

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE DE
DE KYMENLAAKSON

Départements de génie mécanique

Génie énergétique

Touali Yo Antoine

ETUDE DU RAYONNEMENT THERMIQUE DANS SA PHASE D'ABSORPTION ET D'
EMISSION A TRAVERS UNE CHAUDIERE A GAZ.

ANALYSES MATHÉMATIQUES ET CHIMIQUES DES RESULTATS ISSUES DES
MESURES REALISEES EN LABORATOIRE.

Thèse de Bachelor 2010

RESUME

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE DE

DE KYMENLAAKSON

Programme de génie énergétique

TOUALI, YO ANTOINE Etude du rayonnement thermique dans sa phase d'absorption et d'émission à travers une chaudière à gaz: Analyses mathématiques et chimiques des résultats issues des mesures réalisées en laboratoire.

Directeur de recherches Markku Huhtinen

Superviseur des travaux Risto Korhonen et Mikko Nykänen

Thèse 56 pages + 3 annexes

Décembre 2010

Mot-clé Rayonnement, longueur d'onde, absorption, émission, thermique.

Cette thèse a pour objectif de limiter les pertes de gaz pendant la production d'énergie dans une chaudière. La thèse s'est limitée sur deux centres d'intérêt distinct, qui ont permis de quantifier les données recueillies en laboratoire. Hormis les données théoriques sur lesquelles la thèse est fondamentalement liée, les calculs mathématiques et analyses chimiques ont permis de tirer une conclusion qui met en lumière les phénomènes d'absorption et d'émission de gaz de manière synchronique avec les longueurs d'ondes issues du rayonnement d'un corps noir. La première partie de la thèse est essentiellement basée sur les lois de l'électromagnétique et les principes d'un corps noir. La seconde partie est fondée sur les mesures effectuées en laboratoire et leurs analyses tant mathématiques que chimiques. Les tests ont été réalisés au laboratoire de l'école supérieure polytechnique de kymenlaakson, sur un corps noir de marque Thermo Gauge Instruments. Les mesures ont été effectuées sur un intervalle de longueur d'onde comprise entre de 200 nm à 9600 nm pendant une semaine, soit du 22 au 26 novembre.2010. Le combustible utilisé pour l'alimentation de la chaudière est du propane (C_3H_8). Les conditions normales de températures et de pressions ont été respectées pour garantir la fiabilité des résultats.

Les mesures réalisées ont fait l'objet de tracer de courbes, qui ont permis en un premier temps de déterminer la source de lumière utilisée à partir du spectre électromagnétique, en application avec les lois du corps noir. Puis, les données chimiques ont permis de comprendre et de limiter les pertes de gaz dans une chaudière.

PREFACE

Les expériences de cette thèse ont été réalisées au laboratoire de l'école supérieure polytechnique de Kymenlaakson, sous l'assistance des professeurs Markku Huhtinen et Risto Korhonen.

Le rayonnement thermique dans sa phase d'absorption et d'émission d'une longueur d'onde à travers une chaudière, est un thème qui s'inscrit dans le programme de génie énergétique.

J'aimerais remercier mon superviseur Mikko Nykänen, qui a été d'un soutien sans faille durant la réalisation des expériences en laboratoire. Ses instructions et conseils m'ont été très utiles dans l'élaboration de m'a thèse. Mes remerciements aux personnels du laboratoire d'énergie pour leurs assistantes. Je remercie également madame le professeur Mari Laakson-Suutari pour la supervision linguistique.

Je remercie également tous ceux qui m'ont aidées de près ou de loin, tant matériellement que moralement. Car durant les quatre années effectuées à l'école supérieure polytechnique de Kymenlaakson, j'ai eu le soutien inestimable de plusieurs personnes dont mon professeur de langue Pirkko Suolahti, mes amis et en particulier ma famille, sans qui, je n'aurais pas pu surmonter toutes les difficultés rencontrées.

Place et date

Yo Antoine, Toual

TABLE DES MATIERES

RESUME

PREFACE

1.0 INTRODUCTION	7
2.0 THEORIE	8
2.1 Le spectre de la lumière	8
2.1.1 Couleur et longueur d'onde	9
2.2 Spectre de rayonnement électromagnétique	10
2.2.1 Les propriétés du rayonnement électromagnétique	11
2.2.2 Historique	11
2.2.3 Les régions du spectre électromagnétique	12
2.2.3.1 Lumière visible	12
2.2.3.2 Les ondes ultraviolettes	13
2.2.3.3 Les rayons X	13
2.2.3.4 Infrarouge	14
2.2.3.5 Les rayons gammas	14
2.3 Spectroscopie	15
2.3.1 Spectre et température	16
2.3.2 Spectre continu	16
2.3.3 Spectre de raies d'émission	17
2.3.4 Spectre d'absorption	18

2.3.5 Analyse spectroscopique	19
2.4 Monochromateur ou spectroscopie	19
2.4.1 Spectroscopie à fente	19
2.4.2 Spectroscopie sous vide	20
2.4.3 Spectrophotomètre UV- Visible ou IR	20
2.4.4 Absorption atomique	21
2.5 Corps noir	21
2.5.1 Rayonnement thermique d'un corps noir	21
2.5.2 Caractéristique d'un corps noir	22
2.5.3 Les lois de l'électromagnétisme	24
2.5.3.1 Loi de Maxwell	26
2.5.3.2 Loi de Kirchhoff	26
2.5.3.3 Loi de Planck	27
2.5.3.4 Loi de déplacement de Wien	29
2.5.3.5 Loi de Stefan-Boltzmann	30
2.5.3.6 Application de la loi de Max Planck	32
3 TRAVAUX PRATIQUES	34
3.1 Description des matériels de travail	34
3.1.1 Source lumineuse	35
3.1.2 Les différentes lentilles	38
3.1.3 Le monochromateur	39

3.1.4 Le système de radiométrie	39
3.2 Détecteur thermophile ou pyromètre	40
3.3 Systèmes de mesures des corps chimiques.	40
3.4 Mesures effectuées par rapport aux différents filtres	41
3.4.1 Interprétations des mesures effectuées en fonction des longueurs d'onde.	42
3.4.2 Absorption des corps chimiques dans les différents filtres	43
3.4.2.1 Déterminons la masse de dioxyde de carbone (CO ₂) émise dans l'air	43
3.4.2.2 Déterminons le volume d'air utilisé (I) lors de la combustion du gaz	43
3.4.2.3 Déterminons la quantité d'air échappé (V) lors de la combustion du gaz	44
3.4.2.4 Déterminons la puissance (φ) du rayonnement du corps noir (thermo Gauge)	44
3.4.3 Emission, absorption et de transmission du CO ₂ par rapport au filtre F5.	45
3.4.4 Emission, absorption et de transmission du C, H par rapport au filtre F1-3	49
3.5 Applications des lois du rayonnement thermique dans la vie quotidienne	50
3.5.1 Impact des ondes électromagnétiques	51
3.5.2 Les GSM et les antennes relais	51
3.5.3 Les chauffages électriques par rayonnement infrarouge	52
3.5.4 Les cellules solaires photovoltaïques	53

3.5.4.1 Principes de fonctionnements	53
3.5.4.2 Deux types dopages sont possibles	54
4.0 CONCLUSION	55
5.0 REFERENCES	56
6.0 ANNEXE	57

Document 1 Mesures des éléments chimiques

Document 2 Schéma du dispositif expérimental

Document 3 Tableau récapitulatif des données à mesurer en laboratoire.

SYMBOLES

C	= Vitesse de la lumière (vide) = $2,99792458 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$
H	= Constante de Planck = $6,6260755 \times 10^{-34} \text{Js}$
σ	= Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$
λ	= Longueur d'onde en mètre (m)
P_λ	= puissance en watt (W)
α	= L'absorptance
ρ	= Le rayonnement réfléchi
τ	= La transmission
L_λ	= Luminance maximal
e	= Electron volts = $4,135669 \times 10^{-15} \text{eVs} = 1,05457266 \times 10^{-34} \text{Js}$
ϵ_0	= Permittivité du vide ($1/\mu_0 c^2$) = $8,854187817 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$
ϵ	= émissivité d'un corps noir = 1
T	= Température absolue d'un corps noir en $^\circ\text{C}$
M	= émission du corps noir en joule (j)
W_b	= Energie d'un corps noir de Stefan-Boltzmann en joule (j)
L	= Loi de corps noir de Stefan-Boltzmann en joule (j)
W_r	= Energie d'un corps réel en joule (j)
η	= Rendement du monochromateur
A	= Air du rayonnement en m^2
φ	= Puissance du rayonnement en W
T_c	= Température environnement en K
T_r	= Température de refroidissement en K
S_λ	= Formule de Planck
E_d	= Densité d'énergie en joule (j)

λ_m	=Loi de déplacement Wien en nm
P_1	=Puissance absorbée en W
P_2	=Puissance utile en W
f_{\max}	=Fréquence maximale en Hz
V	= Quantité de gaz échappé en $m^3(n)/s$
V_{O1}	= Quantité théorique de gaz échappé en milieu humide en $m^3(n)/s$
V_{O2}	= Quantité théorique de gaz échappé en milieu sec en $m^3(n)/s$
m_{pa}	=Masse de gaz consommée lors de la combustion en kg/s
C_{mco}	=Masse volumique du monoxyde de carbone en $kg/m^3(n)$
w	=Débit de gaz consommé lors de la combustion en m^3/s
I	=Volume massique d'air consommé en $m^3(n)/kg$
I_0	=Volume massique théorique d'air consommé en $m^3(n)/kg$
λ	= Coefficient d'air échappé lors de la combustion
m_{co2}	= Masse de dioxyde de carbone en kg (n)
G_{ABS}	=Rayonnement absorbée
G_{REF}	=Radiation réfléchie
G_{TR}	=Rayonnement transmis
G	=Rayonnement incident
M_1 et M_2	= Lentilles
BB	=Blackbody (corps noir)
UV	=Ultraviolet
IR	=Infra rouge
GSM	= Global System for Mobil communication
REM	=Rayonnement électromagnétique

1.0 INTRODUCTION

Après avoir exploité sa propre force et celle des animaux, l'homme a appris à exploiter les énergies contenues dans la nature (d'abord les vents, énergie éolienne et les chutes d'eau, énergie hydraulique), en lui fournissant une quantité croissante de travail mécanique par l'emploi de machines : machines-outils, chaudières et moteurs. L'énergie est donc la capacité d'un système à modifier un état à produire un travail. Cette quantité de travail développé requiert de la force pour produit de la chaleur. Ces échanges communs entre les phénomènes physiques (force, chaleur), sont contrôlés par les lois et principes de la thermodynamique. Dans notre étude, nous allons nous focaliser sur un élément essentiel de la thermodynamique qui est le rayonnement thermique. Imaginons par exemple le cas d'un métal qui s'échauffe. Au début, lorsque le métal est à quelques centaines de degrés, rien n'est visible à l'œil nu. Néanmoins, il est possible de sentir la chaleur du métal en plaçant la main à proximité. Cette sensation traduit le fait que le métal rayonne une lumière infrarouge qui chauffe la main mais n'est pas visible. Lorsque la température continue à augmenter, le métal se met petit à petit à briller et à devenir incandescent. Sa couleur change également peu à peu, passant du rouge à l'orange puis au jaune. La lumière qui provient d'un corps dépend donc de sa température. A quelques centaines de degrés, le métal émet dans l'infrarouge, à 3000 degrés, il rayonne surtout dans le rouge et à 6000 degrés dans le blanc.

Ainsi tous les objets émettent un rayonnement, c'est à dire, les ondes électromagnétiques, en raison de leur température, nous nous référons à ce rayonnement comme thermique. De même, ils absorbent le rayonnement de leur environnement. Si un corps est plus chaud que son environnement il émet plus de rayonnement que l'absorbe, et il tend à se refroidir. Si un corps est plus froid que son environnement, il absorbe plus de rayonnement qu'il émet, et tend à se réchauffer. Habituellement, il finira par atteindre l'équilibre thermique avec son environnement (un état dans lequel ses taux d'absorption et d'émission de rayonnement sont égaux).

Le spectre du rayonnement thermique d'un corps solide chaud est continu. Autrement dit, il émet un rayonnement électromagnétique dans une gamme continue de longueurs d'onde (ou fréquences), sur une fourchette assez large de longueurs d'onde autorisées. Nous nous référons à l'ensemble de toutes ces fréquences comme son spectre et sont souvent intéressés, non seulement dans la gamme de fréquence mais aussi la quantité de rayonnement dans un intervalle de fréquence faible. En particulier, il est intéressant d'examiner la partie du spectre où une majorité de la radiation est émise par l'organisme, soit la prédominante dans le cadre de son spectre du rayonnement. Toutefois, quand la température d'un corps augmente, le rayonnement émis est élevé, et également la partie dominante de son quart de spectre du rayonnement commence à être visible pour l'homme. Nous avons l'habitude de décrire cela, comme un changement de température, et que certains objets chauffent de plus en plus vite que d'autres, la couleur prédominante du quart de l'objet chauffé du rouge terne par l'orange-jaune clair ou bleuté.

Dans le monde réel, on peut obtenir une très bonne approximation à un radiateur idéal en tenant compte du rayonnement émis par un petit trou d'un corps creux, chauffé à une température donnée. Le rayonnement est émis par les murs intérieurs de la cavité, et devient assez mélangés avant qu'elle arrive à trouver le petit trou pour s'échapper à la suite de cela, il dépend très peu du matériel réel de l'organisme, ou de sa surface. Nous renvoyons donc à ce rayonnement que le rayonnement de la cavité. On peut aussi considérer cette situation à l'envers, et considérer que le rayonnement est absorbé plutôt que des émissions par ce trou. Comme il est tout simplement un trou avec un creux sombre de l'autre côté, elle absorbe toutes les radiations qui le frappent. C'est pourquoi, souvent un tel rayonnement est pris comme référence, au contraire, que le rayonnement du corps noir. Nous allons maintenant passer le reste de ce document à tenter donc de comprendre les détails du spectre du rayonnement du corps noir, et sa dépendance de la température. Pour mieux comprendre notre démarche, nous montrerons à l'aide de résultats théoriques et pratiques, l'avantage que représente la connaissance du rayonnement thermique à travers le spectre de la lumière et la variation de la température dans la production de l'énergie. Nous aurons deux parties essentielles pour illustrer notre étude.

L'objectif de notre thèse est d'analyser les données recueillies en laboratoire enfin de les comparer aux résultats théoriques pour en tirer une conclusion qui permettront de corriger les données ultérieures. Notre analyse des données se focalisera sur l'absorption et l'émission de la radiation thermique.

2 THEORIE

2.1 La lumière du soleil

Ce que nous appelons la lumière dans la vie de tous les jours, est une toute petite partie du rayonnement venant du Soleil. C'est la partie que l'œil humain détecte. Le Soleil n'émet pas que de la lumière visible. La lumière met 8 minutes 22 secondes pour aller de la surface du Soleil à la Terre. Le rayonnement électromagnétique se propage à la vitesse $c = 299790$ km/s. Certaines parties du rayonnement solaire n'atteignent pas le sol, parce qu'elles sont absorbées par l'atmosphère. Pour observer le ciel dans ces longueurs d'onde, il faut envoyer les récepteurs dans l'espace.

Les quantités qui définissent la lumière sont :

- La fréquence, f , est le nombre de pulsations par seconde (l'unité est l'hertz)
- La période, $f = 2\pi/T$ est la durée d'une pulsation (l'unité est la seconde)
- La longueur d'onde $\lambda = c/p$ (l'unité est le mètre)
- L'énergie $E = hf$ (l'unité est le Joule) h est la constante de Planck $h = 6,626 17 \times 10^{-34}$ js (constante de Planck).

Le spectre solaire est la distribution spectrale (en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence) du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, depuis les rayonnements

radio jusqu'aux rayons X. Le rayonnement solaire global est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée.

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire.

Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice.

La longueur d'onde électromagnétique définit le rayonnement et découle directement de la théorie ondulatoire de la lumière. Elle est égale au rapport de la vitesse de la lumière (300.000 km/s dans le vide) à la fréquence déterminant le rayonnement envisagé ; elle s'exprime généralement en microns.

L'arc-en-ciel est le produit de la réfraction de la lumière du Soleil par un écran de gouttelettes d'eau. Chaque goutte d'eau agit comme un prisme qui décompose la lumière. Un rayon solaire, couvrant tout le spectre visible, tombe sur une goutte ; ce rayon subit deux réfractions et une réflexion avant de ressortir, dans une direction qui dépend de la longueur d'onde. Ainsi, les rayons rouges seront plus déviés que les rayons bleus. L'angle entre rayon incident et rayon émergent est de 43° pour les rayons "rouges" et de 41° pour les rayons bleus. En tournant le dos au Soleil, l'observateur verra un arc rouge issu de toutes les gouttes telles que la direction goutte-œil forme un angle de 43° avec la direction des rayons solaires. On observe alors de l'extérieur à l'intérieur de l'arc-en-ciel un dégradé allant du rouge au bleu.

2.1.1 Couleurs et longueurs d'onde

La perception des couleurs est subjective à l'œil d'une ou plusieurs fréquences d'onde lumineuses avec une ou plusieurs amplitudes donnés. Il existe trois couleurs primaires et trois couleurs complémentaires. Le tableau ci-dessous montre la variation de ces deux types de couleurs.

ADDITION	SOUSTRACTION
Couleurs primaires	Couleurs complémentaires
Rouge, vert et bleu	Cyan, magenta et jaune

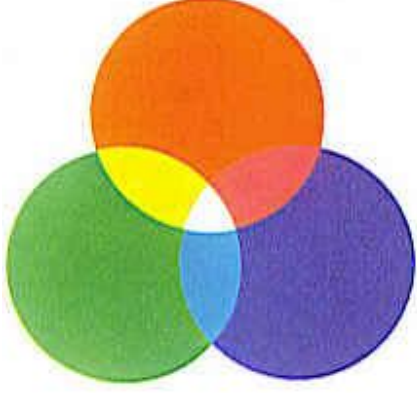
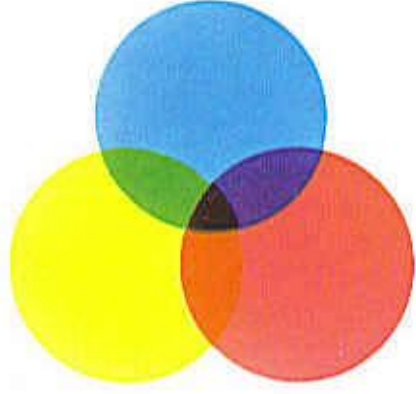
	
<p>Toutes les autres couleurs sont issues de l'ajout de ces trois couleurs (rouge, vert et bleu). Le blanc est la somme des trois couleurs.</p>	<p>La soustraction des trois couleurs (cyan, magenta et jaune) donne le noir.</p>

Tableau 1 Variation des couleurs primaires

La plupart des sources de lumière sont chaudes ; elles émettent de la lumière par incandescence. La lumière émise est composée d'une plage étendue de longueurs d'onde. La répartition énergétique des ondes émises selon leur longueur d'onde ne dépend que de la température de la source.

2.2 Spectre des ondes électromagnétiques

Les rayonnements électromagnétiques sont caractérisés par un champ électrique et un champ magnétique. Les rayonnements électromagnétiques comprennent, dans l'ordre croissant des longueurs d'onde, les rayons gamma, les rayons X, l'ultraviolet, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radio. Plus la longueur d'onde du rayonnement est élevée, plus sa fréquence est basse.

Le rayonnement électromagnétique a un spectre très large, allant de très courtes longueurs d'onde (<10-14 m) pour le rayonnement cosmique à des fréquences radio, où les vagues peuvent être des kilomètres de long. Dans le milieu du spectre se trouve la lumière visible ayant une frontière d'environ 380 nm au rayonnement UV et environ 780 nm au rayonnement infrarouge. Elle comprend certains rayons ultraviolets (UV) et le rayonnement infrarouge (IR).

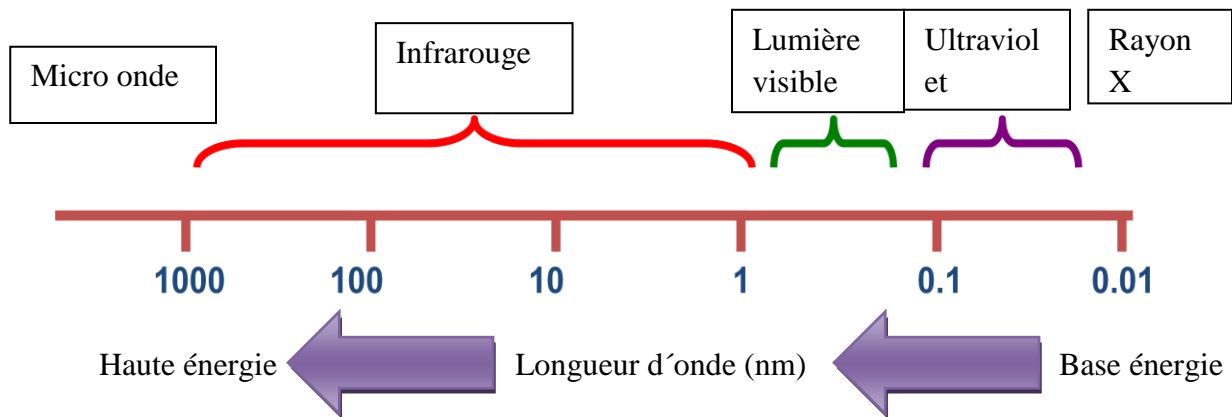


Fig.1 Le spectre des ondes électromagnétiques

2.2.1 Propriétés du rayonnement électromagnétique

A la différence des autres types d'onde, les rayonnements électromagnétiques peuvent se propager dans le vide (sinon nous ne pourrions recevoir la lumière du Soleil). Leur vitesse est alors celle de la lumière, notée c et proche de 3.10^8 m/s. Dans un milieu matériel, les ondes électromagnétiques se propagent à une vitesse c/n , où n est l'indice du milieu.

Les différentes ondes du spectre électromagnétique sont soumises aux phénomènes spécifiques de la propagation des ondes, comme la diffraction et l'interférence. En déterminant la longueur d'onde d'un rayonnement électromagnétique, on peut en déduire plusieurs de ses caractéristiques : effet thermique, visibilité, pénétration, etc.

2.2.2 Historiques

Depuis le début du XIX^e siècle, les physiciens savaient que la lumière était de nature ondulatoire, grâce notamment aux travaux de Fresnel. Cependant, considérant qu'une onde lumineuse avait besoin d'un milieu matériel pour se propager, ils supposèrent l'existence d'un milieu non observable, l'éther. En 1873, le physicien britannique James Clark Maxwell jeta les bases de l'électromagnétisme en publiant un ouvrage dans lequel il donnait les lois générales du champ électromagnétique. Cette analyse mathématique de la théorie des champs rendait de ce fait l'hypothèse de l'éther inutile. Grâce à ses travaux, Maxwell put alors identifier la lumière comme étant un phénomène électromagnétique.

Au début du XX^e siècle, les physiciens prirent conscience que la théorie ondulatoire ne permettait pas d'expliquer toutes les propriétés des rayonnements électromagnétiques. En 1900, le physicien allemand Max Planck émit l'hypothèse qui se révéla exacte, que l'émission et l'absorption des radiations se produisent par quantités finies d'énergie, appelées quanta d'énergie. En 1905, Albert Einstein expliqua l'effet photoélectrique en supposant l'existence du photon, particule qui véhicule le rayonnement électromagnétique. Cette théorie corpusculaire remet en question la nature ondulatoire de la lumière.

Ce différend entre théorie ondulatoire et théorie corpusculaire fut levé grâce au concept de dualité onde-particule élaboré par Louis de Broglie en 1924. Ce principe fondamental de la théorie quantique stipule que toute particule se comporte comme une onde et réciproquement.

2.2.3 Les régions du spectre électromagnétique.

Le tableau suivant donne les valeurs approximatives des longueurs d'onde, des fréquences et de leurs énergies en fonction des régions du spectre électromagnétique.

Régions	Longueurs d'onde (Angströms)	Longueurs d'onde (cm)	Fréquences (Hz)	Energie (eV)
Radio	$>10^9$	>10	$<3,10^9$	$>10^{-5}$
Micro- onde	10^9-10^6	10-0,01	$3.10^9- 3.10^{12}$	$10^{-5}0,01$
Infra- rouge	$10^6- 7000$	$0,01-7.10^{-5}$	$3,10^{12}- 4, 3.10^{14}$	0,01-2
Visible	7000- 4000	$7.10^{-5}- 4.10^{-5}$	$4,3.10^{14}-7,5.10^{14}$	2-3
Ultraviolet	4000-10	$4.10^{-5}- 10^{-7}$	$7.5.10^{14}- 3.10^{17}$	$3-10^3$
Rayon- X	10-0,1	$10^{-7}- 10^{-9}$	$3.10^{17}- 3.10^{19}$	10^3-10^5
Rayon Gamma	$<0,1$	$<10^{-9}$	$>3.10^{19}$	$>10^5$

Tableau 2. Tableau récapitulatif des régions du spectre électromagnétique

2.2.3.1 La lumière visible

Appelée aussi spectre visible ou spectre optique est la partie du spectre électromagnétique qui est visible pour l'œil humain. Lorsque le rayonnement de la longueur d'onde augmente, la couleur varie du violet au rouge. La figure ci-dessous présente une variation de la couleur dans le domaine du spectre du visible en fonction de la longueur d'onde et la fréquence.



Fig.2 Ondes lumineuses visible

2.2.3.2 Les ondes ultraviolettes

L'onde ultraviolette ou UV, est la région du rayonnement électromagnétique situé juste après la couleur violet de la lumière visible. Ils sont des rayonnements invisibles et imperceptibles par nos sens. Pourtant ils sont omniprésents et nous y sommes quotidiennement exposés. Émis en plus grande partie par le soleil (5 % de son énergie), les UV peuvent être aussi émis par des lampes. L'UV est classé en trois groupes : UV-A (400-315nm), UV-B (315-280 nm) et UV (280-100 nm).

- Les UV-A sont les plus faibles des UV au niveau de l'énergie, mais ils pénètrent plus profondément dans la peau, jusqu'au derme superficiel. Ce sont les UV qui se rapprochent le moins des ionisants. Ils se trouvent à la limite de la lumière visible, à une longueur d'onde de 400 à 315 nm.
- Les UV-B eux, ne sont que partiellement filtrés par l'atmosphère et, arrivant à la surface du corps, ils sont arrêtés par la couche cornée et ne traversent que l'épiderme ; ils n'atteignent pas le derme et ont une longueur d'onde allant de 315 à 280 nm.
- Les UV-C, situés juste après les rayons X ont une longueur d'ondes de 280 à 100 nm, ils sont les plus nocifs, les plus énergétiques (longueur d'onde plus faible), mais sont arrêtés presque en totalité par la couche d'ozone qui les absorbe. D'où l'importance de celle-ci.

2.2.3.3 Les rayons X

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique à haute fréquence dont la longueur d'onde est comprise entre 5 pm et 10nm Les rayons X sont un rayonnement de type électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 10 nm et 0,001 nm

(1 nm, ou nanomètre vaut 10^{-6} m. Plus la longueur d'onde du rayon X est courte, plus son énergie n'est élevée. Les rayons de longueur d'onde proches de la plage des ultraviolets dans le spectre électromagnétique, sont connus sous le nom de rayons X mous. Les rayons de longueur d'onde plus courte, proches de la plage des rayons gamma, voire débordants sur cette plage, sont appelés rayons X durs (Radioactivité). Les rayons X composés d'un mélange de nombreuses longueurs d'onde sont connus sous le nom de rayons X « blancs », par opposition aux rayons X « monochromatiques », qui présentent une seule longueur d'onde. Les rayons lumineux aussi bien que les rayons X sont produits par des changements d'orbite d'électrons provenant des couches électroniques internes des atomes. Le rayonnement lumineux est produit par les transitions d'électrons provenant des couches les plus externes. Les rayons gamma, semblables de par leurs effets aux rayons X, sont produits par des transitions d'énergie à l'intérieur des noyaux excités. Le rayonnement X est particulièrement utilisé dans les domaines de la recherche scientifique, de l'industrie et de la médecine.

2.2.3.4 Infrarouge (IR)

C'est un rayonnement électromagnétique de grandes longueurs d'onde que la lumière. Elle est également classée en trois groupes : IR-A (780-1400nm), IR-B (1400-3000 nm) et IR-C (3 000-1 000000 nm). L'infrarouge est associé à la chaleur car, à température ambiante ordinaire, les objets émettent spontanément des radiations dans le domaine infrarouge. Cette association entre l'infrarouge et la chaleur n'est cependant due qu'à la gamme de température observée à la surface de la Terre. Il est parfaitement possible de générer un rayonnement infrarouge qui ne soit pas thermique, c'est-à-dire dont le spectre ne soit pas celui du corps noir ; par exemple, les diodes électroluminescentes utilisées dans les télécommandes n'émettent pas de chaleur.

2.2.3.5 Les rayons gamma

Les rayons gamma symbolisés par la lettre grecque γ , correspondent à une gamme d'énergies du rayonnement électromagnétique. Il s'agit de photons de haute énergie (en général au-delà de 100 000 eV). Il possède une longueur d'onde très courte, inférieure à 5 pm, et peut être produits par la désintégration γ ou d'autres processus nucléaires ou subatomiques tels que l'annihilation d'un pair électron positron. Les radiations gamma sont issues d'un réarrangement des neutrons et des protons à l'intérieur d'un noyau atomique, qui émet alors un photon de longueur d'onde de 10^{-10} à 10^{-12} m. L'émission de ce photon, qui correspond au rayonnement gamma, ne se produit jamais seule : elle peut être associée par exemple à l'émission de rayons alpha ou bêta. En effet, lorsqu'un noyau atomique est produit à la suite d'une désintégration alpha ou bêta, ou d'une fission ou fusion nucléaire, il se trouve dans un état excité (état d'énergie élevé). Pour retourner dans son niveau d'énergie fondamental, il émet un photon gamma. Ainsi, les rayons gamma sont présents en grande quantité dans les rayons cosmiques qui traversent l'espace et bombardent la Terre en permanence : ils proviennent des réactions nucléaires ayant lieu dans le cœur des étoiles (dont le Soleil). Fort heureusement ils n'atteignent pas la surface de la Terre ; ils

sont déviés dans la haute atmosphère par la magnétosphère, gigantesque enveloppe protectrice soumise au champ magnétique terrestre. Le spectre des rayons gamma étant proches de celui des rayons X, on distingue ces deux rayonnements par leur origine : les rayons gamma sont émis naturellement par les atomes radioactifs lors de transitions nucléaires, alors que les rayons X apparaissent par suite d'un changement d'orbite des électrons d'un atome (transition électronique).

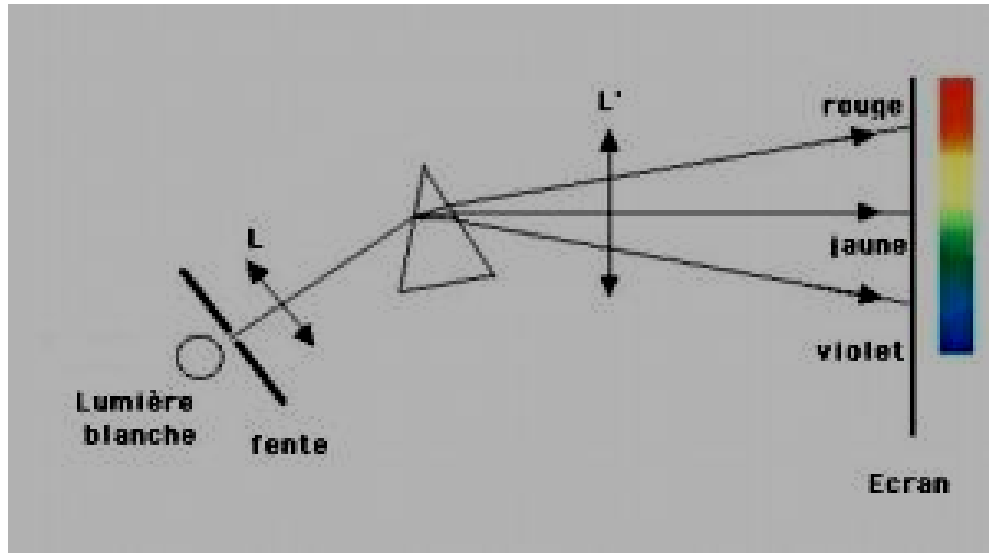
2.3 Spectroscopie

La spectroscopie est l'étude des spectres lumineux et, plus généralement, des spectres des rayonnements électromagnétiques émis, absorbés ou diffusés par des sources lumineuses ou des milieux matériels. Pour cela, les scientifiques disposent de plusieurs types d'appareils de mesure. Le spectroscopie est un appareil qui permet de produire et d'observer un spectre à partir d'une source lumineuse que l'on veut analyser (une étoile ou une flamme, par exemple). Le spectrographe fournit un enregistrement photographique des spectres. Le spectromètre donne une mesure des spectres. Enfin, le spectrophotomètre permet la comparaison quantitative de deux spectres. L'analyse de la lumière émise ou absorbée par les atomes d'un gaz nous renseigne sur la composition, la température et la densité de ce gaz. Cette analyse de la lumière en ses différentes longueurs d'ondes constitue ce qu'on appelle la spectroscopie.

Newton fut le premier à montrer que la lumière blanche est en fait un mélange de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Il éclaira avec de la lumière solaire une fente percée dans un écran opaque et fit traverser à cette lumière un prisme en verre et une lentille convergente. Il obtint des images colorées de la fente sur un écran. L'ensemble de ces images constitue un spectre pur de la lumière blanche. Le prisme dévie la lumière, mais il dévie davantage la lumière bleue que la lumière rouge. Les couleurs apparaissent dans l'ordre suivant : violet, bleu, vert, jaune, orange et rouge (voir figure 2.1). Newton en tira la conclusion que toutes ces couleurs sont présentes dans la lumière blanche et que le prisme a pour effet de les séparer.

Il existe différents techniques de spectroscopie, dont voici quelques domaines d'activité :

- Le domaine de spectroscopies de l'infrarouge. Elle recouvre une large gamme de techniques, la plus commune étant un type de spectroscopie d'absorption.
- Le domaine de spectroscopies
- Les domaines visible et ultraviolet
- Le domaine des rayons X
- Le domaine des rayons gamma



Crédit : Observatoire de Paris

Fig.3 Décomposition de la lumière blanche par un prisme.

2.3.1- Spectre et température

Commençons avec le paramètre le plus important, la température. Imaginons par exemple le cas d'un métal qui s'échauffe. Au début, lorsque le métal est à quelques centaines de degrés, rien n'est visible à l'œil nu. Néanmoins, il est possible de sentir la chaleur du métal en plaçant la main à proximité. Cette sensation traduit le fait que le métal rayonne une lumière infrarouge qui échauffe la main mais n'est pas visible. Lorsque la température continue à augmenter, le métal se met petit à petit à briller et à devenir incandescent. Sa couleur change également peu à peu, passant du rouge à l'orange puis au jaune. La lumière qui provient d'un corps dépend donc de sa température. A quelques centaines de degrés, le métal émet dans l'infrarouge, à 3000 degrés, il rayonne surtout dans le rouge et à 6000 degrés dans le jaune.

2.3.2 Spectres continu

- Spectre continu d'origine thermique

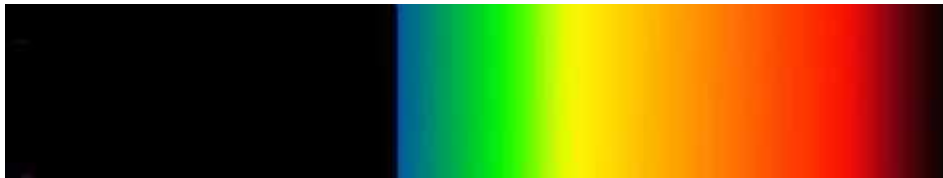
Lorsque l'on décompose la lumière blanche du Soleil à l'aide d'un prisme on observe un éventail de 23 couleurs. On dit que la lumière blanche possède un spectre continu, car on passe d'une couleur à une autre sans interruption dans la succession des couleurs. Expérimentalement on constate que tout corps (gazeux ou solide) sous haute pression et à haute température, donne naissance à un spectre continu de lumière.

Quand on chauffe un corps solide, il émet un rayonnement lumineux dont le spectre est continu. On a, par exemple le spectre donné par une lampe :



Ce spectre apparaît car le courant électrique qui passe dans la lampe fait chauffer le filament à très haute température (plus de 2000°C).

Si on diminue l'intensité du courant de façon à baisser la température, on obtient alors un spectre comme celui-ci :



Et si on baisse encore l'intensité du courant, on arrive à un spectre ressemblant à celui-ci :

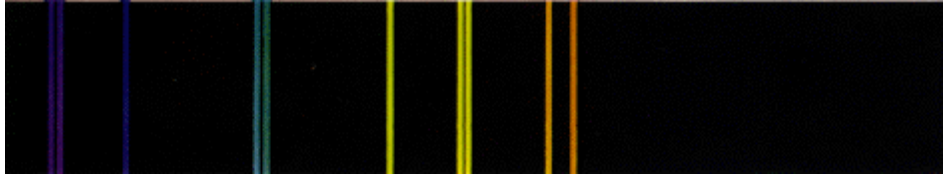


Plus la température augmente, plus le spectre s'enrichit dans le violet. Ainsi les spectres continus sont d'origine thermique.

2.3.3 Spectre de raies d'émission

Si on analyse la lumière émise par une lampe à vapeur de sodium (gaz peu dense et chaud) à l'aide d'un prisme, on constate que le spectre de la lumière émise est constitué de deux raies fines très intenses dans la partie jaune du spectre, se détachant sur fond noir. Le spectre obtenu est discontinu et il est constitué d'un nombre limité de radiations.

Un gaz, à basse pression et à température élevée, émet une lumière constituée d'un nombre restreint de radiations : on obtient un spectre de raies d'émission. Les couleurs et les positions des raies dans le spectre sont caractéristiques des atomes du gaz qui émettent ces radiations, autrement dit chaque élément chimique à l'état gazeux possède son propre spectre de raies. Un gaz chauffé émet un spectre discontinu (aussi appelé spectre de raies) dont voici un exemple.



Si on observe le spectre d'un autre gaz, par exemple le mercure ci-dessous, on constate que les raies ne sont pas aux mêmes places :

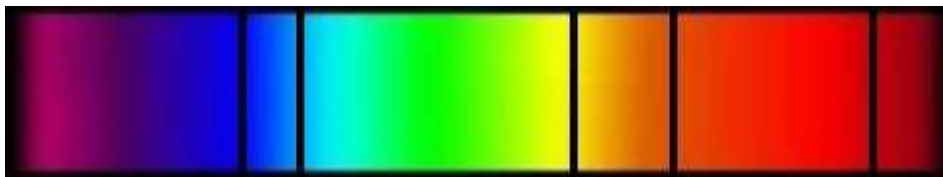


Un spectre est caractéristique de l'entité chimique qui le produit. Ainsi, en observant un spectre et en le comparant à des spectres connus on peut déterminer les espèces chimiques qui ont engendrées ce spectre.

2.3.4 Spectres d'absorption

Les atomes peuvent non seulement émettre de la lumière mais également en absorber. On peut constater ceci en faisant passer de la lumière blanche à travers un gaz froid avant de la disperser par un prisme. Lorsqu'un gaz à basse pression et à basse température est traversé par de la lumière blanche, le spectre de la lumière transmise est constitué de raies noires se détachant sur le fond coloré du spectre de la lumière blanche : c'est un spectre de raies d'absorption. La propriété importante de ce spectre de raies d'absorption est que ses raies se produisent au même endroit que les raies d'émission : le gaz absorbe les radiations qu'il serait capable d'émettre s'il était chaud.

Pour obtenir un spectre d'absorption, on interpose entre la source de lumière blanche, de la matière solide (filtre coloré) et un liquide (permanganate de potassium ou sulfate de cuivre) ou un gaz (vapeur de mercure ou vapeur de sodium). On éclaire cette cuve de gaz par de la lumière blanche et on observe le spectre obtenu à la sortie. Le spectre d'absorption du mercure est présenté ci-dessous.



On constate que le spectre ressemble à un spectre continu à l'exception de quelques raies noires. En observant les deux spectres du mercure, on constate que les raies de couleurs du spectre d'émission et les raies noires du spectre d'absorption sont à la même place. Les spectres d'émission et d'absorption d'une même entité chimique sont complémentaires. Si on les superpose, on retrouve le spectre d'émission continu. Une entité chimique ne peut donc absorber que ce qu'elle est capable d'émettre.

2.3.5 Analyse spectroscopique

Lorsque le gaz est formé de plusieurs éléments chimiques différents, le spectre est plus compliqué, puisqu'il présente les raies caractéristiques de chacun des éléments. On peut cependant identifier chacun de ces éléments, si on connaît bien les spectres des différents éléments chimiques qui existent dans la nature, en reconnaissant les configurations de raies caractéristiques de chaque élément. Lorsque chaque raie a pu être identifiée, on a déterminé la composition chimique du gaz. Ce procédé d'analyse spectrale est fondamental pour l'astrophysique, puisqu'il permet de déterminer la composition chimique d'astres qui sont, par ailleurs, inaccessibles à l'expérimentation directe.

2.4. Monochromateur ou spectroscopie

Un monochromateur est un dispositif utilisé en optique pour sélectionner une gamme la plus étroite possible de longueurs d'onde à partir d'un faisceau lumineux de gamme de longueurs d'onde plus large. Le nom monochromateur est issu du grec mono (seul) et chroma (couleur). Bien que le principe soit radicalement différent, la fonction est similaire à celle des filtres utilisés pour sélectionner une fréquence d'un signal électromagnétique dans un récepteur radio. Nous développerons cela dans la deuxième partie de notre étude consacrée aux travaux pratiques.

2.4.1 Spectroscopie à fente

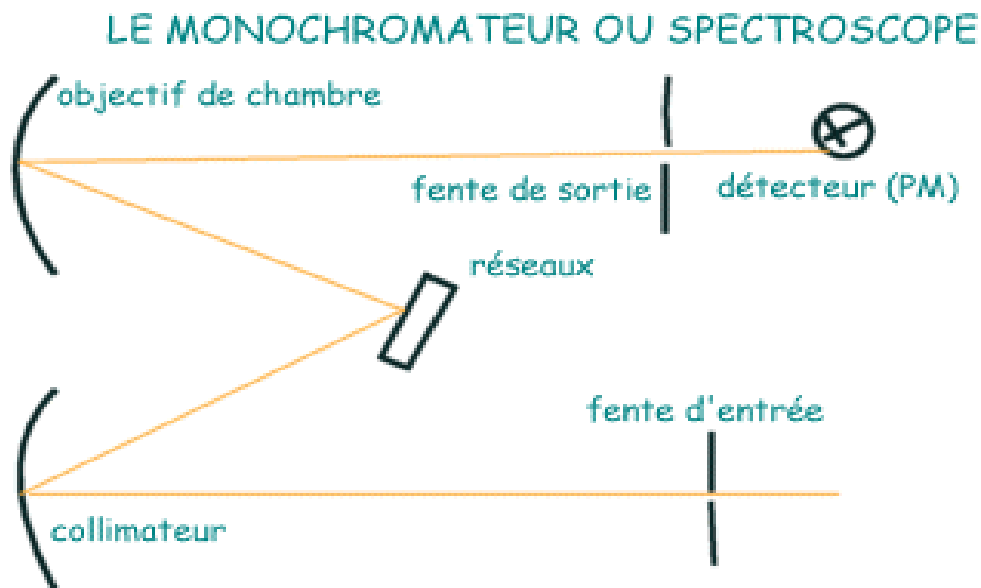


Fig.4 Spectroscopie à fente

Pour l'analyse des spectres, on fait défiler les différentes longueurs d'onde en tournant les réseaux. Dans ce cas d'appareil à fentes, si les distances focales sont égales le signal est triangulaire (le pic est triangulaire).

2.4.2 Spectromètre sous vide

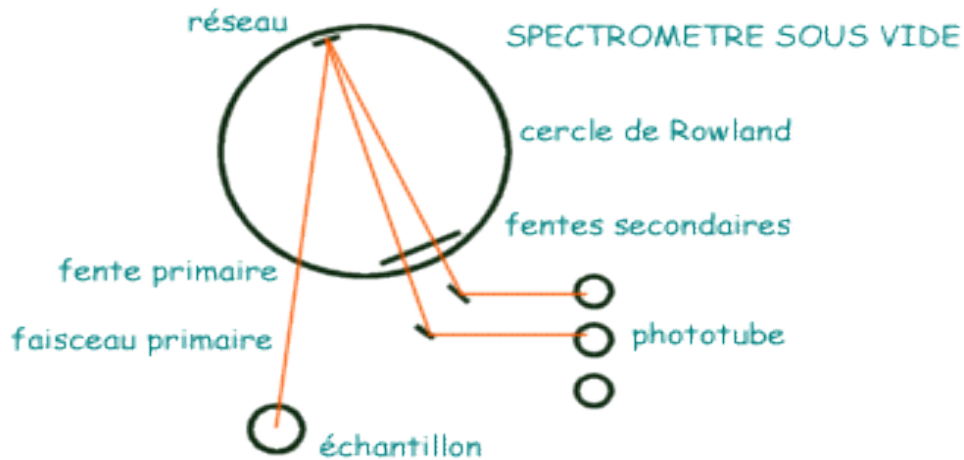


Fig.5 Spectromètre sous vide

Cet appareil est destiné à travailler dans l'UV à des longueurs d'onde inférieures à 200 nm. De ce fait, il est nécessaire de travailler sous vide. Pour améliorer les performances, on limite les réflexions sachant que le pouvoir réflecteur dans l'UV des différents matériaux est médiocre. Pour cela, on grave le réseau directement sur le miroir concave. On a donc un réseau concave qui a les 3 fonctions suivantes : collimateur, disperseur, objectif de chambre (nombre de traits : 1800 / 2400 traits/mm).

Les images de la fente d'entrée sont situées sur le cercle de Rowland. On sélectionne les longueurs d'onde (ou radiations) par des fentes secondaires. Les flux lumineux sont ensuite envoyés sur des batteries de photodiodes (photo tubes) par l'intermédiaire de petits miroirs.

La source est placée sous vide ou sous courant d'argon. Deux techniques sont utilisées :

- le spectre d'arc : tension 100V, courant continu 10 / 20 A.
- le spectre d'étincelle : haute tension (plusieurs milliers de V), haute fréquence mais faible ampérage.

2.4.3 Spectrophotomètre UV- Visible ou IR

Pour les spectres UV-Visible, les sources sont le deutérium et le tungstène. Dans l'IR, on utilise un élément de céramique chauffé. Nous avons 3 parties essentielles dans cet instrument.

- a) Pré-monochromateur associé à un prisme de petite dimension. Sa fonction essentielle est de ne laisser passer qu'une bande passante plus ou moins large.
- b) Monochromateur classique qui ne laissera sortir qu'une radiation monochromatique.
- c) Système à double faisceau qui permet de déterminer directement l'absorbance du soluté et de tenir compte des variations de la source et du milieu ambiant.

2.4.4 Absorption atomique

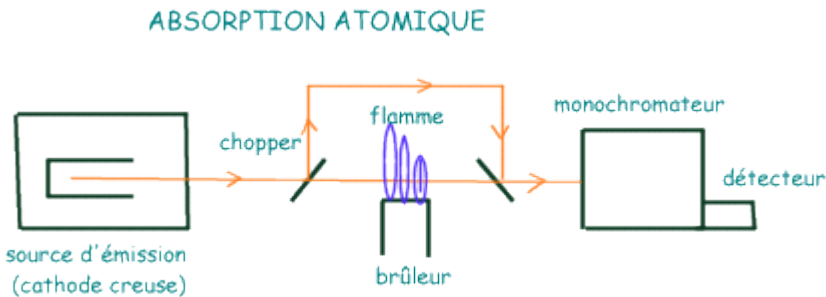


Fig.6 Absorption atomique

On injecte une solution dans le brûleur (ou le four) : les constituants sont vaporisés. Les atomes gazeux absorbent le rayonnement sélectivement (suivant la nature des atomes). Le double faisceaux compense les variations de la source.

2.5 Corps noir

En physique, un corps noir désigne un objet idéal dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température. Le nom corps noir a été introduit par le physicien Gustav Kirchhoff en 1860. Le modèle du corps noir permit à Max Planck de découvrir la quantification des interactions électromagnétiques, qui fut un des fondements de la physique quantique. Par définition un corps noir est un objet qui absorbe intégralement les radiations reçues. Une cavité fermée percée d'une très petite ouverture constitue une réalisation pratique d'un corps noir. Les radiations qui entrent dans la cavité se réfléchissent sur les parois et s'absorbent plus ou moins à chaque réflexion. L'énergie qui peut ressortir est négligeable. Un corps noir en équilibre thermique émet d'énergie autant qu'il en reçoit. Un four fermé et isolé thermiquement constitue un corps noir en équilibre. L'objet réel qui se rapproche le plus de ce modèle est l'intérieur d'un four. Afin de pouvoir étudier le rayonnement dans cette cavité, une de ses faces est percée d'un petit trou laissant s'échapper une minuscule fraction du rayonnement interne. C'est d'ailleurs un four qui fut utilisé par Wien pour déterminer les lois d'émission électromagnétique en fonction de la température.

Un corps macroscopique est qualifié de corps noir lorsqu'il est à l'équilibre thermodynamique. Il est donc indispensable qu'il reçoive autant d'énergie qu'il n'en émette. D'autre part, un corps noir absorbe l'intégralité du rayonnement incident qu'il reçoit d'où son qualificatif de noir par référence aux corps de couleur noire qui absorbent intégralement le rayonnement visible.

Corps noir \rightleftharpoons Equilibre thermodynamique $\rightleftharpoons \varphi_{\text{incident}} = \varphi_{\text{absorbée}} = \varphi_{\text{émis}}$

2.5.1 Rayonnement thermique d'un corps noir

Il convient de rappeler la distinction entre un corps de couleur noire et un corps noir. En effet, un corps de couleur noire n'est pas un corps noir au sens de l'énergie. Un corps de couleur noire a un facteur d'absorption proche de un à température ambiante et dans le domaine visible du spectre électromagnétique. Ceci n'est pas forcément vrai pour d'autres longueurs d'ondes. Imaginons par exemple un sous-marin de couleur noire ; nous pouvons détecter sa présence à l'aide d'un radar, ce qui prouve bien qu'il n'absorbe pas le rayonnement radio. Ainsi, pour un récepteur thermique, dépend en général de la température et du domaine spectral considéré. Un corps noir, ou récepteur intégral, est par définition un récepteur thermique dont le facteur d'absorption est égal à l'unité quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement incident.

C'est donc un corps qui absorbe intégralement tout rayonnement incident, quelle que soit sa longueur d'onde : il n'y a ni réflexion, ni diffusion, ni transmission. Comme discuté plus haut, le corps noir est donc aussi l'émetteur idéal : il émet plus d'énergie que tout autre corps à n'importe quelle longueur d'onde.

2.5.2 Caractéristique d'un corps noir

Cette section se focalise sur le rayonnement thermique. On présente tout d'abord le comportement des surfaces par rapport au rayonnement. On définit ensuite le rayonnement d'équilibre, puis on énonce la loi du corps noir. Enfin on s'intéresse au comportement des surfaces réelles. Nous allons étudier les différents comportements de la matière vis à vis du rayonnement thermique. Nous rappelons que le rayonnement thermique est un rayonnement électromagnétique. On retrouve donc le vocabulaire des ondes qui sont émission, absorption, réflexion, diffusion, transparence et opacité.

a) Émission et Absorption

Un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne (énergie microscopique) en rayonnement thermique. Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission.

L'absorption s'agit de l'opération inverse. Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé. L'absorption, qui modifie l'énergie interne de l'objet en question. Cette énergie absorbée est transformée en température qui produit une émission de REM (absorption = émission). L'absorptance α est définie comme le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie reçue.

b) Réflexion et diffusion

Au lieu d'être absorbé, le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi. Dans ces conditions on distingue 2 cas :

- Le renvoi obéit aux lois de l'optique géométrique (un angle d'incidence, un angle de réflexion). Il s'agit alors de réflexion.
- Le renvoi se fait dans toutes les directions (même si l'on a une seule direction incidente). On parle alors de diffusion.

On note que l'onde diffusée ou émise a la même fréquence que l'onde incidente. La réflexion. Le rayonnement réfléchi ρ est le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie reçue. Lorsque l'énergie reçue provient du soleil et irradie des surfaces terrestres ou planétaires, le rayonnement réfléchi est appelée albédo.

c) Transparence et opacité

La transmission τ est le rapport entre l'énergie transmise et l'énergie reçue. Un milieu peut transmettre intégralement l'onde incidente, il est alors appelé milieu transparent. Le vide est un exemple de milieu transparent. En première approximation, le verre est aussi un milieu transparent pour des longueurs d'ondes dans le domaine du visible. Inversement, un corps ne transmettant aucune partie du rayonnement incident est dit corps opaque.

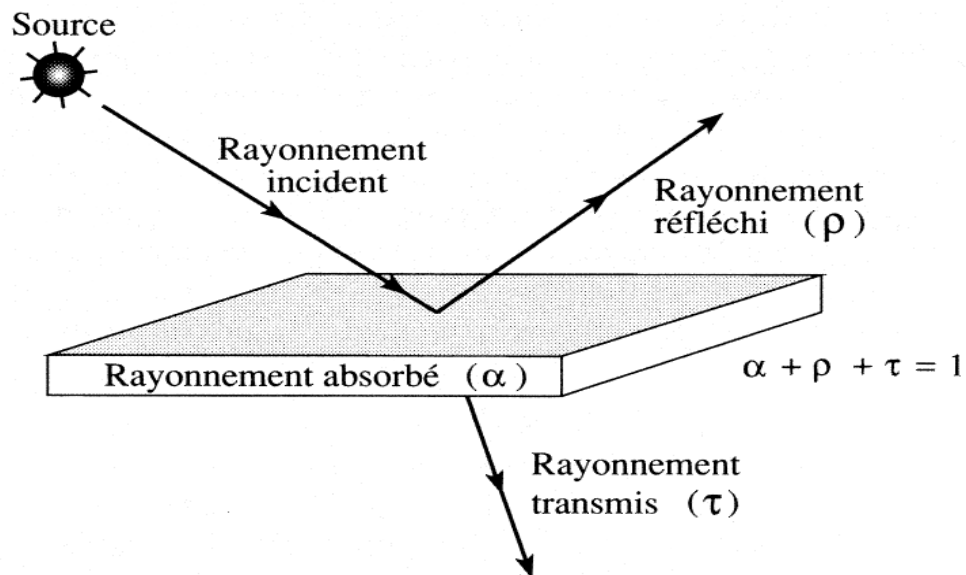


Fig.7 Différents types de rayonnement de la lumière sur une surface transparente

G est le flux de rayonnement incident sur la surface. G_{abs} , G_{ref} et G_{tr} sont respectivement les surfaces absorbée, réfléchie et transmise. La première loi de la thermodynamique exige que le rayonnement du soleil soit absorbé, réfléchi, et transmis par le rayonnement incident G .

L'absorptance $\alpha = G_{abs} / G$ avec $0 < \alpha < 1$ (1)

Le rayonnement réfléchi ρ = radiation réfléchi (G_{ref}) / rayon incident (G) avec $0 < \rho < 1$ (2)

La transmission τ = rayonnement transmis (G_{tr}) / rayon incident (G) avec $0 < \tau < 1$ (3)

$$G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} = G \quad (4)$$

En divisant chaque thème par G on obtient la relation suivante :

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (5)$$

Pour une surface opaque $\tau = 0$ alors la relation (3) devient

$$\rho + \alpha = 1 \quad (6)$$

Il s'agit d'une importante propriété dans le phénomène du rayonnement thermique. Car elle nous renseigne sur l'opacité d'une surface incidente.

2.5.3 Les lois de l'électromagnétisme

L'évaluation de température à distance repose sur l'utilisation du rayonnement propre émis par les corps. Le plus fréquemment, le corps émetteur est idéalisé et assimilé à un "corps noir" : le rayonnement émis ne dépend que de la température. Son spectre est donné par la loi de Planck, la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission par la loi de Wien et l'énergie totale rayonnée par la loi de Stefan Boltzmann. La terre se comporte sensiblement comme un corps noir à 15 °C en moyenne (soit un peu moins de 300 K), alors que la température de surface du soleil est d'environ 6000 K. Le rayonnement propre du soleil et celui de la Terre, modélisés par des corps noirs à 6000 K et 300 K respectivement, sont ainsi situés, selon la loi de Planck, dans des domaines spectraux différents, et il est aisé de séparer le rayonnement provenant de chacun.

Les courbes ci dessous donnent le spectre du rayonnement émis par la Terre (à 300 K environ) et celui du rayonnement solaire réfléchi (le soleil se comporte sensiblement comme un corps noir à 6000 K)

Le diagramme suivant nous donne un aperçu des lois issues du rayonnement thermique en référence avec l'électromagnétique.

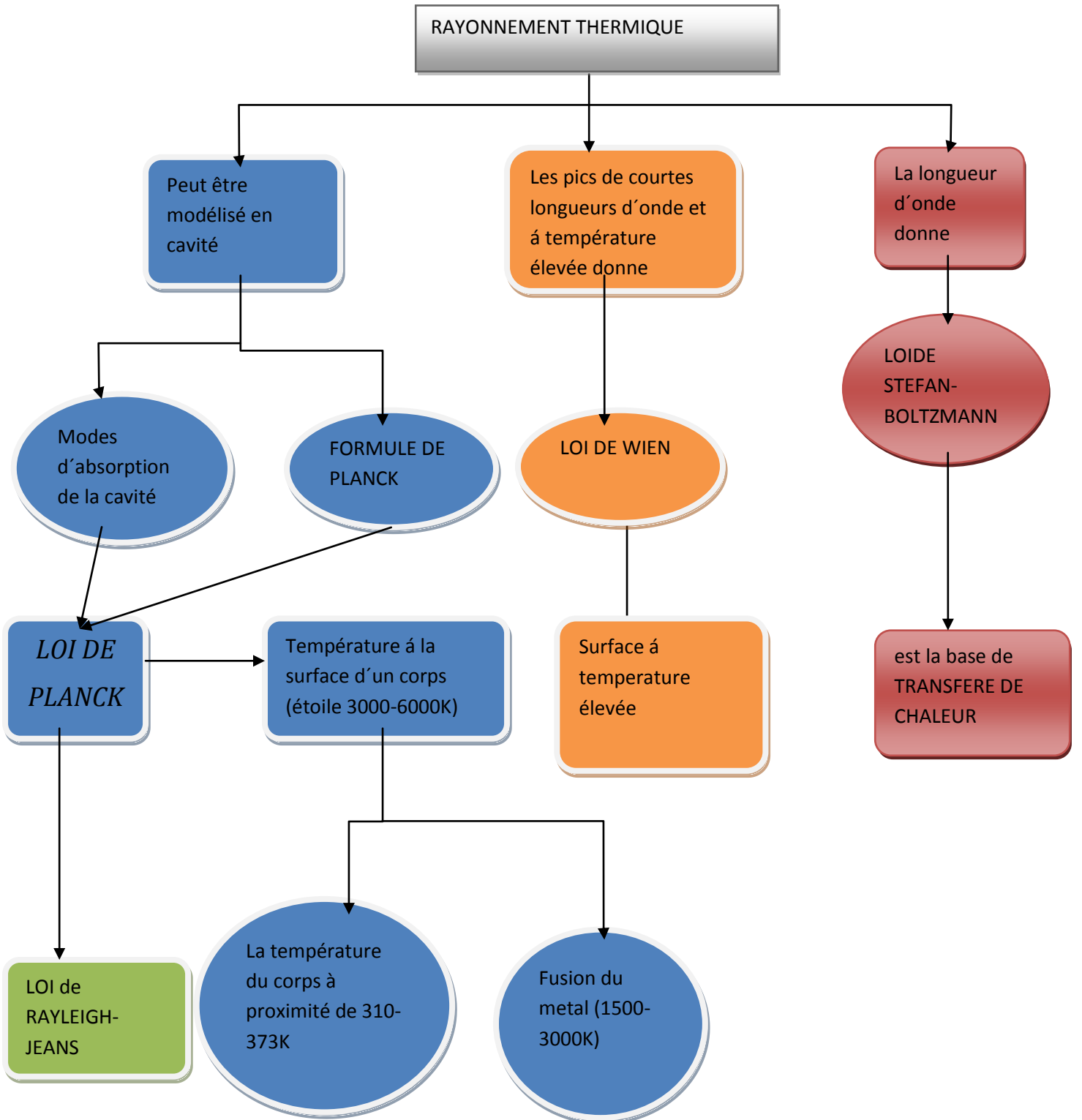


Fig.8 Diagramme du rayonnement thermique

2.5.3.1 Loi de Maxwell

La température mesure l'agitation des particules de matière. En effet, dans un corps chaud, les molécules atomes électrons se déplacent plus rapidement que dans un corps froid. Prenons l'exemple de l'électron. Sa masse étant faible, il se déplace facilement. De plus, il est chargé électriquement. Les lois de l'électromagnétisme de Maxwell montrent qu'un changement de mouvement d'une charge crée de la lumière.



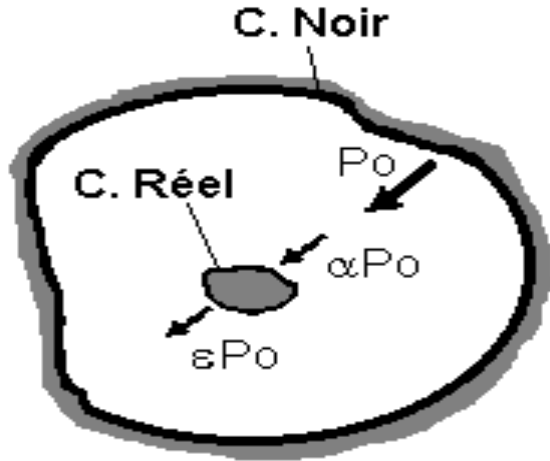
Fig.9 Le fer émet de la lumière visible à partir d'une certaine température.

Mais dans toute matière, les électrons sont en mouvement. Par conséquent, quel que soit la température, la matière émet de la lumière. Ce n'est qu'à partir d'une certaine température que cette lumière est visible. Par exemple, le corps humain émet de la lumière dans le domaine infrarouge.

2.5.3.2 Loi de Kirchhoff

Nous venons de voir trois types de spectres dans le chapitre précédent qui sont : les spectres continus, les spectres de raies d'émission et les spectres de raies d'absorption. Les lois qui décrivent les conditions de formation de ces différents spectres portent le nom du physicien allemand G. Kirchhoff qui les publia en 1859 en collaboration avec R. Bunsen. Elles s'expriment de la manière suivante :

- a) Un gaz à pression élevée, un liquide ou un solide, s'ils sont chauffés, émettent un rayonnement continu qui contient toutes les couleurs.
- b) Un gaz chaud, à basse pression, émet un rayonnement uniquement pour certaines couleurs bien spécifiques : le spectre de ce gaz présente des raies d'émission.
- c) Un gaz froid, à basse pression, éclairé par une source de rayonnement continu, absorbe certaines couleurs, produisant ainsi dans le spectre des raies d'absorption. Ce gaz absorbe les mêmes couleurs qu'il émettrait s'il était chaud.



$$P_{\text{émis}} = P_{\text{absorbé}} \quad \epsilon P_0 = \alpha \cdot P_0 \quad \epsilon = \alpha$$

Fig.10 Equilibre thermique et loi de Kirchhoff

2.5.3.3 Loi de PLANCK

La loi de Planck définit la distribution de luminance énergétique monochromatique du rayonnement thermique du corps noir en fonction de la température thermodynamique. La luminance énergétique monochromatique est un flux énergétique par unité de surface, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde. Elle décrit la répartition de l'énergie électromagnétique (ou la répartition de la densité de photons) rayonnée par un corps noir à une température donnée, en fonction de la longueur d'onde. La loi de Planck est présentée sous différentes variantes, qui emploient des grandeurs telles que l'intensité, la densité de flux ou bien la répartition spectrale. Toutes ces formes des différentes grandeurs de rayonnement sont des formes différentes de la loi de Planck.

La loi de Planck donne la répartition de la luminance (L) d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde λ et de la température T .

$$L_{\lambda} = \frac{2hc_{\lambda}^2}{\lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{hc_{\lambda}}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (7)$$

$c_{\lambda} = c / n_{\lambda}$ est la vitesse du rayonnement électromagnétique dans le milieu où se propage le rayonnement, avec :

- n_{λ} indice de réfraction du milieu pour la longueur d'onde λ .
- $c = 299\,792\,458$ m/s (vitesse de la lumière dans le vide).
- $h = 6,626\,17 \times 10^{-34}$ Js (constante de Planck).
- $k_b = 1,380\,66 \times 10^{-23}$ J/K (constante de Boltzmann).
- T est la température de la surface du corps noir en kelvin

La première courbe (C3) présente les spectres du rayonnement de Planck pour différentes températures entre 3500 K et 5000 K. On reconnaît la forme typique de courbe en cloche avec un maximum clairement visible, une pente forte pour les faibles longueurs d'onde et une pente descendant plus doucement vers les grandes longueurs d'onde. Le maximum de rayonnement se décale vers les faibles longueurs d'onde avec la température croissante, comme le décrit la loi de déplacement de Wien. En outre comme le décrit la loi de Stefan-Boltzmann, l'existence énergétique (correspondant à la surface sous la courbe de chaque existence énergétique spectrale) augmente avec la puissance quatrième de la température. Une telle augmentation fait qu'il est difficile de présenter un tel graphe sur une plage de températures importante. Pour pallier ce problème, le second graphe utilise une représentation logarithmique pour les deux axes. Sont présentés ici les spectres de rayonnement de Planck pour des températures de 100 K à 10 000 K.

a) Emission

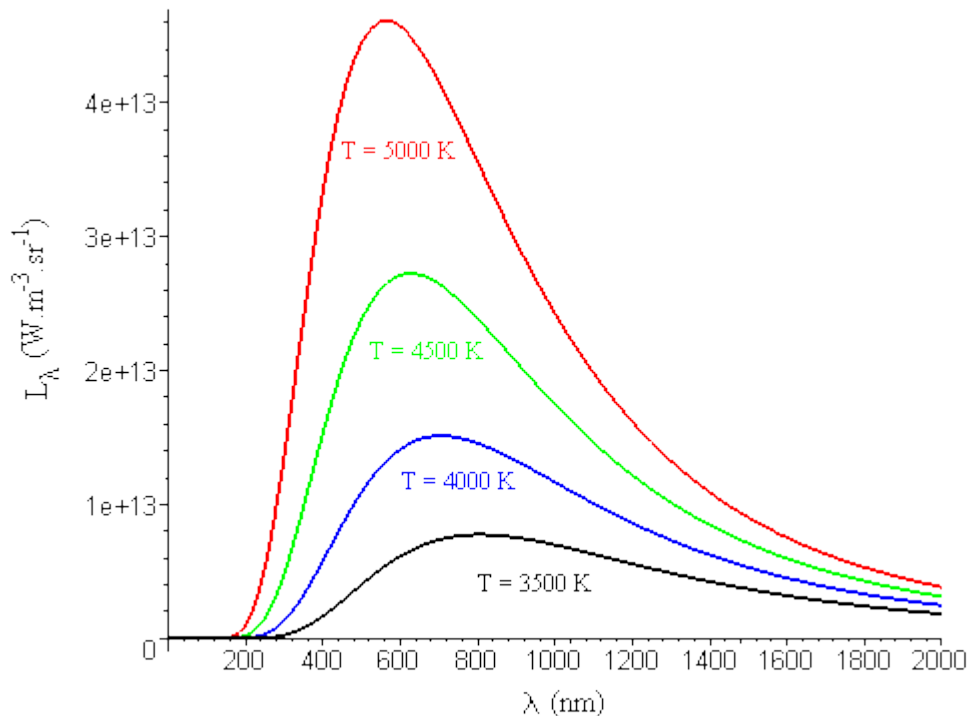


Fig.11 La loi de Planck à différentes températures en fonction de la longueur d'onde (C1)

La première image courbe (C1) présente les spectres du rayonnement de Planck pour différentes températures entre 3500 K et 5000 K. On reconnaît la forme typique de courbe en cloche avec un maximum clairement visible, une pente forte pour les faibles longueurs d'onde et une pente descendant plus doucement vers les grandes longueurs d'onde. Le maximum de rayonnement se décale vers les faibles longueurs d'onde avec la température croissante, comme le décrit la loi de déplacement de Wien. En outre comme le décrit la loi de Stefan-Boltzmann, l'existence énergétique (correspondant à la surface sous la courbe de

chaque existence énergétique spectrale) augmente avec la puissance quatrième de la température. Une telle augmentation fait qu'il est difficile de présenter un tel graphe sur une plage de températures importante. Pour pallier ce problème, le second graphe utilise une représentation logarithmique pour les deux axes. Sont présentés ici les spectres de rayonnement de Planck pour des températures de 100 K à 10 000 K.

La courbe rouge correspond à 300 K, ce qui correspond à la température ambiante. Le maximum pour cette courbe est atteint pour une longueur d'onde de 10 μm . C'est donc autour de cette longueur d'onde (infrarouges lointains) que se font les échanges d'énergie par rayonnement des objets à température ambiante. La courbe pour 3000 K correspond au rayonnement typique d'une lampe à incandescence. Une partie du rayonnement est émise dans le domaine visible. Toutefois le maximum d'émission se situe encore dans l'infrarouge proche. La courbe jaune correspond à 5777 K, la température effective du soleil. Le maximum d'émission est au milieu du domaine visible. Heureusement, la majorité du rayonnement thermique ultraviolet du soleil est absorbé par la couche d'ozone de l'atmosphère terrestre.

b) Réception

Comme on le voit sur le graphe précédent, l'existence énergétique spectrale du soleil pour toutes les longueurs d'ondes est bien plus importante que l'existence des objets terrestres à 300 K. Pour une longueur d'onde de 10 μm , un mètre carré de surface de soleil émet 400 fois plus qu'un mètre carré de façade de maison. Toutefois cela ne signifie pas que le rayonnement thermique environnant provient en majorité du soleil. Pour obtenir l'intensité de rayonnement rapportée à un mètre carré de surface réceptrice, il faut multiplier la luminance spectrale par l'angle solide Ω visible depuis cette surface. Pour un observateur terrestre, le soleil ne représente qu'une très petite source ($\Omega = 6,8 \cdot 10^{-5}$ sr). En comparaison avec un objet terrestre à 300 K remplissant le champ de vision de l'observateur à moitié ($\Omega = 3,14$ sr), l'intensité de rayonnement du soleil à $\lambda = 10 \mu\text{m}$ est plus faible d'un facteur 400 ($6,8 \cdot 10^{-5} / 3,14 \approx 1/100$), donc pratiquement négligeable. A ceci s'ajoute l'absorption d'une partie du rayonnement thermique du soleil par l'atmosphère, et une diminution supplémentaire due au fait que la surface réceptrice n'est pas ne reçoit pas le rayonnement orthogonalement.

2.5.3.4 Loi de déplacement de Wien

En 1893, Wien découvrit que la lumière émise par un corps noir se distribue autour d'une longueur d'onde privilégiée inversement proportionnelle à la température. Cette longueur d'onde est le pic d'émissivité.

La loi de Wien dérive de la loi de Planck qui donne la luminance monochromatique en fonction de la longueur d'onde λ et de la température T

$$L_\lambda = \frac{\left(\frac{c}{n}\right)^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{h \frac{c}{n}}{k_b T}\right) - 1} \quad (8)$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière, n l'indice de réfraction du milieu ($n = 1$ dans le vide) et k_b la constante de Boltzmann.

Pour une température donnée, cette luminance est maximale pour la longueur d'onde

$$\lambda_m = 0,2014 \frac{h \frac{c}{n}}{k_b T} \quad \Rightarrow \quad \lambda_m = 2,898 \times 10^{-3} / T \quad (9)$$

On obtient alors la loi de Wien

$$\sigma_w = \lambda_m T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K} \quad (10)$$

Où σ_w est appelé constante de Wien.

2.5.3.5 Loi de Stefan-Boltzmann

Comme on peut le voir sur les courbes précédentes, l'augmentation de la température influence le pic d'émissivité mais aussi l'intensité de la lumière (l'aire sous la courbe). En 1879, Stefan découvrit que la luminance énergétique (puissance émise par unité de surface) est proportionnel à la puissance 4 de la température.

La loi de Stefan - Boltzmann est la simple intégration de la loi de Planck sur la longueur d'onde

$$L = \int_0^\infty L_\lambda d\lambda \quad (11)$$

Où L est la luminance énergétique totale. On obtient alors

$$L = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad (12)$$

Où σ , appelée constante de Stefan - Boltzmann est définie par

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_b^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2} .K^{-4} \quad (13)$$

La loi stipule que l'émittance est proportionnelle à la luminance pour une source orthotrope (comme les corps noirs). On a donc

$$M = \pi L \quad (14)$$

Où M est l'émittance du corps noir. Finalement

$$M = \sigma T^4 \quad (15)$$

La luminosité globale du corps noir est alors le produit de l'émittance par la surface.

L'énergie rayonnée par un corps noir par seconde par unité de surface est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue, la loi est exprimée sous la forme :

$$\frac{P}{A} = e \sigma T^4 \quad (16)$$

Où e est l'émissivité de l'objet (e = 1 pour radiateur idéal). Si l'objet chaud est rayonnant de l'énergie à son environnement plus frais à la température T_c , le filet de rayonnement perte de vitesse prend la forme

$$P = \epsilon \sigma A (T^4 - T_c^4) \quad (17)$$

La relation Stefan-Boltzmann est également liée à la densité d'énergie dans le rayonnement dans un volume donné de l'espace.

$$\text{Pour un Corps Noir : } W_b = \alpha . T^4 \quad \text{et} \quad \text{Corps Réel : } W_r = \epsilon . \alpha . T^4 \quad (18)$$

Quelques exemples d'émissivité (ϵ) :

- Corps Noir : $\epsilon = 1$
- Aluminium brut : $\epsilon = 0.25$
- Aluminium poli : $\epsilon = 0.20$
- Chrome : $\epsilon = 0.08$
- Laiton Poli : $\epsilon = 0.03$
- Or-Argent : $\epsilon = 0.02$

P= Puissance du rayonnement ϵ = émissivité (=1 rayonnement idéal)

A=Air du rayonnement

T= Température du rayonnement

σ = Constance de Stefan

T_c = Température environnante

$$\sigma=5,6703 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^4$$

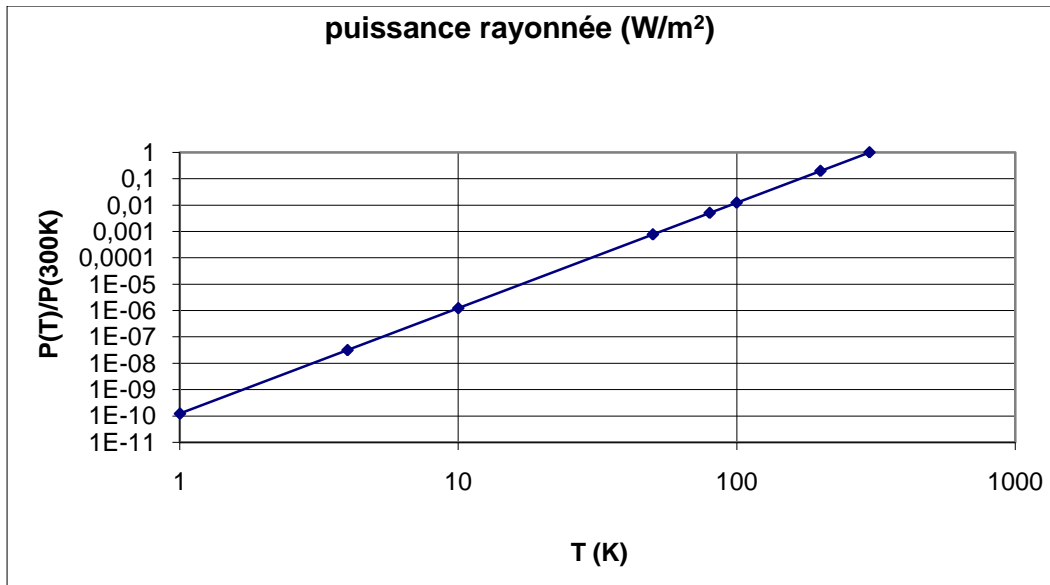


Fig.12. Puissance rayonnée. (Courbe issue du séminaire sur les rayonnements

thermiques de L.SIMON LHC-ECR)

(C2)

2.5.3.6 Application de la loi de Max Planck

A partir de la formule Planck, on peut tirer les autres lois d'électromagnétismes. Ainsi, la loi de Stefan-Boltzmann est issue de l'intégration de la formule de Planck. En dérivant cette même formule de Planck, on a la loi de déplacement de Wien en isolant la longueur maximale en utilisant les lois mathématiques sur la dérivation d'une fonction. Nous aurons aussi le temps de refroidissement du rayonnement thermique $t_{\text{refroidissement}}$.

Dans l'anagramme suivant, nous résumerons les différentes relations qui existent entre loi de l'électromagnétisme.

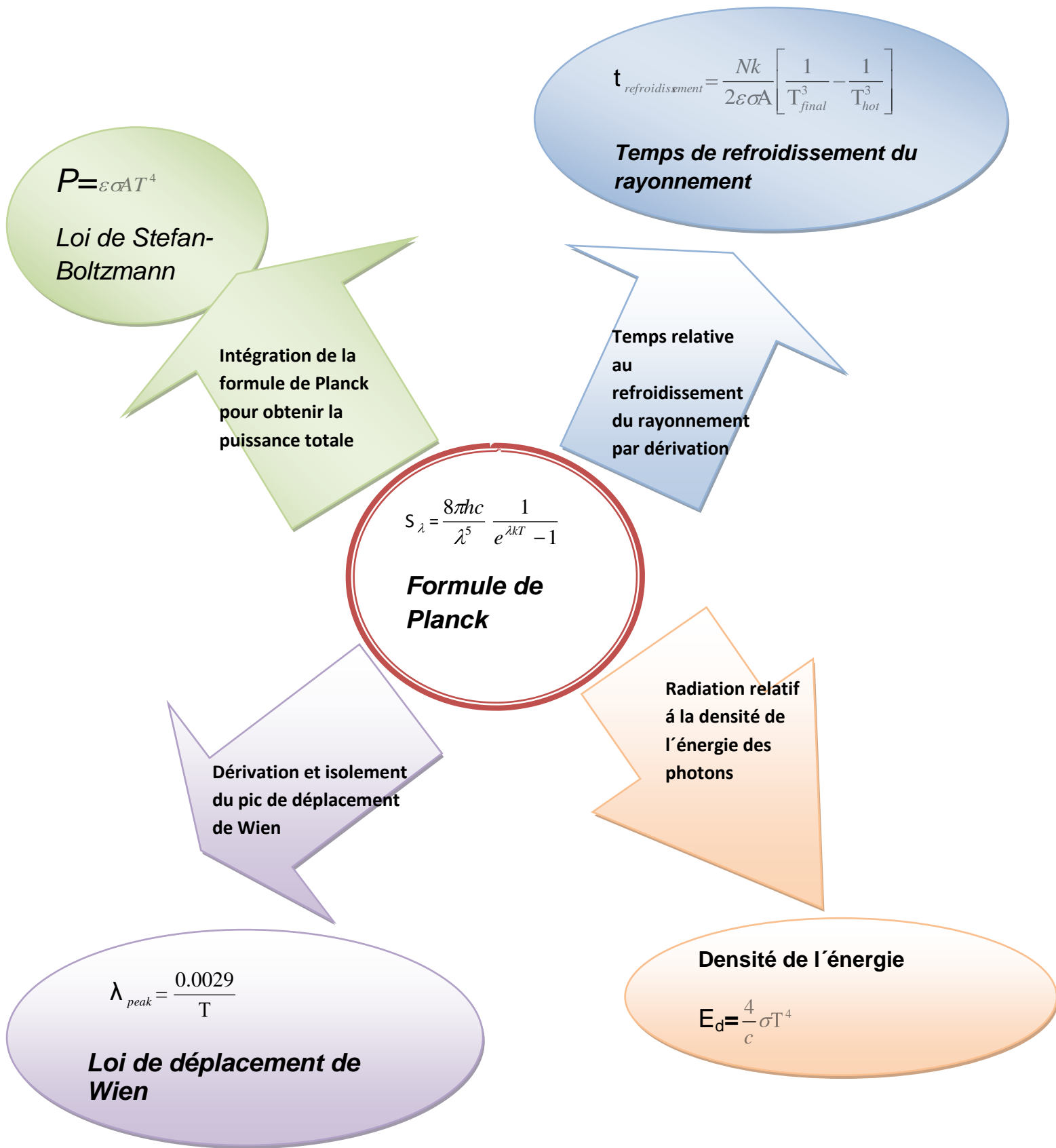


Fig.13 Anagramme des lois électromagnétiques

3 TRAVAUX PRATIQUES

3.1 Description des matériels de travail

Le système de mesure de réponse spectrale décrit ici a été développé pour mesurer la réponse spectrale des photodiodes. Ce système se compose de trois principaux instruments : un monochromateur, un système de détection calibrée, et un analyseur de paramètres de semi-conducteurs. Pendant le fonctionnement du système, une source lumineuse à large bande est passée à travers un monochromateur distinguant la fréquence désirée de lumière pour éclairer la photodiode. L'intensité de la lumière est mesurée avec un détecteur calibré et stockés sur l'ordinateur. Le système est composé des instruments suivants :

- D'une source lumineuse (Thermo Gauge)
- Deux supports de lentille
- Un monochromateur MS 260i
- Des miroirs de déviation de lumière.
- Détecteur thermophile ou pyromètre
- Amplificateur
- Ordinateur
- Bouteille d'azote

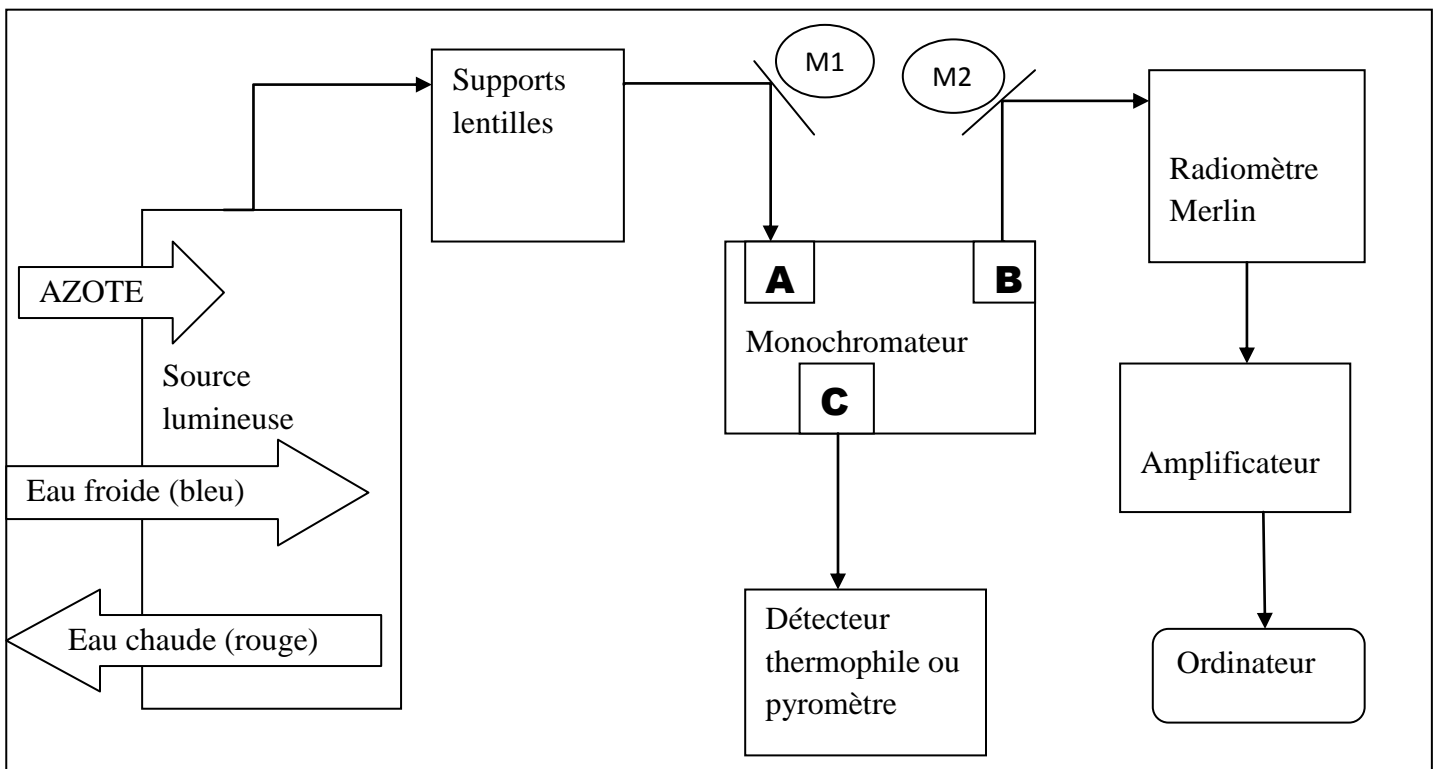


Fig.14 Dispositif des équipements du système spectral

La figure 4 montre le schéma du système de test et les voies de communication entre les principales pièces d'équipement. La source lumineuse est une 100W quartz halogène de tungstène de la lampe. Il est logé dans une enceinte appelée thermo Gauge Instruments. La source lumineuse est alimentée par une alimentation 300W de puissance radiométrique et une intensité lumineuse contrôleur régule son intensité. La gamme spectrale utilisable de la source lumineuse comprend le proche infrarouge et partie visible du spectre électromagnétique (approximativement dans la fourchette 400-2000nm).

3.1.1 Source lumineuse

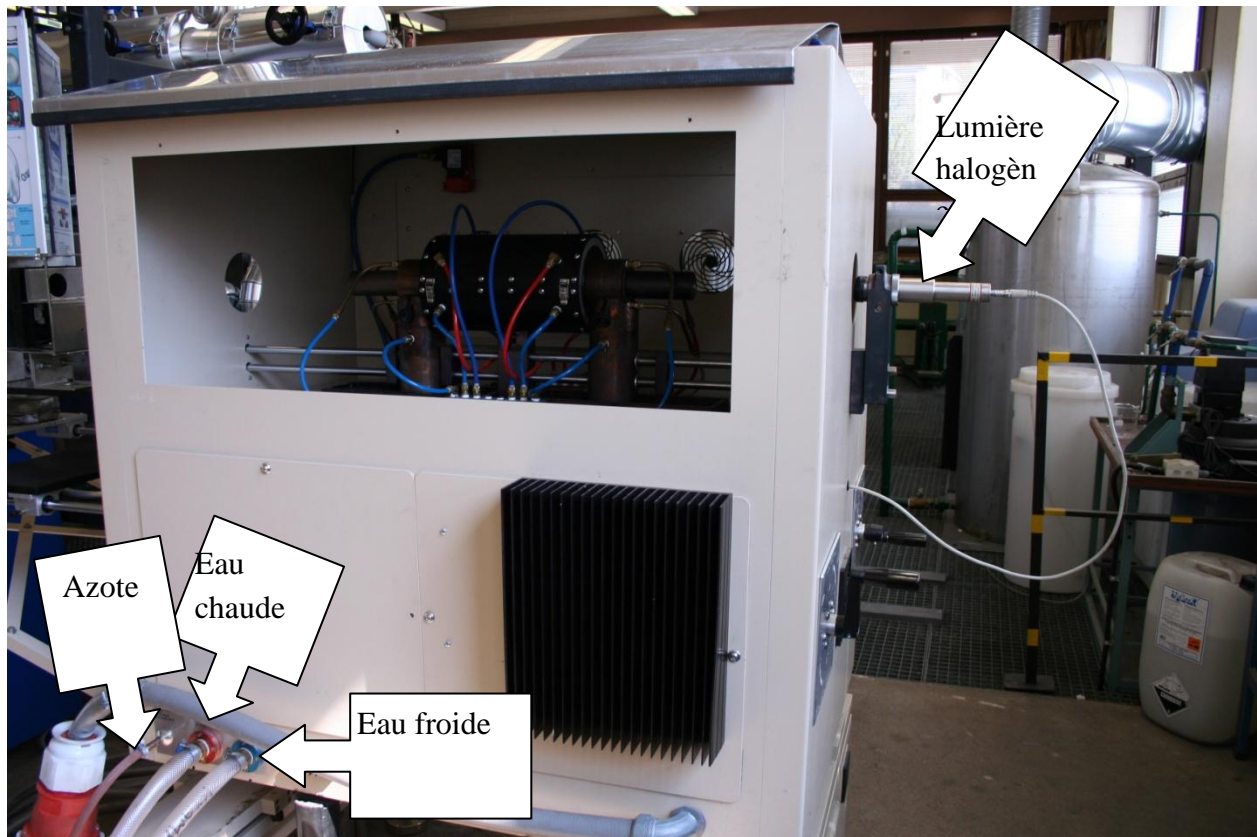


Fig.15 Laboratoire Kyamk : Thermo Gauge instruments

La Fig.15, nous montre la source lumineuse qui nous permettra de déterminer. Pour le bon fonctionnement du dispositif, on aura besoin de l'eau froide (tuyau bleu) et un apport d'azote. Au cours de l'expérience, l'eau froide va se chauffer en fonction de la variation de la température. Le tuyau rouge représente une sortie d'eau chaude.

- Le système de refroidissement

L'eau de refroidissement a deux fonctions principales. La première fonction qui est de refroidir les embouts en cuivre, un transformateur, et les postes de l'électrode. La seconde consiste à refroidir la veste réfléchissante qui entoure le corps noir. L'eau de refroidissement de la gaine du grand réflecteur a l'avantage de supprimer la chaleur non désirée de la salle d'étalonnage et de réduire la température à l'intérieur du four. Pour garantir une bonne gamme d'UV, on utilisera une longueur d'onde de 632 nm, dont la source de lumière est le laser He-Ne. Pour la région visible et IR la source de lumière utilisée est une lampe halogène à une température maximale de 1800K. Pour mieux positionner la source de lumière, quelques règles et conseils pratiques sont nécessaires à suivre.

1. Apport de l'eau et de gaz (Azote)
2. Vérifier l'apport de l'électricité
3. Faire un examen minutieux de sécurité
4. Régler le positionnement de l'instrument en fonction du monochromateur. (voir fig. 4.1).
5. Régler et nettoyer les lentilles pour mieux dévier la lumière enfin que le récepteur puisse l'identifier.

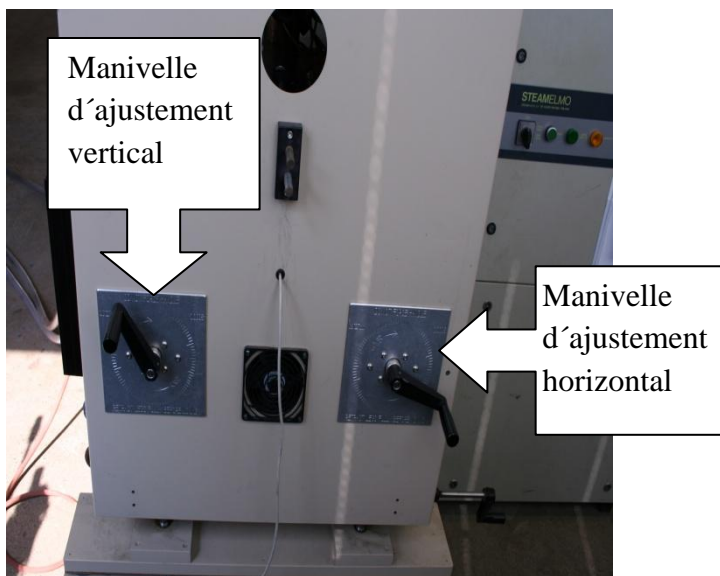


Fig.16 Positionnement du thermo Gauge Instruments

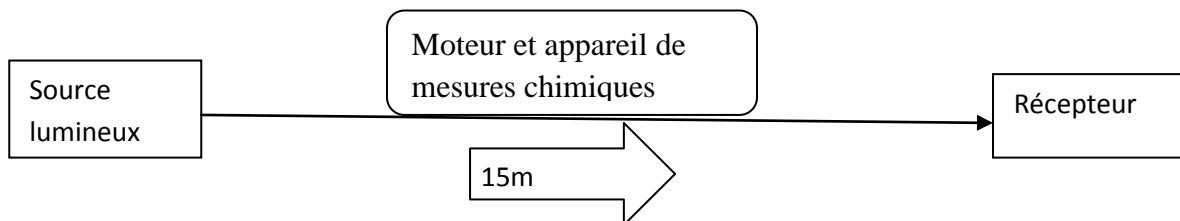


Fig.17 Représentation schématique du dispositif de travail. (Un schéma détaillé est illustré dans le document 2 annexe)

On a une source lumineuse qui est séparée du récepteur de 15 m. Le moteur d'alimentation (électricité) est situé en externe. Le dispositif est localisé au laboratoire de l'école supérieure polytechnique de Kymenlaakson. La position teste est dite préliminaire, car elle fait office de position teste avant toute expérience. La position expérimentale est la position que doit prendre le dispositif pendant toute l'expérience. Dans cette position le récepteur et la source lumineuse sont montés en perspectives la cavité contenant les miroirs sont ouvertes latéralement et juxtaposés l'une après l'autre.



Fig.18 Corps noir de model HT-9500. (Blackbody)



Figure 19 Double cavités d'un corps noir

Il s'agit d'une image d'un corps noir de type double cavités. L'ensemble est monté sur un HT-9500 et le couvercle du panneau avant est enlevé. L'eau de refroidissement (tube bleu et rouge)

3.1.2 Les différentes lentilles

Il existe deux types de lentilles M1 et M2 dans tout le système. Les lentilles M1 se trouvent sur le thermo Gauge Instruments (source de la lumière). M1 permet à la lumière d'être déviée pour parvenir au récepteur avec précision.

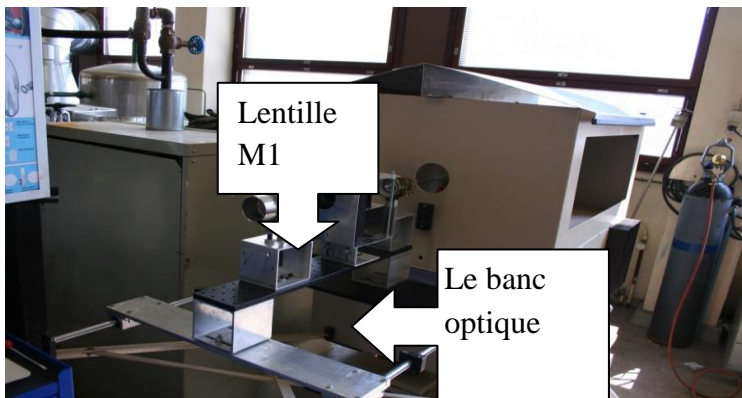


Fig. 20 Les lentilles (M1) d'orientation vers le récepteur de lumière.

Les lentilles M2 se trouvent au niveau du récepteur de la lumière. Les lentilles sont encastrées dans un boîtier circulaire. La fonction des lentilles M2 est d'orienter la lumière dans le détecteur thermophile. Les lentilles sont montées sur un support appelé banc optique (document 2)

- Le banc optique est un rail coulissant de direction XY. La direction X est de 39 " soit 9,906 m et la direction Y est de 22 " soit 5,588m.

3.1.3 Le monochromateur

Un monochromateur est un morceau de matériel d'optique qui prend une source de lumière à large bande et distingue une région donnée à bande étroite du spectre électromagnétique (2,1 nm lorsque les deux fentes d'entrée et sortie sont fixés sur une largeur de 1mm). Le monochromateur utilisé dans le système de test est un MS260 i. Le MS260i est un monochromateur à trois portes dont une d'entrée A, puis deux portes de sorties B et C. Seul l'un des ports de sortie peut être sélectionné à la fois. Le MS260i utilisés dans le système de test a un réseau de diffraction avec 1800 lignes / mm et un incendie 500nm, lui donnant une portée optique de 300 à 1050nm avec une efficacité maximale à 500nm.

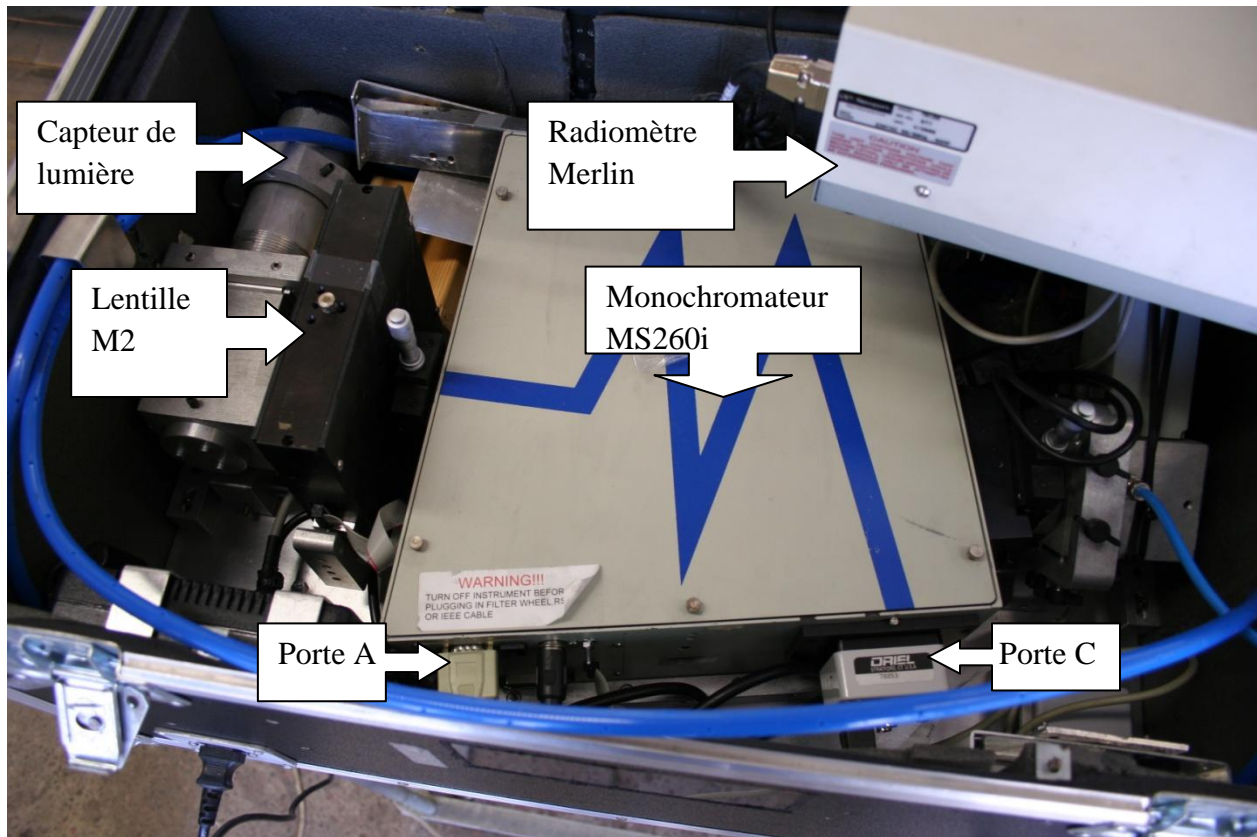


Fig.21 Monochromateur et récepteur de la source de lumière.

3.1.4 Le système de radiométrie

Le système de radiométrie est composé d'un détecteur silicium calibrés, un hachoir à la lumière et le radiomètre Merlin. Le radiomètre Merlin est utilisé pour déterminer la puissance d'une longueur d'onde spécifique de la lumière par le monochromateur. Le détecteur de silicium de 1cm^2 photodiode fonctionnant en mode photovoltaïque, et il est calibré pour être utilisé sur une plage de longueur d'onde comprise entre 400 et 1100nm. Un modulateur optique est généralement utilisé pour enlever l'intensité modulée par les bruits indésirables provenant de la source lumineuse (60 Hz par exemple). La fréquence

peut être réglée à une valeur comprise entre 3.2Hz et 4000Hz. Le Merlin contrôle à la fois le détecteur calibré et le couperet.

3.2 Détecteur thermophile ou pyromètre

Le pyromètre optique permet de mesurer les températures d'objets solides au-delà de 700 °C. À de telles températures, les objets solides émettent suffisamment d'énergie dans la gamme des rayonnements visibles pour permettre une mesure optique fondée sur le phénomène de température apparente de la couleur d'incandescence, la couleur émise par les objets incandescents allant du rouge sombre au jaune, puis au blanc vers 1 300 °C. Le pyromètre contient un filament analogue à celui d'une ampoule électrique, commandé par un rhéostat calibré, de façon que les couleurs du filament incandescent correspondent à des températures précises. Ainsi, la température d'un objet incandescent peut être mesurée en regardant cet objet à travers le pyromètre et en réglant le rhéostat jusqu'à ce que le filament devienne invisible sur le fond de l'objet : les températures du filament et de l'objet étant alors égales, elles peuvent être lues sur l'échelle du rhéostat

3.3 Systèmes de mesures des corps chimiques.

Le matériel de mesures utilisées est un analyseur de gaz appelé analyseur de gaz PG-250. Cet analyseur de gaz permet d'analyser cinq composantes chimique à la fois, est un analyseur de gaz très fiable et polyvalent pour la vérification de la conformité des émissions de NO_x, SO₂, CO, CO₂ et O₂. Les applications des mesures réalisées avec l'analyseur de gaz de type PG-250 sont multiple.

- Emission de NO_x, SO₂, CO, CO₂ et O₂
- Efficacité du combustible
- Les systèmes de contrôle de la pollution
- La production de l'électricité et du raffinage
- Les turbines à gaz et les chaudières



Fig. 22 Analyseur de gaz PG-250

3.4 Mesures effectuées par rapport aux différents filtres

Les détails techniques des différents filtres sont énumérés dans le tableau 1 suivant. Les filtres peuvent changer directement en fonction des numéros sur l'ordinateurs.

Filtres No.	Longueur d'onde (nm)	Model No.	Résultats
1	235	WG 225	
2	395	GG 395	
3	645	RG 645	
4	1000	RG 1000	
5	2500	RL 2500	Filtre Absorbant la chaleur

Tableau3 Positionnement des filtres en fonction des longueurs d'onde

Le tableau montre que le positionnement des filtres est dépendant des longueurs d'onde, mais dans la pratique on a :

- 1) Le filtre No : 4 (F4) et No : 1 (F1) sont opposés.
 - Le balayage des filtres s'effectuent aux environ de 1000 nm, et celui de la lumière est en-dessous de 1000 nm.
 - La zone de numérisation est de 1000-3200nm, mais cette zone de numérisation devrait commencée à 900 nm
- 2) Le filtre No : 5 (F5) et No : 2 (F2) sont opposés.
 - Le balayage des filtres s'effectuent aux environ de 2500 nm, et celui de la lumière qui est en-dessous de 2500 nm.
 - La zone de numérisation est de 2500-5200nm, mais cette zone de numérisation devrait commencée à 2300 nm.
- 3) Le filtre No : 6 (F6 = pas de filtre) est virtuellement opposé à F1 et chaque fois ouvert.
 - La position ouvert du filtre F6 peut être scannées tout le long de l'expérience, mais comprend également des pics secondaires et tertiaires
 - La zone de numérisation est de 200-9600nm,

Le tableau du document 3 donne les mesures a effectuer au laboratoire à Kyamk.

3.4.1 Interprétations des mesures effectuées en fonction des longueurs d'onde.

Les mesures ont été réalisées à l'université polytechnique de Kotka du 22 au 26 Novembre 2010. Une source lumineuse d'une puissance de 250 W avec une lampe halogène a été nécessaire à la réalisation des testes suivants. Une courbe récapitulative de différentes mesures réalisées avec tous les filtres est illustrée sur la courbe suivante.

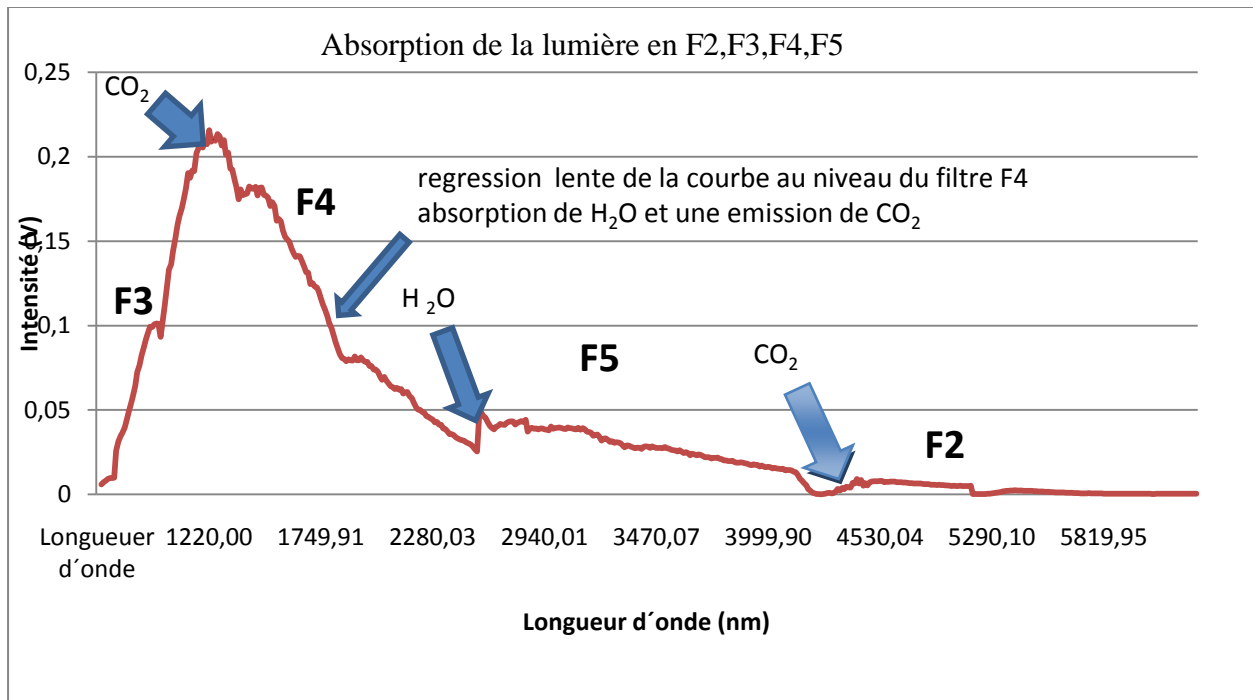


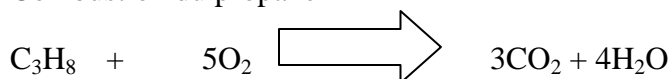
Fig. 23 Courbe récapitulative de l'intensité de la lumière absorbée(I) en fonction de la longueur d'onde au niveau de chaque filtre (C3)

La longueur d'onde varie entre 500 nm à 5900 nm, ce qui nous fait dire que la lampe halogène utilisée produit une lumière infrarouge. La courbe a deux points maximum distincts. Ces deux maximums proviennent de l'absorption de l'eau (H₂O) du gaz carbonique (CO₂). L'absorption de H₂O se situe entre 2280 nm et 2940 nm et l'absorption de l'eau (CO₂) se situe entre les longueurs d'onde 1220 nm et 1750 qui correspond à la montée croissante de la température dans le thermo Gauge, puis un second maximum qui se situe entre 4000 nm et 4530 nm. La concentration de CO₂ est de 1,67% en moyenne par 20 ml de gaz contenue dans la chaudière.

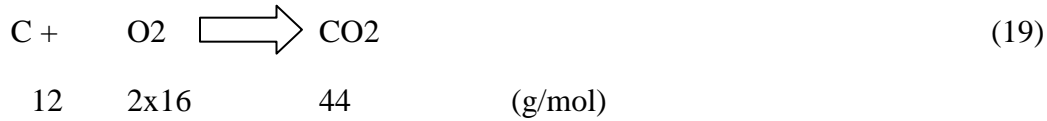
3.4.2 Absorption des corps chimiques dans les différents filtres

Les différents corps chimiques relevés dans la chaudière sont énumérés dans le document 2 en annexe. On remarque que la concentration en monoxyde d'azote (NO) et l'oxygène (O₂) augment de manière significatif lorsque la pression du gaz augmente. Néanmoins on a aussi la présence de quelques corps chimiques qui ont leurs importances. En occurrence le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂).

Combustion du propane



3.4.2.1 Déterminons la masse de dioxyde de carbone (CO₂) émise dans l'air

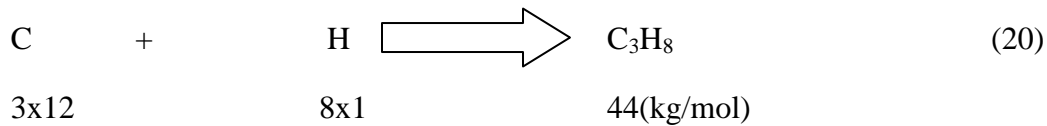


C (12g/mol)

O₂ (2x16 g/mol = 32 g/mol)

1 kg de \longrightarrow 1kgx44/12= 3,7kg

Le combustible utilisé dans la chaudière est du propane (C₃H₈)



C=36/44= 81, 81 %

H₂=8/44=18, 19 %

La masse volumique du propane (C₃H₈) $\delta_{\text{C}_3\text{H}_8}=44\text{kg/mol}/22,4 \text{ mol/m}^3=1,96 \text{ kg/m}^3(\text{n})$

Dans 1kg C₃H₈ on a 1000 g x 81,81 % de Carbone (C) soit 818,1 g de carbone

A T=20 °C soit T= 273+20= 293K

$m_{\text{co}_2}=818,1\text{g} \times 44/12= 2999,7 \text{ g}$ soit 2,9997 kg

3.4.2.2 Déterminons le volume d'air utilisé (I) lors de la combustion du gaz

Coefficient d'air échappé

$$\lambda = 20,9 / (20,9 - \text{O}_2) \quad (21)$$

$$\lambda = 20,9 / (20,9 - 17,45) = 6,05$$

Volume massique réel d'air (I) utilisé pendant la combustion du gaz

Le volume théorique de l'air I₀ =10,7m³(n)/kg et le débit w= 0,4 l/min soit w= 0,0000067 m³/s permettent de calculer le volume d'air utilisé dans la combustion

$$I = m_{\text{pa}} \lambda I_0 \quad (22)$$

$$m_{\text{pa}} = C_{\text{mco}} \times w \quad (23)$$

A T=20 °C soit T= 273+20= 293K et la masse volumique du propane (C₃H₈)

$\delta_{\text{C}_3\text{H}_8}=44\text{kg/mol}/22,4 \text{ mol/m}^3=1,96 \text{ kg/m}^3(\text{n})$

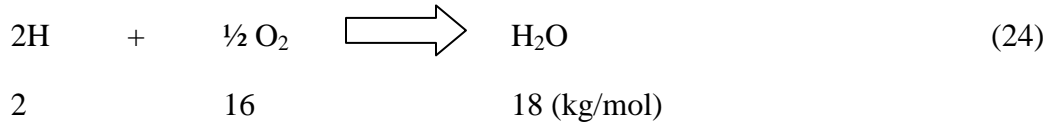
$$C_{\text{mco}}=1,96 \text{ kg/m}^3(\text{n}) \times 273/293 =1,83 \text{ kg/m}^3(\text{n})$$

$$m_{pa} = 1,83 \text{ kg/m}^3 \text{ (n)} \times 6,67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 12,2 \times 10^{-6} \text{ kg/s} \text{ soit } 12,2 \text{ mg/s}$$

$$I = 12,2 \times 10^{-6} \text{ kg/s} \times 6,05 \times 10,7 \text{ m}^3 \text{ (n)/kg} = 789,79 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ (n)/s}$$

La quantité d'air utilisée dans la combustion est $789,79 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ (n)/s}$

3.4.2.2 Déterminons le volume d'hydrogène V_H lors de la combustion du gaz



Le pourcentage d'hydrogène dissipé. Les équations (20) et (23) donnent

$8 \text{ kg/mol} / 44 \text{ kg/mol} \times 100\% = 18,2\%$. Pour 1kg de propane C_3H_8 on aura

$0,182 \times 12,2 \text{ mg/s} = 2,22 \text{ mg/s}$. La masse d'hydrogène qu'il faut pour une masse $2,22 \text{ mg/s}$ de propane en fonction de la masse volumique de l'eau, on aura

$$V_H = m_{H_2} \times \rho_{H_2O} \quad (25)$$

$$m_{H_2} = 18 \text{ kg/mol} \times 2,22 \text{ mg/s} / 2 \text{ kg/mol} = 20 \text{ mg/s}$$

$$\text{Avec } \rho_{H_2O} = 18 \text{ kg/mol} / 22,4 \text{ mol/m}^3 = 0,8036 \text{ kg/m}^3 \text{ (n)}$$

$$V_H = 20 \times 10^{-6} \text{ kg/s} / 0,8036 \text{ kg/m}^3 \text{ (n)}$$

3.4.2.3 Déterminons la quantité de gaz échappé (V) lors de la combustion

Volume théorique de gaz (V_0) utilisé pendant la combustion du gaz

- Humidité $V_{01} = 3,50 \text{ m}^3 \text{ (n)/s}$
- Sec $V_{02} = 2,53 \text{ m}^3 \text{ (n)/s}$

$$V = m_{pa}(V_0 + (\lambda - 1)I_0) \quad (26)$$

Humidité

$$V = 12,2 \times 10^{-6} \text{ kg/s} (6,05 - 1) 3,50 \text{ m}^3 \text{ (n)/kg} = 215,63 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ (n)/s}$$

Sec

$$V = 12,2 \times 10^{-6} \text{ kg/s} (6,05 - 1) 2,53 \text{ m}^3 \text{ (n)/kg} = 155,87 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ (n)/s}$$

Il est possible de calculer la quantité de gaz échappé V_T si la température de la combustion est donnée. Sachant que la température du gaz échappé ($T = 380^\circ\text{C}$) la quantité de gaz échappée V_T est

$$V_T = (380+273)/273 = 2,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.4.2.4 Déterminons la puissance (ϕ) du rayonnement du corps noir (thermo Gauge)

Sachant que la surface traversée par le rayonnement a pour rayon $r= 0,16 \text{ m}$ pour une température T de $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ (BB2500)

$$\phi = C_s \varepsilon A (T/100)^4 \quad (27)$$

$$A = \pi r^2 \quad \text{et le corps noir } \varepsilon = 1 \quad (28)$$

$$A = \pi (0,16\text{m})^2 = 0,08 \text{ m}^2$$

$$\phi = 5,67 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \times 1 \text{ m}^2 \times 1 \times (2773/100)^4$$

$$\phi = 3352606 \text{ W} \quad \Rightarrow \quad \phi = 3,35 \text{ MW}$$

3.4.3 Emission, absorption et de transmission du CO_2 par rapport au filtre F5.

Notre interprétation se limitera sur le domaine de l'infrarouge. Dans ce domaine, l'absorption des photons est due à la transition depuis l'état fondamental vers un niveau de vibration de la molécule. Ces niveaux dépendent de la molécule considérée et sont discrets. Une même molécule peut donc avoir plusieurs bandes d'absorption correspondant à différents niveaux de vibration. La molécule de CO_2 possède 3 modes de vibrations différents. Deux (2) modes d'étirement dont un symétrique et un asymétrique. Puis un mode dégénéré de flexion.

Pour avoir déjà manipulé un ressort, on sent bien qu'il est moins coûteux en énergie de tordre la molécule que de l'étirer. C'est pourquoi la longueur d'onde des photons réalisant la transition entre l'état fondamental et l'état excité sera plus faible pour les modes d'étirement que de flexion. Cependant, le mode symétrique d'étirement n'induit pas de moment dipolaire électrique au sein de la molécule. En effet, les atomes d'oxygène (rouge) portent une légère charge négative alors que l'atome de carbone (bleu) porte une légère charge positive. Dans le mode symétrique, le barycentre des charges reste fixe, alors que dans les 2 autres modes, le barycentre oscille. L'oscillation de ce moment dipolaire est une condition nécessaire à l'absorption d'un photon. Finalement, parmi les 3 modes de vibration, seuls les modes d'étirement asymétrique et de flexion sont associés à des bandes d'absorption. Sur un diagramme énergétique, on devrait trouver une bande d'absorption associée au mode d'étirement asymétrique et à une longueur d'onde plus élevée, une bande associée au mode dégénéré de flexion.

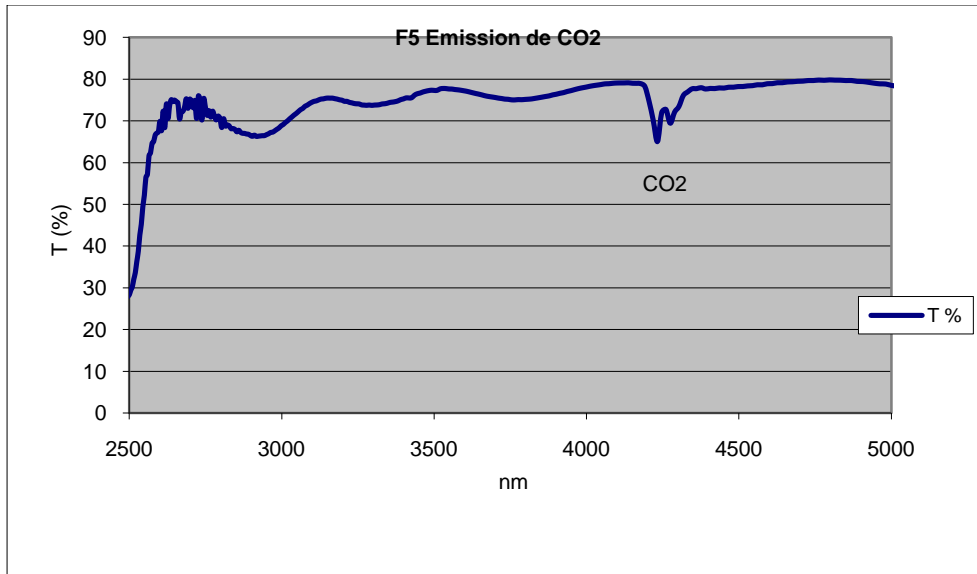


Fig.23 Courbe d'émission de CO₂ sur une longueur d'onde variant entre 2500-5000nm (C6)

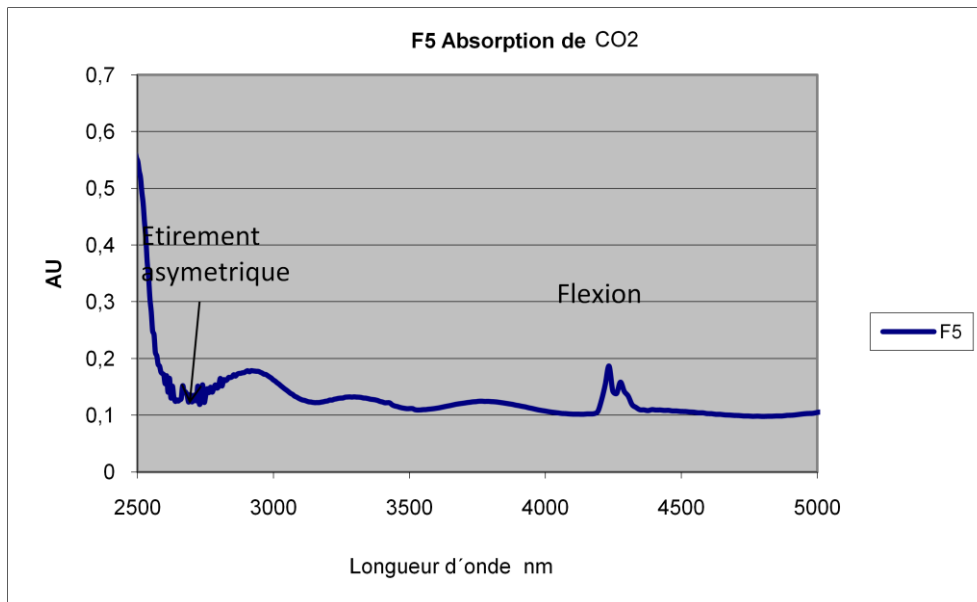


Fig.24 Courbe d'absorption de CO₂ sur une longueur d'onde variant entre 2500-5000nm (C7)

Pour interpréter le spectre, on retiendra que la transmission est le complément à 100 % de l'absorption. En partant de la courbe précédente (C7), on trouve directement la courbe suivant (C8) de la transmission de CO₂ en inversant les valeurs de la longueur d'onde en cm⁻¹.

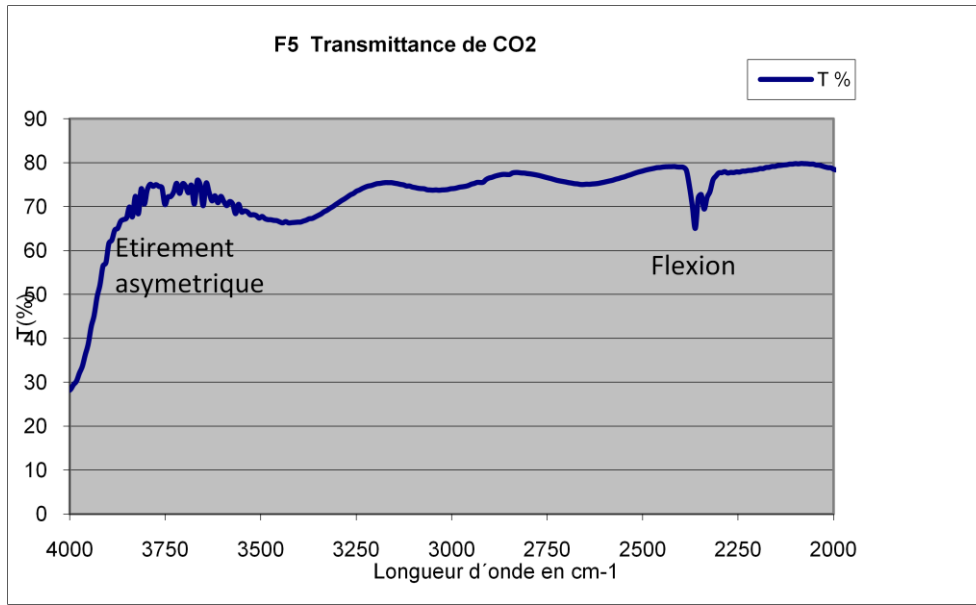


Fig.25 Courbe de transmission de CO₂ sur une longueur d'onde variant entre 4000-2000 cm⁻¹ (C8)

Le spectre d'absorption du CO₂ a été réalisé au Laboratoire de l'école supérieure polytechnique de Kymenlaakson. On retrouve bien les 2 bandes d'absorption théoriques à 2700 nm (étirement asymétrique) qui correspondent à une absorption d'eau (H₂O) et 4250 nm (flexion). Les courbes (C6) et (C7) montrent un pic de CO₂ à partir de la longueur d'onde variant entre 4200 - 4450 nm. La température de la lumière étant de T= 380 °C soit T= 653 K. Alors la loi de Wien nous permet de déterminer avec exactitude le pic de CO₂

❖ Déterminons la longueur d'onde maximal selon la loi de déplacement de Wien (8)

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \times 10^{-3} \text{ m}}{T} \quad \Longrightarrow \quad \lambda_{\max} = \frac{2,9 \times 10^{-3} \text{ m}}{653 \text{ k}} = 4,44 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Le pic de CO₂ a lieu exactement à une longueur d'onde de 4440 nm, cela correspond à une lumière issue de l'infrarouge selon le tableau 2.

❖ Déterminons l'énergie M émise. Cette énergie émise est donnée par la loi de Stefan Boltzmann (14).

$$M = \sigma T^4 \quad \Longrightarrow \quad M = 5,67 \times 10^{-8} \times 653^4 = 10\,309 \text{ j} = 10 \text{ kJ}$$

❖ Déterminons la puissance utile P₁ issue de la loi de Planck (16) pendant l'expérience.

$$P_1 = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)^{-1}$$

$$P_1 = \frac{8\pi \times 6,625 \times 10^{-34} \times 299792458}{4440^5} \left(\frac{6,625 \times 10^{-34} \times 299792458}{1,3806503 \times 10^{-23} \times 653} \right)^{-1}$$



$P_1 = 20,34$ w est la puissance absorbée par le monochromateur

Avec $T = 653$ K, $\lambda = 4440$ nm

$P =$ Puissance du rayonnement

$\epsilon =$ émissivité (=1 rayonnement idéal)

$A =$ Aire du rayonnement

$T =$ Température du rayonnement

$\sigma =$ Constante de Stefan

$T_c =$ Température environnante

$$\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^4$$

- la constante de Boltzmann $k = 1,3806503 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kgs}^{-2} \text{ K}^{-1}$
- la vitesse de la lumière dans le vide : $c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$
- h , la constante de Planck, vaut $h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ Js}$.

$P_1 = 20,34$ w est la puissance absorbée par le monochromateur

- ❖ Déterminons la puissance utile P_2 par le monochromateur durant toute l'expérience

$$P_2 = UI \text{ avec } U = 240 \text{ V et } I = 80 \text{ mA}$$



$$P_2 = 19,2 \text{ w}$$

- ❖ Le rendement du monochromateur $\eta = P_2/P_1 = 19 \text{ w}/20,34 \text{ w} = 0,9439$ soit 94,39%

Le rendement (94,39%) étant très important, montre que le monochromateur effectuent conséquent, car il a une perte d'énergie moins influant sur le déroulement de toute l'expérience.

- ❖ Déterminons la fréquence f correspondante à la longueur d'onde maximal λ_{max}

$$f_{\text{max}} = c/\lambda_{\text{max}} = 299792458 \text{ ms}^{-1}/4,44 \times 10^{13} \text{ Hz}$$

3.4.4 Emission, absorption et de transmission du C, H par rapport au filtre F1-3

Le spectre d'absorption du C, H a été réalisé au Laboratoire de l'université polytechnique de kymenlaakson. On retrouve bien les 2 bandes d'absorption théoriques à 3000 cm^{-1} et 1500 cm^{-1} . Les courbes (C9) et (C10) montrent un pic de chacun des molécules présentent à partir d'un intervalle de longueur d'onde varie entre $2800\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$ pour le premier Pic $1300\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$. Les courbes (C9) et (C10) nous donnent l'évolution de chaque gaz. Mais, la particularité de chaque corps gazeux, c'est qu'ils n'ont pas les même raie d'absorption. Néanmoins leur dilatation s'effectue quasiment dans la même intervalle de longueur d'onde. En partant de la courbe (C9), on trouve directement la courbe suivant (C10) de la transmission de C, H en inversant les valeurs de la longueur d'onde en cm^{-1} . La transmission est le complément à 100 % de l'absorption.

Les données numériques sont consignées dans le document 2 en annexe.

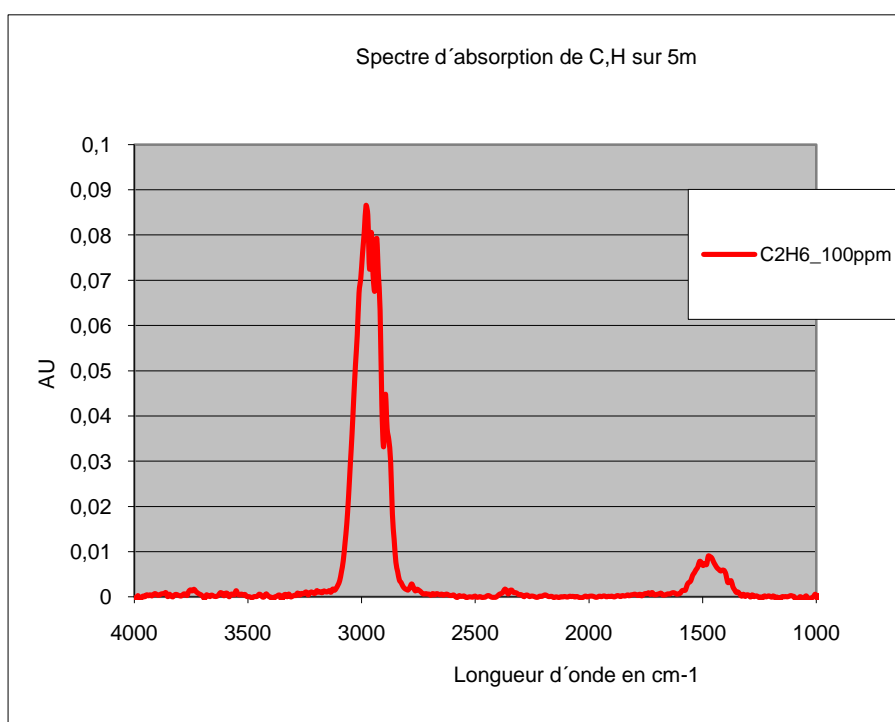


Fig. 26 Spectre d'absorption de C, H sur 5m

(C9)

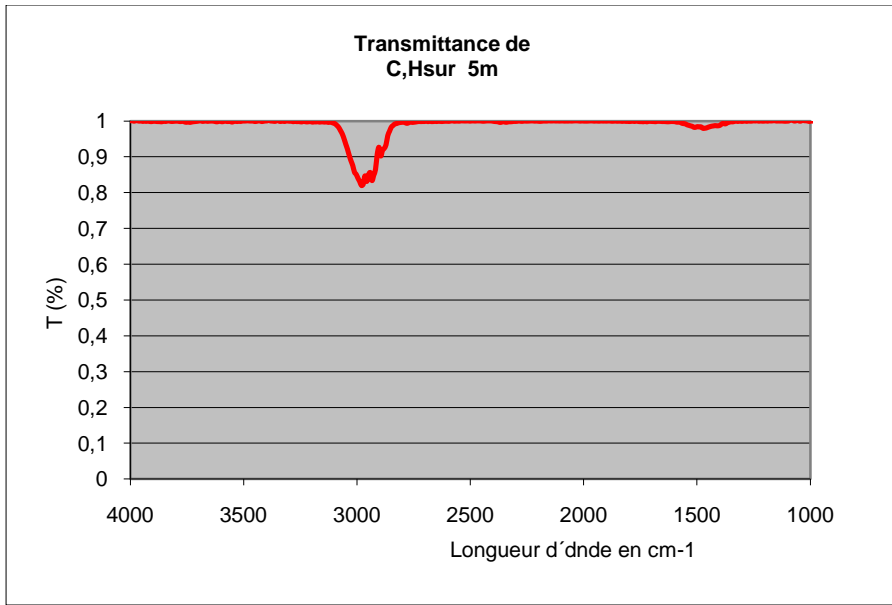


Fig. 27 Spectre d'absorption de C, H sur 5m (C10)

En partant de la courbe (C9), on trouve directement la courbe suivant (C10) de la transmission de C, H en inversant les valeurs de la longueur d'onde en cm^{-1} . La transmission est le complément à 100 % de l'absorption.

La température de la lumière est de $T = 1800 \text{ K}$ dont la source est He-Ne-laser. Alors la loi de Wien nous permet de déterminer avec exactitude le pic de $\text{C}_3 \text{H}_8$ (propane)

❖ Déterminons la longueur d'onde maximal selon la loi de déplacement de Wien

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \times 10^{-3} \text{ m}}{T} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\max} = \frac{2,9 \times 10^{-3} \text{ m}}{1800 \text{ K}} = 1,61 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Le pic de $\text{C}_3 \text{H}_8$ a lieu exactement à une longueur d'onde de 1610 nm, cela correspond à une lumière issue de l'ultraviolet selon le tableau 2.

3.5 Applications des lois du rayonnement thermique dans la vie quotidienne

A travers l'étude du corps noirs et les lois électromagnétiques que sont la loi de Planck, de Stefan Boltzmann et de Wien, le rayonnement thermique présente un avantage important dans le secteur de la production de l'énergie. Par exemple, le rayonnement thermique via ses propriétés peut apporter un plus dans le développement l'énergie solaire en apportant des réponses précises sur l'émissivité et l'absorption du rayonnement solaire. Outre la production énergétique, le rayonnement thermique a une importance capitale dans plusieurs domaines (astronomie, construction, la santé etc.). Dans le domaine de la construction le rayonnement thermique qui est un mode d'échange de chaleur utilise des ondes infrarouges comme vecteur de transfert. En effet, deux corps ou deux objets de

températures différentes rayonnent naturellement l'un vers l'autre et il convient de retenir que les flux de chaleur vont toujours de l'élément le plus chaud vers l'élément le plus froid. En matière de chauffage, le rayonnement émis dans l'ambiance par le plafond ou le plancher se transforme en chaleur au contact d'un objet, d'une personne ou d'une autre paroi plus froide. Toutes les surfaces ainsi chauffées rayonnent à leur tour et transmettent leur chaleur à l'ambiance, créant ainsi des conditions de confort optimum pour l'occupant. Dans le domaine de la santé, les rayons X ont permis à la médecine un progrès considérables dans la détection d'une certaine catégorie de maladies difficile à détecter à l'œil nu. Mais l'application majeure du rayonnement électromagnétique est l'impact des ondes électromagnétiques dans notre vie quotidienne à travers la télécommunication.

3.5.1. Impact des ondes électromagnétiques

Qui n'a jamais entendu parler des ondes électromagnétiques ? Tous, nous sommes un jour ou l'autre tombés sur un article ou une émission sur les GSM, Wifi, Bluetooth, ... Des technologies plus ou moins récentes qui utilisent des micro-ondes. Est-ce nocif pour la santé ? Difficile à dire, malgré les milliers d'études effectuées sur le sujet. Pour comprendre ce phénomène qui fait partie de notre quotidien, commençons par définir quelques notions.

Un champ électromagnétique est formé de la réunion d'un champ électrique et d'un champ magnétique, émet des ondes, qu'on appelle ondes électromagnétiques. Celles-ci sont soit naturelles (produites par la Terre et par chaque être vivant), soit artificielles (produites par des appareils). Chaque onde électromagnétique a une fréquence, une longueur et une puissance qui lui est propre. La longueur d'ondes est d'autant plus petite que la fréquence est élevée (il y a donc un rapport inversement proportionnel entre ces deux notions). Par contre, la puissance de propagation de l'onde augmente si la fréquence est plus grande.

Les ondes électromagnétiques sont classées en rayonnements ionisants (UV, des rayons X, des rayons gamma et des rayons cosmiques) et rayonnements non-ionisants (En dessous du visible, on retrouve les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge) en fonction de leur fréquence et également de leur puissance. Les rayonnements ionisants englobent les ondes à très haute fréquence.

3.5.2 Les GSM et les antennes relais

Les communications par GSM se font via la propagation d'ondes électromagnétiques transmises entre les GSM et des antennes relais. En conséquence, plus il y a usage de GSM, plus il y a d'antennes relais. Chacune d'elles permet de couvrir une zone, une superficie donnée. Afin de proposer un service qu'il veut efficace, chaque opérateur vise à couvrir tout un territoire donné par un ensemble d'antennes.

Les téléphones portables et leurs antennes relais fonctionnent chacun à la fois comme émetteur et comme récepteur, et à la même fréquence quand ils appartiennent au même réseau. Le signal émis par le téléphone portable est capté par l'antenne relais la plus proche qui, elle, renvoie le signal soit vers le réseau téléphonique traditionnel, soit vers d'autres antennes relais, soit encore vers un autre téléphone portable, celui-ci étant alors le récepteur

de la communication. La transmission des communications se fait par ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'air ambiant entre l'antenne relais et le poste portatif (ou vice-versa). Les réseaux utilisent les fréquences (la gamme des hyperfréquences ou micro-ondes) qui leur sont attribuées de même qu'il existe des fréquences d'émission réservées aux stations radio.

3.5.3 Le chauffage électrique par rayonnement infrarouge

Le chauffage électrique par rayonnement infrarouge est fondé sur le transfert d'énergie par rayonnement entre une source émettrice constituée d'éléments chauffants électriques et un corps à chauffer qui absorbe tout ou partie de cette énergie. C'est donc une application directe des lois du rayonnement thermique.

La mise en œuvre de ce type de chauffage nécessite toutefois des technologies spécifiques et la conception des fours et équipements thermiques utilisant le rayonnement infrarouge (IR) se différencie souvent fortement de celle des fours à résistances usuels. Aussi, ce mode de chauffage constitue-t-il depuis longtemps un domaine autonome avec des applications industrielles nombreuses et originales. L'intérêt du chauffage par rayonnement infrarouge vient essentiellement de son efficacité énergétique élevée qui tient à plusieurs facteurs :

- Il permet un transfert d'énergie d'un corps à un autre sans besoin, à la différence du chauffage par convection, de support intermédiaire et sans absorption sensible de l'énergie émise par le milieu les séparant ;
- l'énergie rayonnée peut être concentrée, focalisée, guidée et réfléchie de façon analogue à la lumière, ce qui donne une flexibilité et une adaptabilité remarquables ;
- l'inertie thermique est généralement faible, ce qui supprime les longues périodes de mise en chauffe ou de maintien ;
- la densité de puissance peut être très importante puisque la différence de température entre la source et le corps à chauffer est souvent élevée, ce qui conduit à des installations compactes et des vitesses de traitement élevées ;
- le rayonnement pénètre sur une certaine profondeur dans la matière, ce qui améliore l'homogénéité de chauffage et accélère le transfert d'énergie.

En revanche, les lois du rayonnement thermique montrent qu'il est difficile de traiter avec une excellente homogénéité de température des produits de forme tourmentée, sauf si la conduction et la convection permettent de réduire suffisamment leurs hétérogénéités.

Le rayonnement infrarouge est donc surtout adapté au chauffage de produits qui se présentent sous forme de bandes ou de nappes ou encore sont suffisamment répétitifs par leur forme ou leur taille, pour des applications à des températures relativement basses, généralement inférieures à 700 °C. En dépit de cette limitation, les applications industrielles concernées sont très nombreuses (séchage, cuisson, grillage, polymérisation, stérilisation, traitement thermique, etc.), de même que les secteurs d'activité (industries

mécaniques, textiles, papetières, alimentaires, des plastiques, des enductions, des matériaux de construction, etc.)

3.5.4 Les cellules solaires photovoltaïques

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par nos téléviseurs ne nous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque.

3.5.4.1 Principes de fonctionnement

a. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

b. Les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux.

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du band gap, E_g , en électronvolts (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons (particules de lumière) en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule.

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie du band gap (théorie des bandes) vont libérer un électron négatif, laissant un "trou" positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique, E , de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du dopage par des impuretés.

3.5.4.2 Deux types de dopage sont possibles

- Le dopage de type négatif (n)

Le dopage de type n (négatif) consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres.

- Le dopage de type positif (p)

Le dopage de type p (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Lorsque l'énergie du band gap augmente, le courant diminue mais la tension est plus élevée.

Le dispositif suivant nous montre le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

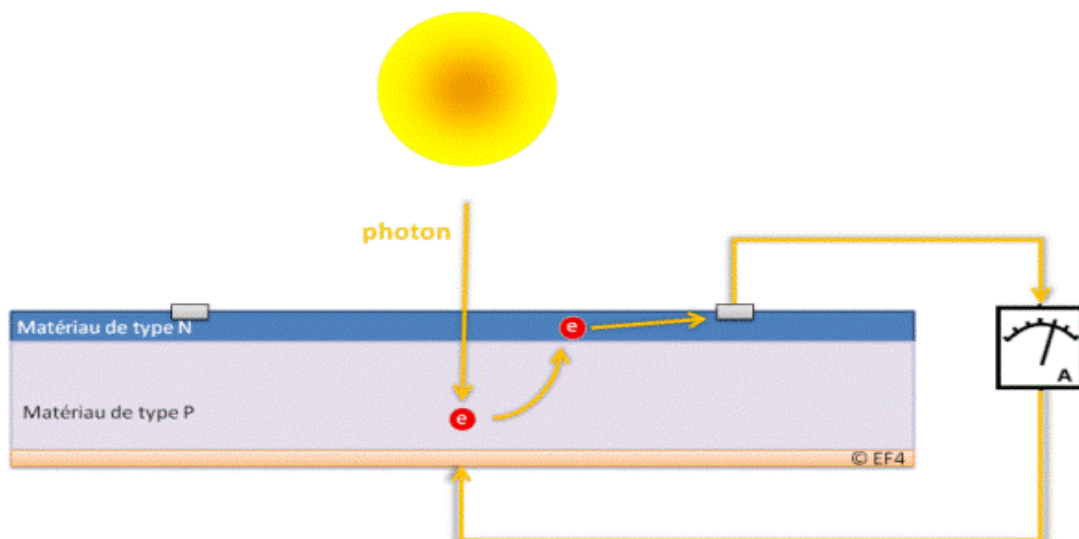


Fig. 28 Dispositif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (image extrait du guide des énergies renouvelables)

4.0 Conclusion

L'analyse des éléments théoriques et pratiques nous permet de dégager deux lignes directrices dans la gestion d'une centrale électrique et en particulier dans centrale à gaz. Pour réduire l'émission inutile des gaz, on peut utiliser la méthode du rayonnement thermique, basée uniquement sur le rayonnement électromagnétique qui dépend des lois de Planck et de son spectre. La deuxième méthode consiste à utiliser un analyseur de gaz pour recueillir les différents éléments chimiques qui s'échappent de la chaudière. Ainsi, on pourra limiter une perte considérable du combustible pour l'alimentation de la chaudière. La connaissance des effets du rayonnement thermique, nous permet de s'orienter vers l'une des énergies renouvelables, en occurrence l'énergie solaire ou photovoltaïque.

Le seul domaine dans lequel la Terre bénéficie d'un apport extérieur constamment renouvelé est précisément celui de l'énergie grâce au rayonnement reçu de son soleil. Cette énorme quantité d'énergie solaire se décline en autant d'énergies renouvelables (solaire, éolienne, thermique, hydraulique, biochimique.). C'est particulièrement le cas de l'électricité photovoltaïque issue de la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, vecteur aux très nombreuses qualités. Si cette filière énergétique récente fait figure de candidat exemplaire en théorie, sa valorisation pratique pose des problèmes très spécifiques, techniques mais aussi contextuels, dont certains ont freiné son développement avant la forte croissance observée actuellement. Son exploitation implique les contextes géophysique et énergétique, les propriétés physiques du rayonnement solaire, les propriétés technologiques des dispositifs de conversion photovoltaïque et finalement celles des systèmes et des applications qui exploitent efficacement cette énergie. Ainsi les lois et principes du rayonnement thermique ont une importance appréciable dans la production de l'énergie solaire. L'absorption et l'émission des rayons du soleil peuvent être maîtrisés et gérés à bonne escient pour une production énergétique à grande échelle.

5.0 REFERENCES

Yunus A. Cengel : Heat and mass transfer (a practical approach), 2006. Third edition (SI Units) pp 663-707.

Yunus A.C., Robert, H.T, John, M. C: Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, 2008. Third edition in (SI units). pp 876-892

Hugh D. Y., Roger A. F.: University Physics , Juin 1996. Ninth edition. pp 1025-1049.

Louis A. Bloomfield: How things work the physics of everyday life , 1997. pp 489-546.

Référence sur internet

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/blanquet/rayonnem/11defloi/11defloi.htm>
(Définition du rayonnement électromagnétique. Site révisé le 26.6.2010 et consulté 14.07.2010)

http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/XML/db/csphysique/metadata/LOM_CSP_CorpsNoir.xml. (Culture Sciences-Physique - Le corps noir. Date de révision du site 27.8.2010 et consulte le 09.09.2010)

<http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/TTE/DocsTTE/Divers/Corps%20noir.pdf> (Rayonnement thermique du corps noir. Date de création 30.09.2003 16.55.56 et consulté le 05.08.2010)

<http://www.ac-nice.fr/clea/lunap/html/Spectres/SpecEnBref.html> (Les spectres. Site revissé le 18.9.2010 et consulte le 17.08.2010)

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-bilan-radiatif-terre2.xml> (Publié par Florence Kalfoun le 21.10.2003 et consulté le 05.06.2010)

http://www.lprl.org/resources/IR_stealth_files/principes%20de%20mesures%20infrarouge.pdf
(Méthodologie applicable à la mesure de l'émissance de matériaux électromagnétiques furtifs multifonctions IR/RAM. Date de création 13.09.2009 12.52.15 et consulté le 25.09.2010)

<http://www.questionsante.be/outils/gsm.pdf> (Les antennes GSM. Date de création 24.11.2005 17.19.33 et consulté le 18.5.2010)

http://www.guides.be/classified/guide/offres_d_emploi/ (guide des énergies renouvelables. Consulté le 30.09.2010)

<http://at-div-ecr.web.cern.ch/at-div-ecr/Cryolab/seminaire.ppt> (consulté le 24.06.201)

6.0 ANNEXE

Document 1

MESURE DES ELEMENTS CHIMIQUES

Mesures effectuées du 22.11.2010 au 26.11.2010 au laboratoire l'école supérieure polytechnique de Kymenlaakson.

A- Mesures avec BB0

Concentration de gaz

Moyenne

NOx	23	19	18	20	15	13	18
SO2	0,7	0,4	0,8	0,6	0,5	0,8	0,633
CO	8	10	10	11	11	11	10,17
CO2	2,4	2,3	2,2	2,13	1,32	1,76	2,018
O2	17,45	17,42	17,56	17,61	18,79	18,2	17,84

B- Mesures avec BB2500

Filtre

F6

Concentration de gaz en fonction de la pression

Moyennes

Pression	2/30psig	3,5/50 psig	3/45 psig	2/30psig	3,5/50 psig	3/45 psig	2/30psig	3,5/50 psig	3/45 psi
NOx	7	13	17	6	13	16	6,5	13	16,5
SO2	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,8	1	0,9	0,85
CO	11	12	11	11	11	12	11	12	11,5
CO2	1,07	1,69	2,03	1,05	1,62	2,03	1,06	1,7	2,03
O2	19,07	18,17	17,69	19,12	18,35	17,75	19,1	18	17,7

Filtre

F5

Concentration de gaz en fonction de la pression

NOx	5	13	16	6	13	17	5,5	13	16,5
SO2	1,4	1	0,9	1,1	0,4	0,6	1,25	0,7	0,75
CO	10	11	10	11	11	10	10,5	11	10
CO2	0,83	1,75	2,03	1,04	1,65	2,03	0,935	1,7	2,03
O2	19,38	18,11	17,73	19,13	18,28	17,77	19,26	18	17,8

Filtre
F4

Concentration de gaz en fonction de la pression

NOx	7	13	16	6	12	16	6,5	13	16
SO2	0,8	0,5	0,7	1,1	1,2	1,1	0,95	0,9	0,9
CO	11	12	11	11	12	12	11	12	11,5
CO2	1,05	1,62	2,08	0,9	1,67	2	0,975	1,6	2,04
O2	19,12	18,29	17,74	19,28	18,24	17,77	19,2	18	17,8

Filtre
F3

Concentration de gaz en fonction de la pression

NOx	5	13	16	6	13	16	5,5	13	16
SO2	1,1	0,9	0,9	0,2	0,1	0,7	0,65	0,5	0,8
CO	12	12	12	11	11	11	11,5	12	11,5
CO2	0,8	1,75	2,06	1,02	1,71	1,91	0,91	1,7	1,99
O2	19,44	18,15	17,72	19,17	18,24	17,93	19,31	18	17,8

Filtre
F2

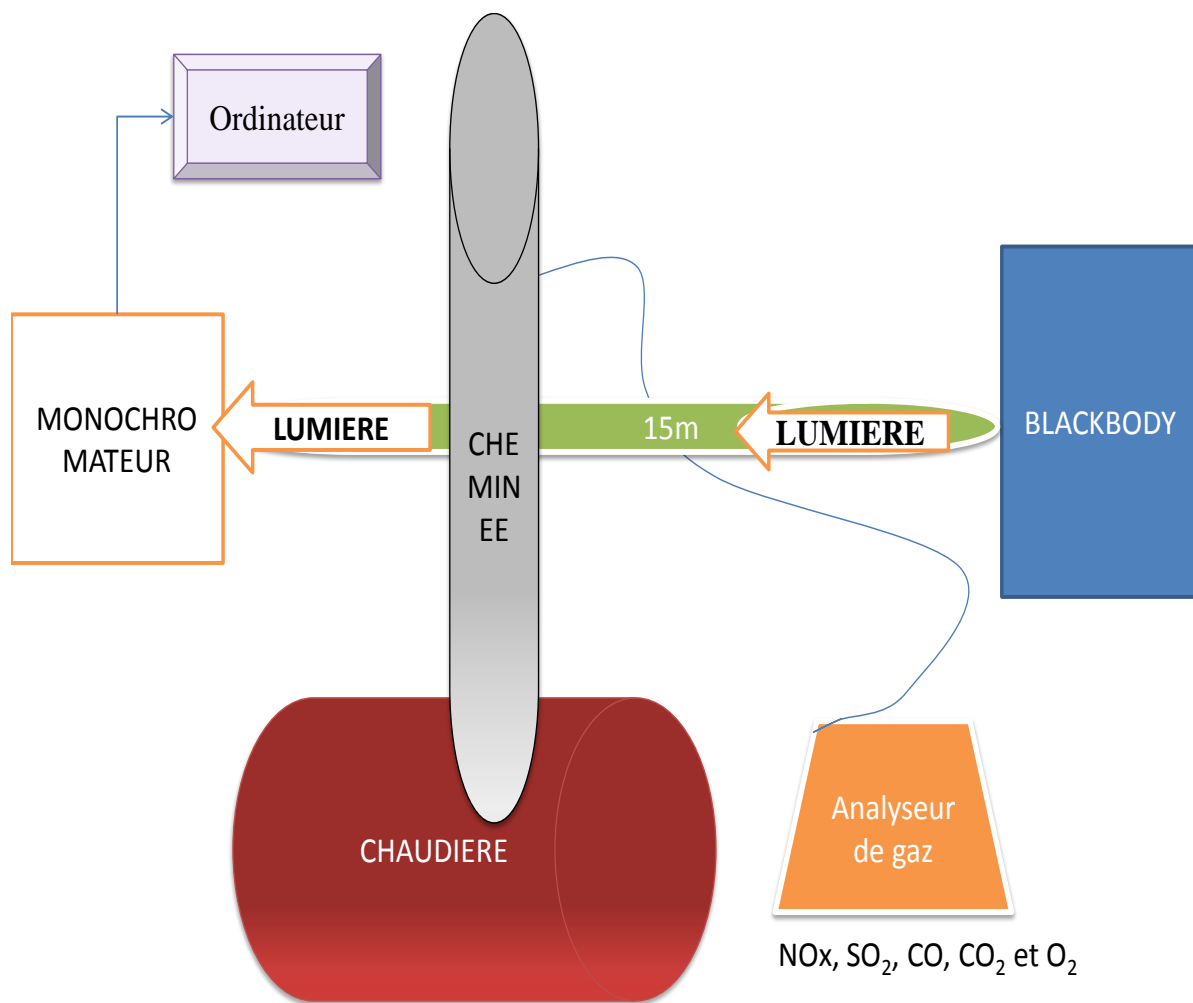
Concentration de gaz en fonction de la pression

NOx	7	13	16	6	12	16	6,5	13	16
SO2	1,1	0,8	0,9	0,3	0,3	0,4	0,7	0,6	0,65
CO	12	13	10	11	13	12	11,5	13	11
CO2	1,01	1,72	1,93	0,95	1,69	1,99	0,98	1,7	1,96
O2	19,13	18,2	17,81	19,26	18,27	17,84	19,2	18	17,8

Les unités et zones d'absorption des gaz

Corps	unités	absorption
NOx	ppm	2500 nm
SO2	ppm	500 nm
CO	ppm	5000 nm
CO2	vol %	20
O2	vol %	25

Document 2 Schéma du dispositif expérimental



Document 3 Tableau récapitulatif des données à mesurer en laboratoire.

Distance BB	Filtres	Tubes	Flamme (gaz)	Vapeur	Longueur d'onde (nm)	Numéros des différentes mesures		
						A	B	C
15	F2	on	on	on	5200 - 7000	A2-1	B2-1	C2-1
15	F3	on	on	on	500 - 1300	A3-1	B3-1	C3-1
15	F4	on	on	on	800 - 3200	A4-1	B4-1	C3-1
15	F5	on	on	on	2300 - 5500	A5-1	B5-1	B5-1
15	F6	on	on	on	200 - 9600	A6-1	B6-1	C6-1
15	F2	on	off	on	5200 - 7000	A2-2	B2-2	C2-2
15	F3	on	off	on	500 - 1300	A3-2	B3-2	C3-2
15	F4	off	off	on	800 - 3200	A4-2	B4-2	C4-2
15	F5	off	off	on	2300 - 5500	A5-2	B5-2	C5-2
15	F6	off	off	on	200 - 9600	A6-2	B6-2	C6-2
15	F2	on	off	off	5200 - 7000	A2-3	B2-3	C2-3
15	F3	on	off	off	500 - 1300	A3-3	B3-3	C3-3
15	F4	on	off	off	800 - 3200	A4-3	B4-3	C4-3
15	F5	on	off	off	2300 - 5500	A5-3	B5-3	C5-3
15	F6	on	off	off	200 - 9600	A6-3	B6-3	C6-3
15	F2	on	on	off	5200 - 7000	A2-4	B2-4	C2-4
15	F3	on	on	off	500 - 1300	A3-4	B3-4	C3-4
15	F4	on	on	off	800 - 3200	A4-4	B4-4	C4-4
15	F5	on	on	off	2300 - 5500	A5-4	B5-4	C5-4
15	F6	on	on	off	200 - 9600	A6-4	B6-4	C6-4

BB : Corps noir (blackbody)

A : première mesure en fonction des différents filtres

B : deuxièmes mesures en fonction des différents filtres

C : troisième mesure en fonction des différents filtres