

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot L^0(\lambda, T) = L^0(\lambda, T_L) \quad (3)$$

Une autre façon de décrire l'émissivité d'un corps à une longueur d'onde donnée est de déterminer la température de luminance T_L , c'est-à-dire la température provoquant chez un corps noir la même luminance $L(\lambda, T) = L^0(\lambda, T_L)$.

Cette température de luminance, T_L , est toujours inférieure à la température du corps réel T . Sa mesure permet de calculer la température réelle si et si seulement si l'émissivité ε de celui-ci est connue.

Remarque : lorsque l'émissivité ε est indépendante de λ , le corps réel est appelé corps gris.

Lorsque la température de la source de rayonnement est suffisamment élevée pour pouvoir écrire que $\exp(C_2/\lambda T) \gg 1$, cette expression se simplifie :

$$L(\lambda, T) \approx \varepsilon(\lambda, T) \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right) = \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T_L}\right) \approx L^0(\lambda, T_L) \quad (4)$$

1.3 Le pyromètre optique

Le schéma général d'un pyromètre optique peut être assimilé à un dispositif optique simple : une lentille (ou un miroir) forme l'image de la source à mesurer sur toute la surface d'un détecteur photoélectrique. Il existe trois grandes familles de pyromètres : les monochromatiques, les bi-chromatiques, et ceux à large bande qui mesurent une énergie. Ce TP va vous faire découvrir l'intérêt de la mesure de la luminance d'une source à 2 longueurs d'onde (bi-chromatique) qui est de pouvoir s'affranchir de la connaissance de l'émissivité, ε , de la source.

La pyrométrie monochromatique consiste à mesurer la luminance d'un corps à une seule longueur d'onde afin d'en déduire sa température T . Cependant, il faut toujours garder à l'esprit que cette mesure ne peut être interprétée correctement que si l'on connaît par ailleurs la valeur de l'émissivité du corps $\varepsilon(\lambda, T)$.

Certains pyromètres fonctionnent par comparaison : l'œil de l'utilisateur va comparer la luminance de l'objet à mesurer avec celle d'une source présente dans l'appareil (une lampe à filament de tungstène), dont il va faire varier la température afin d'égaler la luminance à celle du corps à mesurer. Il

s'agit de pyromètres à disparition de filament.

La **pyrométrie bi-chromatique** consiste, elle, à mesurer le rapport de deux luminances à deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 de la même source de rayonnement.

1.4 Travaux préliminaires

Les réponses à ces questions devront apparaître dans le compte rendu et montrés à l'enseignant au cours de la séance

1. Retrouver l'expression de λ_{max} (éq. 2), la longueur d'onde du maximum de la luminance donnée par la loi de Planck.

2. Lorsque la température d'un objet augmente, le maximum de son spectre d'émission :

- (a) se décale vers de plus petites longueurs d'ondes.
- (b) se décale vers de plus grandes longueurs d'ondes.
- (c) ne se décale pas, car il ne dépend pas de la température.

Justifiez votre réponse.

3. Lorsque la température d'un objet augmente petit à petit, le premier rayonnement émis par cet objet, qui est visible par votre œil, sera de couleur :

- (a) bleu (b) blanc (c) rouge (d) violet (e) noir (f) vert

Justifiez votre réponse.

4. Expliquez comment est obtenue l'expression $\frac{1}{T} - \frac{1}{T_L} = \frac{\lambda}{C_2} \ln(\varepsilon(\lambda, T))$, reliant la température vraie T et la température de luminance T_L d'un corps réel.

Avec un pyromètre monochromatique, vous visez un objet qui est à la température $T = 1500$ K.

- (a) À $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$, avec un objet ayant une émissivité $\varepsilon(\lambda, T) = 0,9$, vous mesurez une luminance $L(\lambda, T) = 3,035 \cdot 10^9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$. Déduisez la valeur de T_L .

- (b) Toujours à $0,85 \mu\text{m}$, vous mesurez maintenant, face à un autre matériau d'émissivité $\varepsilon(\lambda, T = 1500 \text{ K}) = 0,1$, une luminance $L(\lambda, T) = 3,373 \cdot 10^8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$. Quelle est dans ce cas la valeur de T_L ? Qu'en concluez-vous?

5. La figure 3 montre le schéma de l'expérience de la partie pyrométrie du TP et sa représentation sous forme d'une succession de fonctions de transferts. En utilisant l'expression simplifiée de la loi de Planck, éq. 4, établissez l'expression de la tension v_{λ_1} mesurée en bout de chaîne :

$$v_{\lambda_1} = K(\lambda_1)\varepsilon(\lambda_1)\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1 T}\right)$$

Donner l'expression de la constante $K(\lambda_1)$ en Volts.

2 Expériences à réaliser lors de la séance

2.1 Spectrophotométrie

2.1.1 Matériel

Le dispositif expérimental se compose d'un spectrophotomètre piloté grâce au logiciel SPID-HR, de plusieurs sources de rayonnement et de plusieurs filtres. Ce spectrophotomètre est un appareil qui permet de mesurer le spectre du rayonnement de la source que l'on souhaite analyser. Comme l'illustre la figure 4, une fibre optique amène le rayonnement devant un miroir parabolique qui va réfléchir celui-ci, sous la forme d'un faisceau parallèle, vers un réseau.

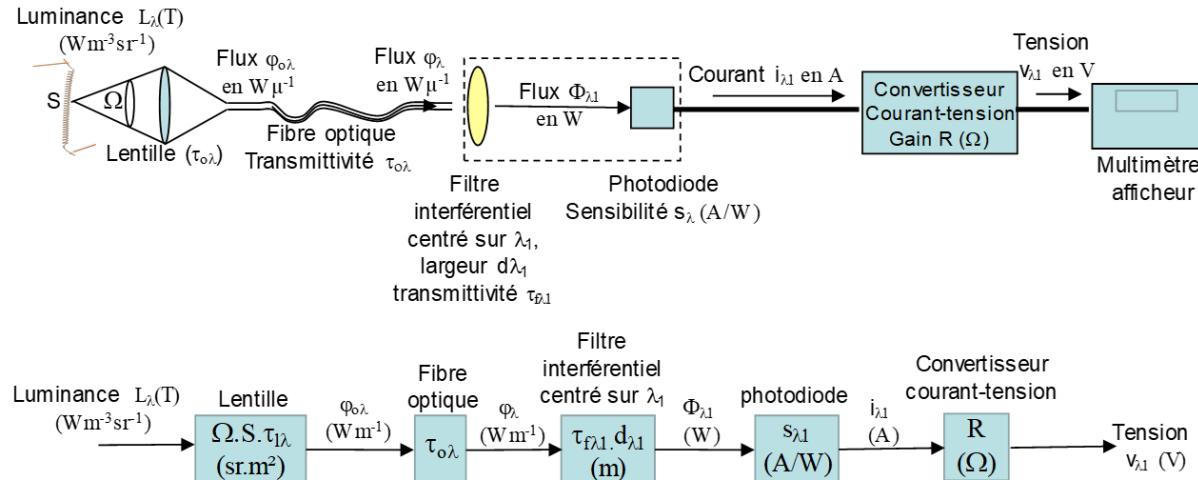


FIGURE 3 – Schéma du dispositif expérimental constituant le pyromètre

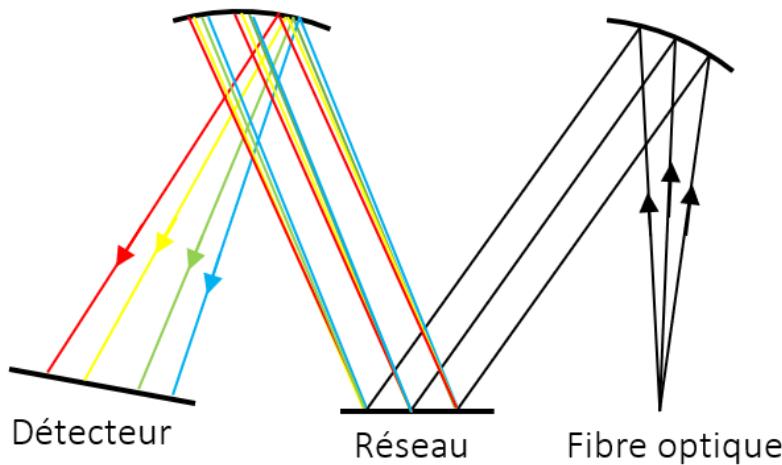


FIGURE 4 – Principe du spectrophotomètre

Le réseau est une surface gravée de manière régulière de telle façon que le pas du réseau soit de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Lorsqu'il est éclairé, le réseau produit des figures de diffraction pour chaque longueur d'onde ; il se produit alors des interférences entre les faisceaux réfléchis qui vont être constructives pour une longueur d'onde donnée dans une direction. Le faisceau parallèle incident est ainsi réfléchi en autant de faisceaux parallèles que de longueurs d'onde. Ces faisceaux sont de nouveau réfléchis par un miroir parabolique qui focalise la lumière sur le détecteur. Ce qui n'était qu'un cône de lumière polychromatique à la sortie de la fibre optique est, à la sortie du spectromètre, un alignement de points de lumière monochromatiques. Ce spectromètre permet d'analyser la lumière comprise entre 376 nm et 846 nm.

Le détecteur est une barrette CCD (Charged Coupled Device) composé de 2048 pixels de $12,7 \mu\text{m}$ de large. Chaque pixel reçoit la lumière correspondant à une petite plage de longueurs d'onde (470 nm divisés par 2048 photodiodes, soit 0,23 nm par pixel, ce qui constitue un ordre de grandeur de la résolution du système). Pendant le temps de pose (réglable avec le logiciel), chaque pixel produit une quantité d'électrons proportionnelle au flux lumineux reçu ; ces électrons sont stockés dans des condensateurs qui sont déchargés à la fin du temps de pose afin de mesurer le courant reçu.

Le logiciel SPID-HR (cf notice sur place) pilote l'acquisition des spectres et permet leur affichage en temps réel sur l'écran.

2.1.2 Expériences à réaliser

- Observez le spectre d'émission des différentes sources à votre disposition : les tubes fluorescents, la lampe halogène et son réflecteur dichroïque, la lampe à décharge, les diodes électroluminescentes, une flamme de bougie, etc... Sur la table, vous trouverez plusieurs matériaux, filtres au travers desquels il est intéressant d'observer certaines de ces sources.
- Parmi les sources que vous avez observées, choisissez-en quatre dont la lampe à décharge et la lampe à filament de tungstène, dont vous commenterez les spectres en indiquant la nature du rayonnement observé : s'agit-il d'un rayonnement thermique ? (Reportez-vous aux explications en annexe 3 si vous avez besoin d'explications)
- Identifiez les raies du spectre discret de la lampe à décharge. Vous trouverez sur la table les valeurs des raies spectrales de la lampe à décharge, dont nous disposons. Comparez les valeurs que vous avez mesurées sur votre spectre avec ces données. Est-ce que le spectrophotomètre est correctement étalonné ?
- Observez le spectre d'émission de la lampe à filament de tungstène pour trois températures de filament (déduites de la tension et du courant d'alimentation de la lampe). Est-ce en accord avec ce que vous savez du rayonnement thermique ?

Remarque : faites une présentation synthétique de vos mesures et analysez vos résultats.

2.2 Pyrométrie

Dans cette deuxième partie, il s'agit de mettre au point un pyromètre bi-chromatique afin de mesurer la température d'une source de rayonnement thermique.

2.2.1 Matériel à votre disposition

La **lampe à filament de tungstène** est une lampe classique à incandescence, qui peut être alimentée avec un courant variable allant jusqu'à 1 A (valeur maximum à respecter) pour une alimentation continue. Plus le courant est important, plus la température du filament est élevée, et plus sa résistivité $\rho(T)$, sa longueur $\ell(T)$ et sa section $S_{fil}(T)$ augmentent.

La mesure de la résistance, R , du filament, comparée à sa valeur R_0 à température ambiante (≈ 300 K), permet de remonter à la température T , voir figure 5, et d'établir l'expression :

$$T = -0,053 (\rho_0 R(T)/R_0)^2 + 36,1 \rho_0 R(T)/R_0 + 125$$

avec la résistivité du tungstène $\rho_0 = 5,65 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et $R_0 = 1,65 \Omega$, la résistance du filament à température ambiante.

Un voltmètre et un ampèremètre permettent de réaliser les mesures de tension et de courant et donc de déduire la résistance $R(T)$ de la lampe. À partir de la figure 5 (que vous retrouverez aussi en salle), vous déduirez la température du filament lors de vos différentes mesures.

La **lentille** permet de former une image floue du filament afin d'éclairer l'entrée de la fibre optique de manière uniforme.

La **fibre optique** est plus exactement un faisceau de fibres optiques à saut d'indice disposées en couronne. Ce faisceau se divise en trois : une fibre centrale qui ne nous servira pas, une première couronne de fibres qui amène le flux lumineux jusqu'à une photodiode à travers un filtre interférentiel centré sur 940 nm, et une seconde couronne de fibres qui amène le flux lumineux jusqu'à une photodiode à travers un autre filtre interférentiel centré sur lui sur 800 nm.

Les **photodiodes** transforment en courant électrique le flux lumineux, qu'elles reçoivent aux longueurs d'onde correspondant aux filtres interférentiels placés devant elles. Un boîtier électronique

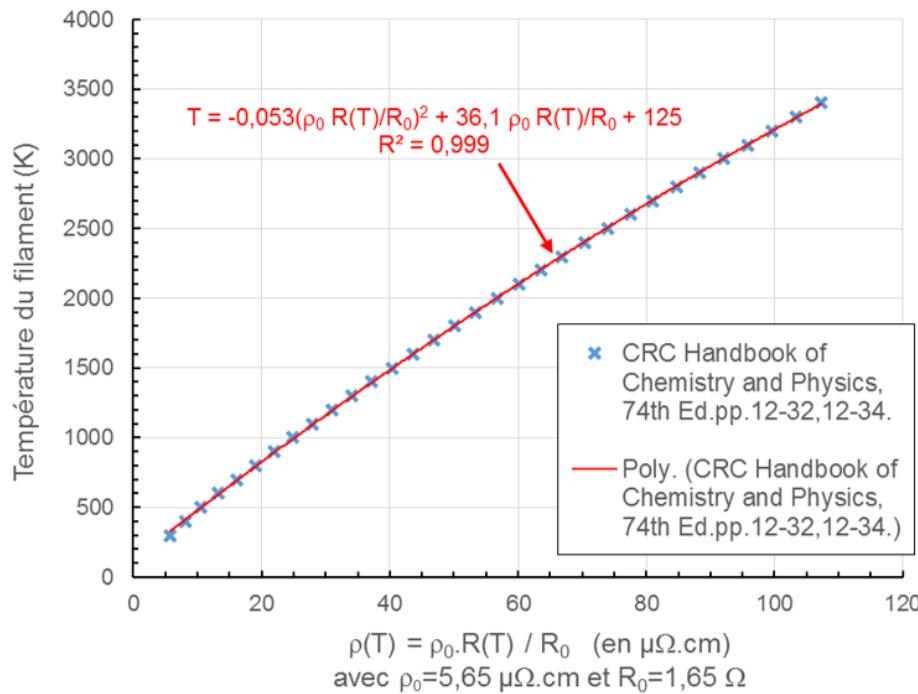


FIGURE 5 – Variation de la résistance du filament de tungstène en fonction de la température

vous permet ensuite de convertir ce courant en tension $V_{conv} = RI$, lue sur un multimètre Keithley (tension maximum : 12 V). Le facteur de proportionnalité entre le courant et la tension peut être ajusté sur la face avant du boîtier. Dans la suite du texte, nous appellerons ce boîtier le convertisseur courant/tension.

L'**amplificateur logarithmique** permet lui de délivrer une tension proportionnelle au logarithme du rapport des courants qu'il reçoit, c'est-à-dire $V_{out} = 5 \cdot \ln(I_1/I_2)$

2.2.2 Expériences à réaliser

Pour plusieurs valeurs d'intensité d'alimentation de la lampe à filament de tungstène, inférieures à 1 A :

- Mesurez la résistance $R(T)$ et déduisez la température T du filament ;
- Mesurez la tension en sortie du convertisseur courant/tension V_{conv} pour au moins une photodiode branchée en entrée ;
- Mesurez la tension de sortie de l'amplificateur logarithmique V_{out} .

Attention : ne pas confondre le courant d'alimentation du filament de tungstène avec le courant fourni par les photodiodes.

Exploitation des mesures de courant des photodiodes (utilisez le travail préliminaire) :

- Pour les deux photodiodes, tracez l'évolution du logarithme de la tension en fonction de $1/T$.
- Ces courbes sont-elles conformes à ce que vous attendiez ?
- Quelle information peut-on retrouver grâce à chacune de ces courbes ? Les différences observées avec la réalité peuvent-elles s'expliquer par les incertitudes de mesure ?
- Est-il possible d'utiliser ces courbes comme étalonnage pour mesurer la température d'une autre source lumineuse que la lampe à incandescence ? Si oui, pourquoi et sous quelles conditions ? Sinon, quel est l'élément qui rend cette mesure impossible ?

Exploitation des mesures de tension de sortie de l'amplificateur logarithmique :

- Tracez l'évolution de la tension V_{out} en fonction de $1/T$.
- Est-il possible d'utiliser cette courbe comme étalonnage pour mesurer la température d'une autre source lumineuse que la lampe à incandescence ? Si oui, pourquoi et sous quelles conditions ? Sinon, quel est l'élément qui rend cette mesure impossible ?

D'après votre expérience, quelle est la meilleure méthode pyrométrique ? Utilisez la méthode de votre choix pour mesurer la température d'une autre source thermique.

3 Annexe : les sources lumineuses

Le rayonnement atomique et moléculaire

Le rayonnement issu de la désexcitation des atomes ou des molécules d'un gaz présente bien souvent un spectre très différent d'un spectre d'origine thermique. La différence la plus flagrante est la présence de pics d'émission. Ces raies s'expliquent par la mécanique quantique, qui apprend que l'énergie d'un atome ou d'une molécule ne peut pas prendre n'importe quelle valeur. Par ce fait, les énergies des photons émis par le passage d'une de ces particules d'un état d'énergie excité vers un état plus stable ont des valeurs bien particulières qui dépendent uniquement de la nature de la particule émettrice. Cette particularité permet d'ailleurs d'identifier les espèces présentes dans le milieu émetteur. Les intensités relatives des raies émises par une même espèce permettent également d'obtenir la température du milieu. En effet, si le milieu est transparent, l'intensité d'une raie émise par les atomes d'un milieu de température T est proportionnelle à la densité N^* d'atomes dans l'état excité, à la probabilité A pour que l'atome se désexcite, et à l'énergie de la transition $h\nu$.

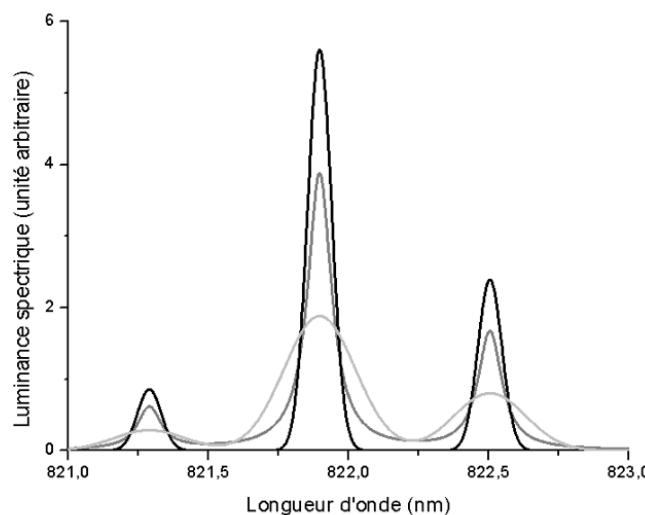


FIGURE 6 – Les trois raies d'émission de l'azote à une température d'équilibre de 6000 K enregistrées dans différentes conditions

Si les niveaux d'énergie des atomes et molécules avaient des valeurs infiniment précises, les raies seraient des pics infiniment fins, mais il existe des phénomènes physiques qui contribuent à élargir ces raies : le principe d'incertitude d'Heisenberg, l'effet Doppler, les collisions entre les particules, les champs électrique (effet Stark) et magnétique (effet Zeeman). La mesure elle-même induit une incertitude et les raies mesurées ont en fait l'allure de gaussiennes ou de lorentziennes ou d'une combinaison de ces formes. La figure 6 représente trois raies d'émission de l'azote atomique à une température d'équilibre de 6000 K enregistrée dans différentes conditions.

Les lampes à décharge

Une décharge électrique excite les atomes de mercure, zinc et cadmium présente dans l'ampoule. Ces atomes se désexcitent en émettant un rayonnement spectralement fin dont la longueur d'onde leur est caractéristique.

Exemple : le Tube fluorescent appartient à la famille des lampes à décharge. C'est un tube rempli d'un gaz rare à faible pression et d'un peu de mercure à l'état gazeux. La décharge électrique dans le tube excite les atomes de mercure qui émettent alors un rayonnement dans l'ultraviolet. Ce rayonnement est converti en lumière visible par la poudre fluorescente déposée sur les parois du tube. La couleur de la lumière émise dépend de la nature de la poudre fluorescente utilisée.

La diode électroluminescente

La diode est traversée par un courant qui produit une recombinaison électron-trou au niveau de la jonction et de l'énergie est libérée sous forme de photons. La puissance lumineuse émise est une fonction linéaire de l'intensité du courant qui traverse la diode.

Exemples de rayonnement thermique

La lampe à incandescence

Dans une ampoule sous basse pression, un filament de tungstène est porté à incandescence. L'efficacité lumineuse est d'autant plus grande que la température est élevée, mais l'évaporation du filament augmente avec la température et diminue la durée de vie de l'ampoule.

La lampe halogène

Le principe est le même que pour la lampe à incandescence mais la tension d'alimentation est plus basse. À puissance égale, l'intensité du courant est plus élevée et la température du filament, qui est également plus gros, est plus élevée. La durée de vie est allongée par la combinaison des vapeurs de tungstène avec l'halogène présent dans l'ampoule ; le composé formé se redépose sur le filament en libérant l'halogène. La température du filament étant plus élevée, la lumière émise est plus proche du visible. La lampe peut être associée avec un réflecteur parabolique dichroïque dont le coefficient de réflexion est grand dans le visible et faible dans l'infrarouge. Ce dispositif permet également de contrôler l'ouverture du faisceau lumineux.

4 Références

- CRC Handbook of Chemistry and Physics, 74th Ed. pp.12-32, 12-34
 - Calibration d'une lampe à ruban de tungstène, C. De Izarra. 7eme Colloque Capteur 2009, Bourges, Mar 2009, BOURGES, France
 - Pyrométrie optique, F. CABANNES, Techniques de l'ingénieur R2610 (1990)
 - Characterization of an optical fiber bundle sensor, L. Bergougnoux, J. Misguich-Ripault, and J-L. Firpo, Review of Scientific Instruments, Vol. 69, 5, 1985-1990 (1998)
- Rédacteurs et contacts :
- Laurence Bergougnoux (laurence.bergougnoux@univ-amu.fr)
Christian Mariani (christian.mariani@univ-amu.fr)
Fabrice Rigollet (fabrice.rigollet@univ-amu.fr)