

Titre : T6 Bilans thermiques : Flux convectif, convectif, radiatif

Présentée par : Léa Chibani

Rapport écrit par : Alfred Hammond

Correcteur : Arnaud Raoux

Date : 25/10/19

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Thermodynamique	Diu		
Physique PC		Dunod	2016
Cours de prépa de Matthieu Rigault ; chapitre Diffusion http://www.matthieurigaut.net/index.php?page/2e-annee-programme-2002			
Vidéo convection de Raleigh Bénard https://www.youtube.com/watch?v=B8H06ZA2xmo&feature=youtu.be			

Plan détaillé

I]Systèmes thermodynamiques hors équilibres

A) équilibre thermodynamique local

B) Loi de conservation de l'énergie

C) Notion de flux thermique

II]Types de flux

A) Flux conductif

B) Flux Conducto-convectif

C) Flux radiatif

III]Bilan thermique de l'isolation d'une maison

A) Position du problème

B) Résolution

C) Puissance perdue

Niveau choisi pour la leçon :

CPGE 2^{ème} année

Pré-requis :

- Thermodynamique (1^{er} et 2nd principes)

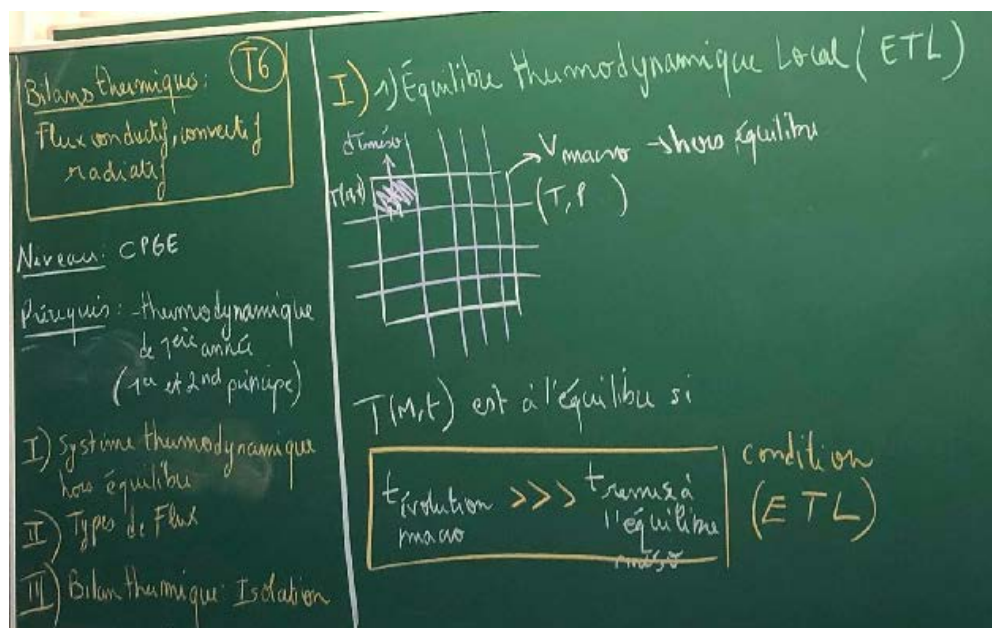
Intro :

Auparavant en thermodynamiques, les systèmes étudiés étaient souvent homogènes. Cependant avec une caméra thermique filmant une maison on remarque que la température n'est ni homogène ni constante, l'équilibre thermodynamique macroscopique n'est pas atteint. Comment faire des bilans thermiques et étudier la dynamique des transferts d'énergie thermique ?

I) Systèmes thermodynamiques hors équilibres

A) équilibre thermodynamique local

Comparaison des temps d'évolution micro (molécules), et mésoscopiques (capteurs)

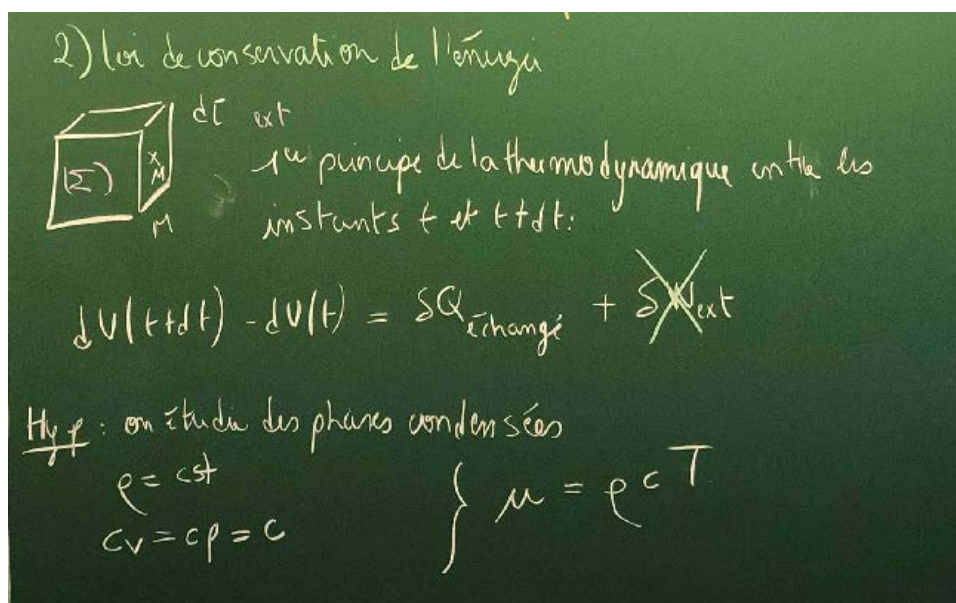


Si la condition sur les temps d'évolution est vérifiée, on peut supposer pouvoir définir des variables thermodynamiques (T, P, S, U, \dots) dans le volume mésoscopique contenant suffisamment de particules pour appliquer les lois de la thermodynamique.

B) Loi de conservation de l'énergie

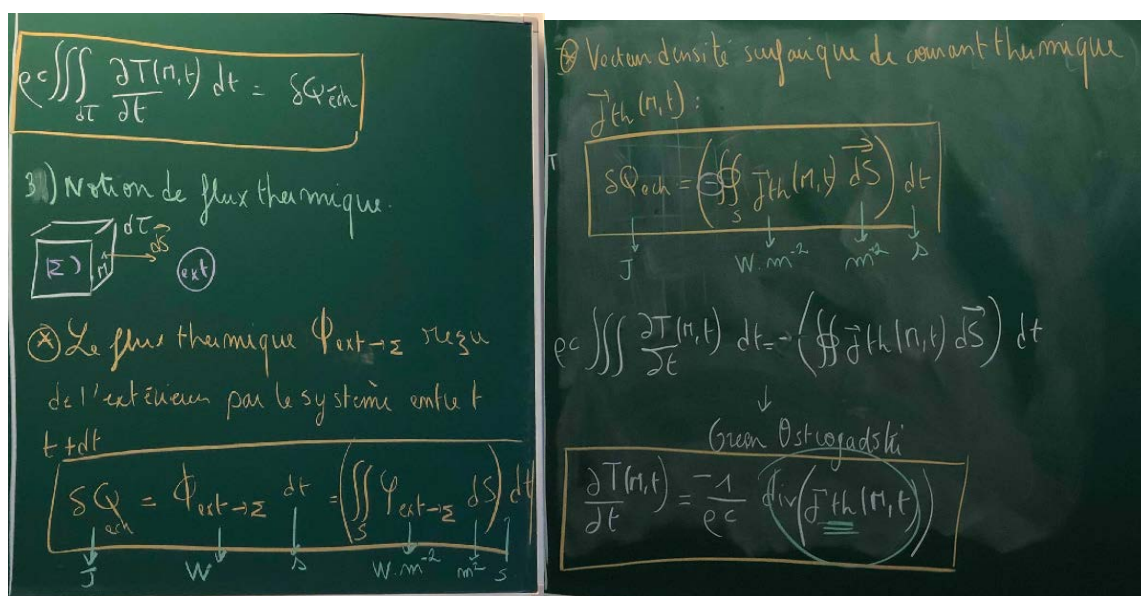
On applique le premier principe de la thermodynamique sur la matière dans un volume dt constituant un système fermé entre t et $t+dt$

On supposera de plus que le milieu est homogène et incompressible (phase condensée ordinaire, coefficient de dilatation thermique négligé), de sorte que l'énergie interne volumique s'écrit : $du = p c_p T$



C) Notion de flux thermique

On introduit le champ vectoriel de densité surfacique de flux thermique j_{th} et on le relie à l'énergie thermique reçue par un système à travers sa surface extérieure (orientée) entre t et $t+dt$



On utilise ensuite le théorème de Green Ostrogradski pour obtenir une première équation locale reliant la variation temporelle de température au champ j_{th}

Transition : On va maintenant caractériser les types de flux thermiques pour trouver des relations entre le flux thermique et le champ de température

II) Types de flux

A) Flux conductif

Def : transport d'énergie thermique à travers un milieu matériel sans transport macroscopique de matière.

D'après le second principe, l'énergie thermique ne peut aller que d'un corps chaud vers un corps plus froid. On introduit la loi phénoménologique de Fourier (1804 postulée 1822 preuve expérimentale), on explique le signe moins et l'hypothèse de simplicité faisant apparaître le gradient. On en profite pour donner des ordres de grandeur de conductivité thermiques.

II) 1) Conduction

La loi phénoménologique de Fourier

$$\vec{J}_{th}(n,t) = -\lambda \vec{\text{grad}} T(n,t)$$

\downarrow \downarrow \downarrow
 W.m^{-2} $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ K.m^{-1}

	solide	liquide	gaz
λ ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	$\approx 10^2$	$\approx 10^{-1}$	10^{-2}

$$\frac{\partial T(n,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \text{div}(\vec{\text{grad}} T(n,t))$$

$$\frac{\partial T(n,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \Delta T(n,t)$$

équation de diffusion

On insère la loi de Fourier dans l'équation locale du bilan thermique obtenue en I)C) et on obtient l'« équation de diffusion de la chaleur ». (Attention a bien toujours dire énergie thermique et non pas chaleur)

3) Analyse physique

- ⊗ $t \rightarrow -t$ l'évolution d'un système macroscopique est irréversible.
- ⊗ CL de solution \rightarrow solution
- ⊗ D = coefficient de diffusion thermique

$$D = \frac{\lambda}{\rho c} = \frac{L^2}{T}$$

$$\tau_{diff} = \frac{L^2}{D}$$

$$\tau_{diff \text{ bois}} = \frac{(10 \cdot 10^{-2})^2}{10^{-3}} = 28 \text{ h}$$

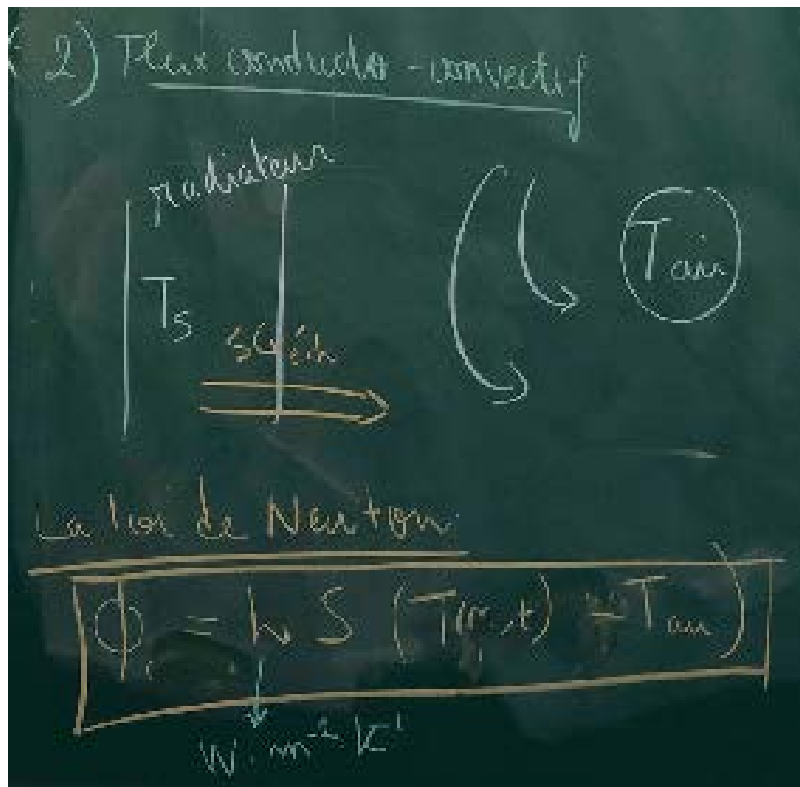
$$\tau_{diff \text{ métal}} = 10 \text{ s}$$

Points importants : c est une équation de diffusion (l'irréversibilité se cache dans la dérivée d'ordre 1 en temps), l'équation est linéaire (on peut la résoudre par transformation de Fourier), ses solutions ne sont pas propagatives, elle fait apparaître un coefficient de diffusion thermique

D.

B) Flux Conducto-convectif

On fait un dessin d'un rouleau de convection fluide et on montre la vidéo (Cf références). On introduit ensuite la notion de transport thermique convectif. Def : transport d'énergie thermique avec mouvement macroscopique de matière. (On peut aussi parler des vents et courants marins, ou de l'effet non négligeable du mistral sur la température quotidienne à Avignon...)



On explique ensuite qu'il y a (en plus de la convection) conduction à l'interface entre le fluide et un solide, Ce qui donne la loi phénoménologique de Newton reliant le flux d'énergie thermique à la température de la surface du solide et la température du fluide loin de la couche limite.

C) Flux radiatif

On rappelle la définition de corps noirs, de la loi de Planck du rayonnement et de sa forme intégrée sur toutes les fréquences : la loi de Stefan $\phi = \sigma T^4$ avec $\sigma = 5.7e-8 \text{ W/m}^2/\text{K}^4$. On peut aussi introduire le facteur multiplicatif d'émissivité entre 0 et 1 car les objets réels ne sont pas vraiment des corps noirs. On peut aussi rappeler l'existence du vecteur de Poynting qui est le champ vectoriel de densité de flux d'énergie.

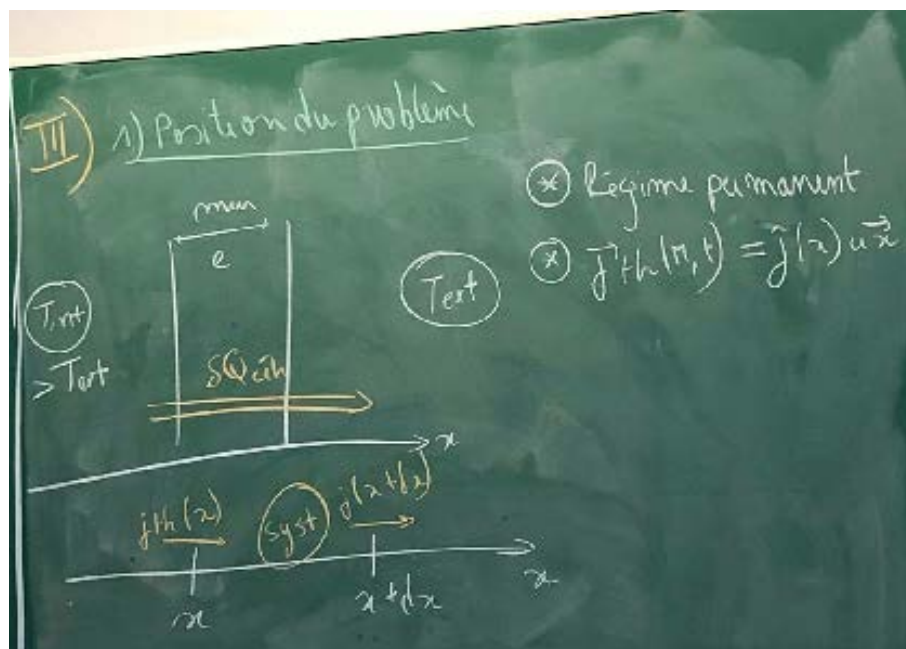
Pour donner du concret, il faudrait expliquer brièvement le cas du soleil et de la terre et parler de l'atténuation du flux radiatif en $1/r^2$ puis donner un ordre de grandeur de la puissance reçue par m^2 du soleil (attention en réalité l'atmosphère nous protège énormément)

Transition : Cette leçon à deux cas d'applications industrielles simples, l'optimisation de flux thermiques et au contraire l'isolation thermique. On a choisi d'étudier le deuxième.

III] Bilan thermique de l'isolation d'une maison

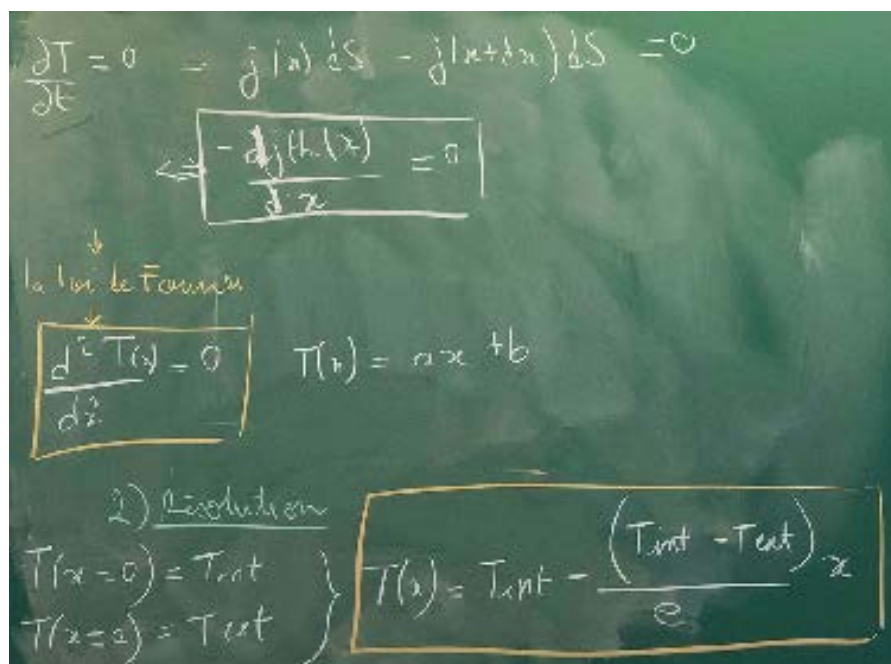
A) Position du problème

On étudie le transfert thermique à travers les murs d'une maison, la température dans la maison est maintenue constante grâce à un radiateur. En régime permanent, la puissance consommée par le radiateur est égale au flux d'énergie thermique par unité de temps sortant au travers des murs. On fait de plus une modélisation unidimensionnelle.



B) Résolution

On utilise la loi de Fourier, le premier principe local et les conditions aux limites pour prouver que le profil de température est affine dans le mur.



C) Puissance perdue

3) Puissance perdue.

$$P_{perdue} = \phi_{int \rightarrow ext} = j_{th}(x) S$$

↓
Loi de Fourier

$$P_{perdue} = -\lambda \frac{dT(x)}{dx} S$$

$$P_{perdue} = \frac{\lambda S}{e} (T_{int} - T_{ext})$$

AN] $S = 11 \text{ m}^2$

$$P_{perdue} = 1100 \text{ W}$$

Enfin, on explicite l'analogie avec l'électronique (V et T, I et ϕ_{th}). D'où la notion de résistance thermique. Une application numérique donne la puissance perdue pour un mur de brique. On ajoute ensuite une couche de laine de verre sur le mur, les résistances thermiques se somment. (Calculs sur slides)

Questions posées par l'enseignant

Définissez l'équilibre thermodynamique local ?

Un volume mésoscopique contient un grand nombre de particules. Les distributions statistiques de position et de vitesse de ces particules permettent de définir toutes les variables thermodynamiques extensives du système mésoscopique (U, S, ...) par moyenne sur toutes les particules.

Comment définir les variables intensives T et P (supposées homogènes) dans le volume mésoscopique ?

$$dU = TdS - PdV \text{ donc } T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V \quad -P = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S$$

A quoi est reliée la température au niveau microscopique ?

La température est reliée à l'énergie mécanique moyenne d'une particule

Quelles sont les unités dans la formule du théorème d'équipartition ?

L'énergie mécanique microscopique moyenne d'une particule du volume mésoscopique de température T est $\langle E_m \rangle = \frac{1}{2} f k_B T$ avec f le nombre de variables indépendantes (de l'espace des phases d'une particule) intervenant dans l'expression de l'énergie d'une particule (3 composantes de vitesse pour un gaz parfait, 3 composantes de vitesse et 3 composantes de position pour une phase condensée)

Avait-on besoin de négliger les travaux de pression ?

Non car ils sont pris en compte dans $dH=d(U+PV)=C_p dT$ pour une transformation isobare

L'énergie interne U est une fonction de quoi ? et H ?

De S , V et N le nombre de particules.

Comment sont définis les capacités calorifiques ?

$dU=TdS-PdV$ donc $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V$

$dH=TdS+VdP$ donc $C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_P$

Démontrez que $C_V=C_P$ si V ne varie pas

Si V ne varie pas, la transformation est isochore isobare donc $d(PV)=0$, c'est-à-dire $dU=dH$ donc en divisant par dS on obtient l'égalité des capacités calorifiques.

Quel est le champ de densité de flux thermique dans le cas de l'électromagnétique ?

Le vecteur de Poynting

Donnez la définition du rayonnement

C'est la propagation d'énergie dans un champ électromagnétique

Y a-t-il transport de matière ?

Transport de photon, ce n'est pas de la matière

Quelle est alors la différence entre flux conductif et flux radiatif du point de vue macroscopique ?

La présence d'un milieu matériel, les photons se propagent même dans le vide mais il n'y a pas de conduction thermique dans le vide

Qu'est-ce qu'un milieu transparent ?

Un milieu d'indice optique réel ou de partie imaginaire négligeable pour les chemins optiques considérés.

Pourquoi la loi de Fourier est-elle raisonnable ? Justifiez le sens du flux thermique et la forme de la loi

Le vecteur \mathbf{j}_{th} donné par cette loi est dirigé des hautes températures vers les basses températures. La direction du vecteur gradient est celle donnant la pente maximale donc pour un milieu homogène on s'attend bien à ce que le flux thermique conductif soit dans cette direction. Enfin, si le profil de température est homogène, le flux conductif doit être nul. Enfin, une hypothèse raisonnable est celle de proportionnalité entre la différence spatiale de température et la norme de \mathbf{j}_{th} .

Que dit le second principe sur le sens des transferts thermiques Q ? Démontrez le :

Lorsque deux systèmes globalement isolés échangent uniquement de l'énergie thermique, celle-ci se déplace toujours du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Cela se démontre en utilisant les deux principes de la thermodynamique et en écrivant la positivité de l'entropie créée.

D'où vient $t_{diff}=L^2/D$?

De l'a-dimensionnement de l'équation de diffusion

Pourquoi t_{diff} n'est pas proportionnel à L ?

Ce n'est pas une équation de propagation

Une surface de $11m^2$ est-elle raisonnable pour les murs de tout une maison ?

Raisonné pour une pièce unique

Puissance typique d'un radiateur ? d'une ampoule ? d'un ordinateur ?

Radiateur : 1kW, ampoule 50W, ordi : 100W

Qu'appelle-t-on conducto-convectif ?

C'est un bilan global résultant d'un flux conductif entre une phase condensée immobile et un fluide en mouvement, et d'un flux convectif grâce au mouvement fluide.

Où a lieu le flux conducto convectif dans l'expérience de la vidéo ?

Au dessus du verre d'eau chaude

Comment s'appelle le phénomène de la vidéo ?

La convection (ou l'instabilité) de Rayleigh-Bénard

Expliquez le sens du mouvement de fluide

L'eau chaude, est moins dense par dilatation thermique. Elle monte vers le haut grâce à la poussée d'Archimède. La convection a lieu que si la conduction seule n'est plus suffisante pour assurer le flux thermique important.

Commentaires donnés par l'enseignant

- Bon équilibre entre les aspects théoriques abstraits de la leçon et les phénomènes du quotidien concrets.
- Pensez à montrer plus de physique en intro pour teaser

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Bibliographie conseillée